

FRACCIONES DE FÓSFORO EDÁFICO BAJO DIFERENTES MANEJOS

Ana Paula Giannini ^{1*}, Adrian Enrique Andriulo ¹, Nicolas Wyngaard ², Alicia Beatriz Irizar ¹

¹ Grupo Gestión Ambiental, Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pergamino, Buenos Aires, Argentina

² Unidad Integrada, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

El fósforo (P) es uno de los nutrientes que más limita la producción agrícola. A nivel mundial, la región pampeana presenta los mayores déficits de P edáfico. Como su existencia en el suelo varía desde iones en solución a compuestos orgánicos e inorgánicos muy estables, es necesario realizar evaluaciones en diferentes escalas espacio-temporales para relevar las fracciones de P más afectadas. Los objetivos del presente trabajo fueron: a) evaluar diferentes fracciones de P antes de la introducción de la agricultura y los cambios a largo plazo en un suelo Argiudol típico bajo dos situaciones controladas con 35 y 105 años de agricultura continua y, b) evaluar los cambios en el largo plazo de dichas fracciones de P en la misma serie de suelo bajo la agricultura practicada a nivel regional. Se determinaron las siguientes fracciones de P: total (PT), inorgánico (Pi), orgánico (Po) y extractable (Pe). Las reservas de P del horizonte A disminuyeron 20 y 42% el PT, 20 y 58% el Pi y 20% el Po con 35 y 105 años de agricultura continua, respectivamente, en relación a las reservas de PT, Pi y Po de la situación pseudo prístina. Por su parte, la agricultura practicada a nivel regional disminuyó 29% el PT, 33% el Pi y 20% el Po en comparación con la situación pseudo prístina. El Po disminuyó en las primeras décadas de agricultura. Posteriormente, no contribuiría a la nutrición de los cultivos. La reserva de PT disminuyó aún más al incrementarse los años de agricultura debido principalmente a reducciones en el Pi y también por la brusca caída del extractable (Pe) (92%), el cual se ubicó debajo de los valores típicos reportado para la subregión pampa ondulada. El sistema de cultivo predominante pone en riesgo el estado nutricional de los suelos y la productividad de los agroecosistemas.

Palabras clave: fósforo orgánico, fósforo inorgánico, fósforo extractable, suelo

PHOSPHORUS FRACTIONS UNDER DIFFERENT MANagements

ABSTRACT

Phosphorus (P) is one of the nutrients that most limits agricultural production. Worldwide, the Pampas region has the highest edaphic P deficits. As its existence in the soil varies from ions in solution to very stable organic and inorganic compounds, it is necessary to carry out studies at different spatial-temporal scales to survey the most affected P fractions. The objectives of the present work were: a) to evaluate different P fractions before the agriculture introduction and the long-term changes in a typical Argiudol Pergamino series under two controlled situations with 35 and 105 years of continuous agriculture and, b) to evaluate long-term changes of these P fractions in the same soil series under the agriculture performed at regional level. The following P fractions were determined: total (PT), inorganic (Pi), organic (Po), and extractable P (Pe). The P reserves of the A horizon decreased 20 and 42% (PT), 20 and 58% (Pi) and 20% (Po) with 35 and 105 years of continuous agriculture, respectively, in relation to the reserves of PT, Pi and Po of the pseudo

* Autor de contacto:
giannini.anapaula@inta.gob.ar

Recibido:
15-06-21

Recibido con revisiones:
21-03-22

Aceptado:
03-03-22

pristine situation. For its part, agriculture practiced at regional scale decreased by 29% (PT), 33% (Pi) and 20% (Po) compared to the pseudo-pristine situation. The Po declined in the first decades of agriculture. Subsequently, it would not contribute to crop nutrition. The PT reserve continued to decrease at inorganic fraction expense, visualized in the abrupt drop in Pe (92%), which was below the range of typical values reported for the rolling pampas sub region. The prevailing cropping system puts at risk the nutritional status of soils and the productivity of agroecosystems.

Keywords: organic phosphorus, inorganic phosphorus, extractable phosphorus, soil

INTRODUCCIÓN

Los Argiudoles de la Pampa Ondulada bajo agricultura continua registran una disminución marcada del fósforo (P) extractable (Pe) determinado por la metodología de Bray and Kurtz (1945). Dicha metodología se utiliza para estimar el P disponible para los cultivos y en el diagnóstico de la fertilización fosforada (Correndo, 2018; Ferraris et al., 2001; García et al., 2015). El Pe incluye al P de la solución del suelo y se encuentra en equilibrio con fracciones de P orgánicas (Po) e inorgánicas (Pi) de diferente labilidad (Hedley et al., 1982); sin embargo, representa una proporción muy pequeña del fósforo total del suelo (PT) (Galantini, 2005; Suñer et al., 2000).

Las transformaciones entre el Po y el Pi están estrechamente relacionadas y, si bien las plantas absorben principalmente Pi lábil de la solución del suelo, existen trabajos que indican la importancia del Po como un reservorio edáfico de P para las plantas (Stewart y Tiessen, 1987). De hecho, cuando los cambios de uso afectan el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), se manifiesta un efecto directo sobre las reservas y la disponibilidad del Po (Gosling & Shepherd, 2005). Sin embargo, los cambios en el manejo del suelo que afectan las reservas de MOS difícilmente provoquen un cambio en el Po en el corto/mediano plazo (Giannini, 2019). Por lo tanto, el conocimiento de la dinámica del Po puede proveer información valiosa acerca de la cantidad y la disponibilidad potencial de esta fracción de P en el sistema suelo-planta en el largo plazo.

En la Pampa Ondulada, el sistema productivo predominante es el monocultivo de soja (Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca [MAGyP], 2021). Dicho cultivo tiene alto requerimiento de P y más del 80% del P que absorbe es exportado por los granos (García y Correndo, 2016). Su fertilización fosfatada está poco difundida y, cuando se aplica, es con dosis reducidas (Álvarez et al., 2016). En consecuencia, el balance de P es altamente negativo, dando lugar a un marcado empobrecimiento de este nutriente en el suelo (García et al., 2006; MacDonald et al., 2011). Vázquez (2002) describió pérdidas de hasta un 80% de PT en el horizonte A luego de más de 50 años de agricultura continua. Diversos trabajos regionales demostraron que la disminución de PT del suelo se debió mayormente a una disminución de Pi en el largo plazo (Álvarez et al., 2018; Giuffrè et al., 1998; Novello y Quintero, 2009). En función del uso y manejo del suelo, es necesario realizar evaluaciones sistemáticas en diferentes escalas temporales y espaciales para estudiar el efecto de la agricultura en el largo plazo sobre la variación de las diferentes fracciones de P. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) evaluar las fracciones de P antes de la introducción de la agricultura y los cambios de largo plazo en un Argiudol típico serie Pergamino en dos experimentos de larga duración y, 2) evaluar los cambios en el largo plazo a nivel regional de dichas fracciones de P en la misma serie de suelo bajo agricultura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó dentro del área que delimita la cuenca del Arroyo Pergamino, ubicada al norte de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). El clima es templado húmedo (Hall et al., 1992), siendo la precipitación media anual para el periodo 1910-2021 de 982 mm y la temperatura media anual para el periodo 1967-2021 de 16,6°C (Estación meteorológica EEA Pergamino, INTA). El suelo es un Argiudol típico serie Pergamino con pendientes menores a 0,5% sin fases por erosión (INTA, 1972).

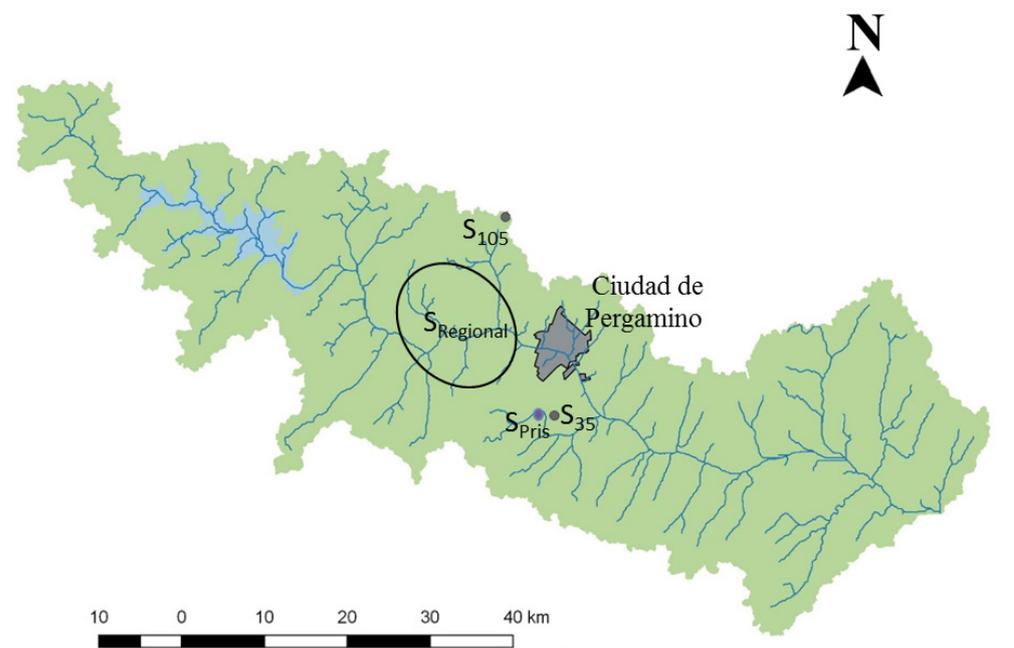


Figura 1. Mapa donde se ubican las diferentes situaciones evaluadas: pseudo prístina (S_{Pris}), agricultura regional ($S_{Regional}$) y, 35 años (S_{35}) y 105 años (S_{105}) desde el inicio de la agricultura.

Figure 1. Map where the different evaluated situations are located: pseudo pristine (S_{Pris}), regional agriculture ($S_{Regional}$) and, 35 years (S_{35}) and 105 years (S_{105}) from the start of agriculture.

Experimentos de larga duración

Para poder relevar la dinámica de las fracciones de P en suelos de serie Pergamino (Objetivo 1), se evaluaron dos experimentos con distinto tiempo desde su conversión a la agricultura continua. Los sitios elegidos para el estudio (S_{35} y S_{105}) constituyen experimentos de largo plazo sobre los cuales se tiene conocimiento de la secuencia anual de cultivos y sus respectivos rendimientos, de la evolución de los sistemas de laboreo y de la fertilización mineral (Andriulo, 1995; Milesi et al., 2013). Como situación pseudo prístina (S_{Pris}) se utilizó un sitio sin antecedentes de laboreo, similar a la situación inicial de S_{35} y S_{105} .

S_{35} : consiste en un experimento de largo plazo con monocultivo de soja bajo laboreo convencional, ubicado en la Estación Experimental de INTA Pergamino. Se originó en 1980 sobre un suelo prístino (35 años de agricultura al momento de muestreo). La aplicación de fertilizantes comenzó en 1998 con una dosis de 14 kg P ha⁻¹.

S_{105} : este experimento corresponde a un lote bajo agricultura continua desde 1910 (105 años de agricultura al momento de muestreo). Desde mediados de la década del '90, el sistema de labranza es siembra directa (SD), con predominio de soja en la secuencia de cultivos. Hasta 1990 no se aplicaron fertilizantes de ningún tipo (Andriulo, 1995). Posteriormente, la dosis media anual estuvo por debajo de los 10 kg P ha⁻¹. La historia agrícola es, al menos, 25 años superior a la media de los establecimientos agrícolas de la región, por lo que su análisis permitiría anticipar futuras tendencias.

S_{Pris} : debido a que los ensayos de larga duración analizados no contaban con un testigo no disturbado, se utilizó como situación de referencia una porción de un lote ubicado dentro de la Estación Experimental de INTA Pergamino con al menos 100 años sin laboreo.

Relevamiento regional

El resto de los sitios muestreados son ocho lotes de producción agrícola de establecimientos privados (Figura 1) que partieron de la misma situación considerada como pseudo prístina (S_{Pris}). Estos sitios ($S_{Regional}$) representan casos reales de agriculturización regional, los cuales permiten relevar el estado de fertilidad

fosfatada actual en la región (Objetivo 2). La historia productiva de dichos sitios fue: agrícola-ganadera hasta los años '60, agricultura continua con presencia de soja en la rotación desde los años '70 e incorporación de la SD como sistema de labranza a partir de la década del '90. La dosis promedio anual de fertilizante fosforado fue 15 kg P ha⁻¹ luego de la incorporación de la SD (Cabrini y Calcaterra, 2009).

Muestreo y análisis de suelos

Los muestreos de suelo se realizaron en julio de 2015. Se tomaron 3 muestras compuestas en S_{Pris} , S_{35} y S_{105} y, 8 muestras compuestas en $S_{Regional}$ a cuatro profundidades: 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm; se secaron en estufa y se tamizaron con un tamiz de 2 mm de diámetro de malla. Las formas Pe, PT y Po se determinaron por los métodos de Bray and Kurtz (1945), Sommers and Nelson (1972) y Saunders and Williams (1955), respectivamente. El Po se determinó a 0-5, 5-10 y 10-20 cm. El Pi se calculó por diferencia entre el PT y Po. Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de la EEA INTA Pergamino. Además, se extrajeron cilindros para determinar la densidad aparente (DAP) a 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad. Todas las muestras fueron secadas en estufa a una temperatura de 105 °C hasta peso constante y la densidad se calculó en función del diámetro interno y la altura del cilindro (Burke et al., 1986). Las reservas de las diferentes formas de P, excepto Pe, se expresaron como stock (Mg ha⁻¹) en una masa equivalente de 2400 Mg suelo ha⁻¹ debido a que se observaron diferencias significativas de DAP en diferentes profundidades.

Al momento del muestreo, la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) a una profundidad de 0-20 cm fue de 1.8%, 1.6%, 2.5% y 1.7% para los sitios S_{35} , S_{105} , S_{Pris} y $S_{Regional}$ respectivamente.

La pérdida (%) de cada fracción de P se calculó como $(S_{Pris} - S_{Regional} / 35 \text{ o } 105) / S_{Pris} * 100$.

Para analizar estadísticamente las diferencias en las formas de P entre S_{Pris} y S_{35} , S_{105} o $S_{Regional}$ se utilizó ANOVA, comprobándose los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad de los errores. Dentro $S_{Regional}$ los ocho sitios muestreados se tomaron como repeticiones. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de t con $P < 0,05$ (Di Rienzo et al., 2013).

RESULTADOS

Distribución en profundidad de las concentraciones de PT, Po y Pi

El estudio a nivel regional ($S_{Regional}$) evidenció que todas las formas de P en las profundidades analizadas disminuyeron con respecto a S_{Pris} (Figura 2). La disminución en los primeros 5 cm de profundidad fue mayor que en el resto de las profundidades analizadas, excepto en Pi donde la magnitud de la diferencia fue igual en 0-5 que en 5-10 cm. La diferencia de Po a 5-10 cm ($P < 0,06$) fue considerada significativa. La disminución de la concentración de Pi fue mayor que la de Po en todas las profundidades en relación S_{Pris} (Figura 2). Luego de 35 años de monocultivo de soja bajo laboreo convencional desde la introducción de la agricultura (S_{35}), disminuyeron las concentraciones de Po y PT en todas las profundidades analizadas mientras que las de Pi se mantuvieron constantes en comparación con S_{Pris} (Figura 2). La disminución de Po fue más importante en los primeros 5 cm.

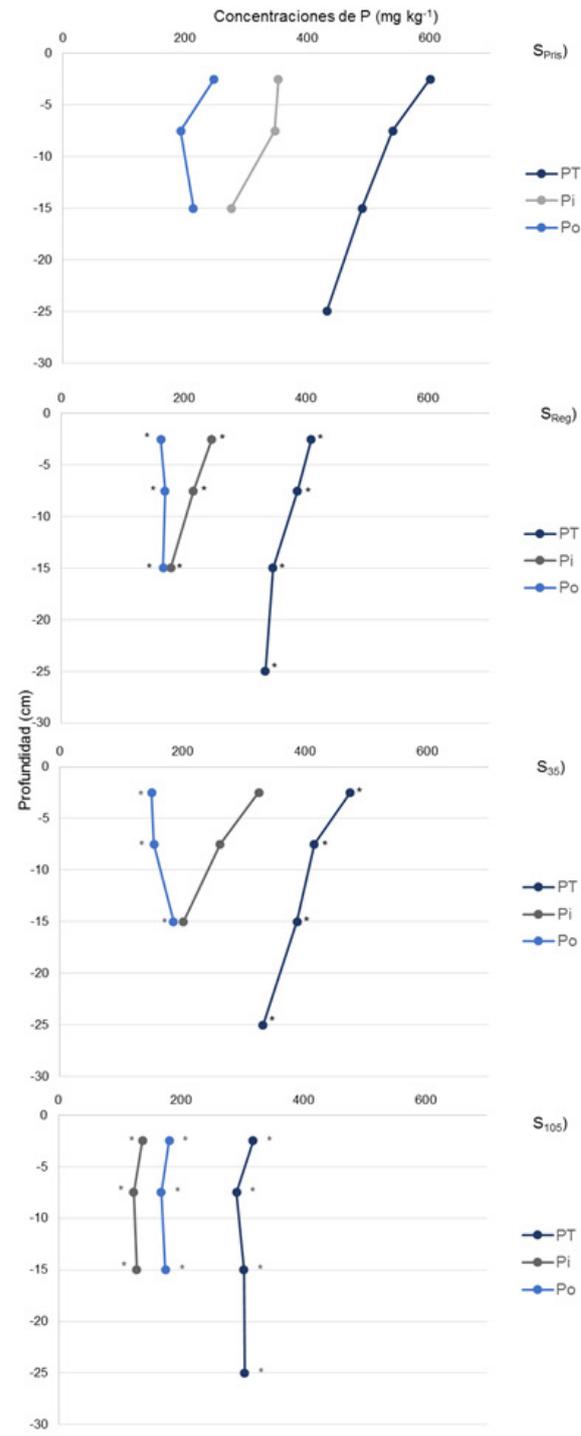


Figura 2. Comparación de la concentración de fósforo total (PT), orgánico (Po) e inorgánico (Pi) en diferentes espesores de suelo para las situaciones $S_{Regional}$, S_{35} , y S_{105} con respecto a S_{Pris} . El (*) Indica diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre S_{Pris} y $S_{Regional}$, S_{35} o S_{105} para cada forma de P por profundidad (0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm).

Figure 2. Comparison of total (PT), organic (Po) and inorganic (Pi) phosphorus concentrations at different soil depth for $S_{Regional}$, S_{35} , and S_{105} situations with respect to S_{Pris} . The (*) indicates statistically significant differences ($P < 0.05$) between S_{Pris} and $S_{Regional}$, S_{35} or S_{105} for each P fraction by depth (0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm).

La agricultura continua durante 105 años (S_{105}), provocó una disminución de las concentraciones de Po, Pi y, por lo tanto, de PT en todas las profundidades analizadas (Figura 2). Asimismo, las concentraciones de Po fueron similares a las observadas en S_{35} y $S_{Regional}$.

Disminución de las reservas de PT, Po y Pi

Hubo marcadas diferencias en la DAP entre la S_{Pris} y las situaciones restantes (Figura 3). En el espesor 20-30 cm, los valores medios de DAP no difirieron entre S_{Pris} y las tres situaciones relevadas (S_{35} , S_{105} y $S_{Regional}$).

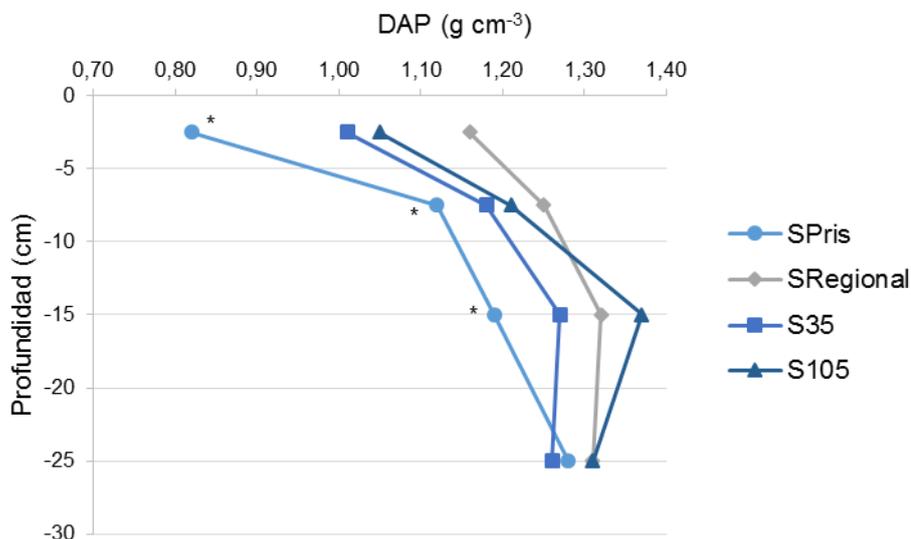


Figura 3. Densidad aparente (DAP) en el perfil del suelo para las situaciones S_{Pris} , $S_{Regional}$, S_{35} y S_{105} . El (*) Indica diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre la situación S_{Pris} y la situación $S_{Regional}$, S_{35} o S_{105} por profundidad (0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm).

Figure 3. Apparent density in soil profile for the S_{Pris} , $S_{Regional}$, S_{35} and S_{105} situations. The (*) indicates a significant difference ($P < 0.05$) between S_{Pris} and $S_{Regional}$, S_{35} or S_{105} situations by depth (0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm).

Las reservas de PT del horizonte A disminuyeron un 29, 20 y 42% $S_{Regional}$, S_{35} y S_{105} , respectivamente, en relación a S_{Pris} . Por otra parte, las reservas de Pi disminuyeron 33, 20 y 58% $S_{Regional}$, S_{35} y S_{105} , respectivamente, en relación a S_{Pris} . Por su parte, a diferencia de las anteriores, las reservas de Po disminuyeron 20% en las tres situaciones en relación a S_{Pris} .

Tabla 1. Pérdida de las reservas de fósforo total (PT), orgánico (Po) e inorgánico (Pi) del horizonte A en tres situaciones de manejo agrícola (S_{Regional} , S_{35} y S_{105}) con respecto a la situación sin antecedentes de agricultura (S_{Pris}). El (*) indica diferencias estadísticamente significativas entre la situación S_{Pris} y la situación S_{Regional} , S_{35} o S_{105} para cada forma de P ($P < 0,05$).

Table 1. Loss of the total (PT), organic (Po) and inorganic (Pi) phosphorus reserves of the A horizon in three situations with agricultural management (S_{Regional} , S_{35} and S_{105}) with respect to the situation without history of agriculture (S_{Pris}). The (*) indicate significant differences between S_{Pris} and S_{Regional} , S_{35} or S_{105} for each P form ($P < 0,05$).

Formas de P	Unidad (2400 Mg suelo ha ⁻¹)	Situación	Pérdida (%)
		S_{Pris}	
PT		1247	
Po		514	
Pi		733	
		S_{Regional}	
PT		889*	29
Po		400*	22
Pi		489*	33
	Mg ha ⁻¹	S_{35}	
PT		993*	20
Po		408*	21
Pi		585*	20
		S_{105}	
PT		729*	42
Po		419*	19
Pi		310*	58

Concentraciones de Pe en el horizonte A

Las concentraciones medias de Pe a 0-20 cm de profundidad fueron de 110, 13,2, 26,3 y 8,3 mg kg⁻¹ para S_{Pris} , S_{Regional} , S_{35} y S_{105} , respectivamente (Figura 4). Esta forma de P fue la que más disminuyó con respecto a S_{Pris} : 88, 76 y 92% para S_{Regional} , S_{35} y S_{105} , respectivamente.

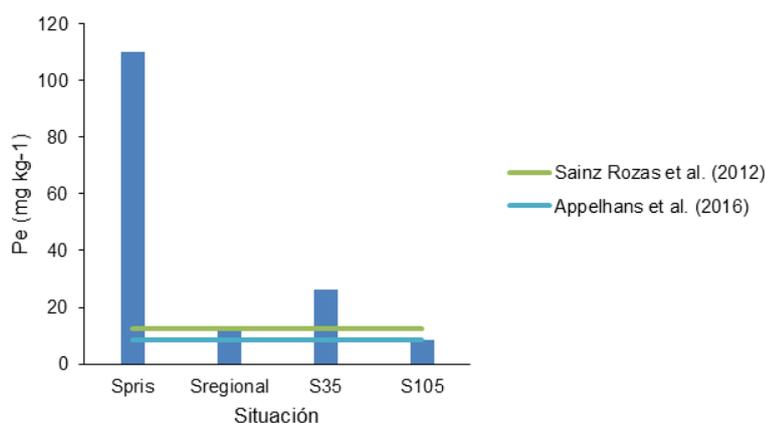


Figura 4. Concentración de fósforo extractable (Pe) a 0-20 cm de profundidad para las situaciones S_{Pris} , S_{Regional} , S_{35} y S_{105} . La línea verde indica valor medio (12,5 mg kg⁻¹) de la concentración de Pe reportado para la subregión pampa ondulada. La línea celeste indica la concentración crítica (8,5 mg kg⁻¹) en relación con el rendimiento relativo de soja (85%) calculado para este suelo.

Figure 4. Extractable phosphorus (Pe) concentrations for the 0-20 cm soil depth for S_{Pris} , S_{Regional} , S_{35} and S_{105} situations. The green line indicates the mean value (12,5 mg kg⁻¹) of Pe concentration reported for the rolling pampa subregion. The light blue line indicates the critical concentration (8,5 mg kg⁻¹) in relation with the soybean yield (85%) calculated for this soil.

DISCUSIÓN

Fósforo edáfico previo a la introducción de la agricultura

Los resultados observados en S_{Pris} confirmaron una elevada fertilidad natural de P proporcionada por el material originario con minerales fácilmente meteorizables (Moscatelli & Pazos, 2000). La concentración media de PT (498 mg kg^{-1}) determinada a 0-30 cm de profundidad en S_{Pris} fue similar a la informada por Morrás (1999) para suelos sin antecedentes de agricultura de la misma serie e igual profundidad (553 mg kg^{-1}). A pesar que los métodos utilizados para la determinación de PT fueron diferentes, al encontrar valores similares con respecto a muestras que fueron tomadas entre fines del siglo XIX y principios del XX a la misma profundidad, se infiere que el suelo considerado como pseudo prístino puede ser utilizado como una referencia de la situación previa a la agriculturización. Morrás (1999), también estableció que los valores medios de PT son crecientes hacia el noroeste de dicha subregión, atribuyendo dicha tendencia a diferencias geoquímicas de origen litológico orientadas de este a oeste, siguiendo el patrón de precipitaciones. Sin embargo, resulta dificultosa la comparación con otros estudios debido, entre otros factores, a la diferente profundidad en que se expresan los resultados en los mismos. Así, el PT resultó un 37% menor al valor reportado por Novello y Quintero (2009) a 0-10 cm de profundidad de un Argiudol típico serie Villa Eloisa bajo pradera continua (902 mg kg^{-1}) y, un 55% menor al valor reportado por Giuffré et al. (1998) a 0-20 cm de profundidad de un Argiudol típico serie Marcos Juárez considerado virgen (1170 mg kg^{-1}). No obstante, el elevado valor de PT encontrado (2250 mg kg^{-1}) por Vázquez et al. (1991) en el espesor 0-18 cm de un Argiudol típico serie Casilda bajo pastura permanente, se apartaría de dicho patrón.

En la mayoría de los suelos minerales, la fracción orgánica de P representa entre el 20 y 60% del PT del suelo (Tiessen et al., 1994). El porcentaje de P_o respecto del PT representa un 41% para el horizonte A (0-20 cm de profundidad) de S_{Pris} y coincide con el valor medio reportado por Álvarez et al. (2018) a 0-25 cm de profundidad en Molisoles de la Región Pampeana no cultivados. Sin embargo, dicho porcentaje fue mayor que el obtenido por Giuffré et al. (1998) (24%) y por Novello y Quintero (2009) (30%). Probablemente, esto se debió a las distintas metodologías utilizadas para medir PT (Leytem, 2009) ya que, en todos los trabajos mencionados, la medición de P_o se realizó por calcinación y, también, a las diferencias de profundidad del horizonte A entre las series de suelo analizadas.

Efecto del manejo sobre el PT, Pi y P_o

Más allá de los diferentes tipos de agricultura tenidos en cuenta en este trabajo, la disminución de la concentración de PT se acrecentó con el aumento del tiempo transcurrido desde la situación S_{Pris} . Evidentemente, los balances negativos se acrecentaron por la exportación de P por parte de los cultivos, las bajas dosis de fertilizante utilizadas y, la pérdida de P por lixiviación, la cual ocurre en períodos extremadamente húmedos (Andriulo et al., 2011). Si bien la pérdida de P por escurrimiento superficial en los sistemas de producción agrícola predominantes en la Pampa Ondulada es importante (Sasal et al., 2010), al considerarse la serie Pergamino pura en este trabajo, dicha pérdida es prácticamente nula. La misma tendencia se observó para el Pi (Figura 2b y d) en S_{Regional} y $S_{105'}$, demostrando que la agricultura afectó el nivel de Pi más que el de P_o , en coincidencia con lo reportado por Álvarez et al. (2018) para suelos de la pampa argentina. Los Argiudoles del norte de la provincia de Buenos Aires, al presentar minerales de relativamente fácil meteorización (Arens, 1969), son susceptibles de perder su alta dotación original de Pi. En la S_{35} ocurrió lo contrario (Figura 2c). El ciclo del P_o está íntimamente asociado a las transformaciones del COS (Tiessen, 1984). El P_o se relacionó positivamente con el COS ($r=0.95$, $P<0.01$). Milesi et al. (2013) determinaron que después de 33 años de la introducción de la agricultura en el sitio S_{35} , hubo una rápida pérdida de COS (25%) durante los primeros 10 años, seguido de un periodo de 23 años con pérdida más baja (15%). Además, en $S_{105'}$, la larga historia de agricultura continua convencional llevó a una pérdida acumulada de 55% de COS. La importancia de la mineralización de P_o para proveer una adecuada cantidad de Pi en suelos de clima templado está bien establecida (Stewart & Tiessen, 1987). En $S_{35'}$, la disminución de las fracciones orgánicas de reciclado relativamente más rápido provenientes de la pastura original y la existencia de fracciones de reciclado más lento habrían aportado a la fracción inorgánica de P en cantidades mayores a las exportadas por los cultivos, resultando en que no se observen diferencias de Pi. La disminución de las reservas de Pi mientras que las de P_o se mantienen constantes (Tabla 1), sugiere que en las situaciones S_{105} y S_{Regional} , el P_o ya se encontraría en formas menos accesibles y por ende con menor capacidad de aportar al Pi mediante mineralización.

Un aspecto que no puede ser soslayado es el efecto de la quema continua de los residuos sobre las propiedades del suelo y, específicamente, sobre el ciclado del P (Santín & Doerr, 2016). La continuidad de este proceso influye sobre la magnitud de dichos efectos (Rasmussen & Collins, 1991). La quema disminuye la

cantidad de MOS y altera el ciclo del P, transformándose las fracciones lábiles y moderadamente lábiles en formas estables (Yan et al., 2021). Una gran parte de P se pierde a la atmósfera por volatilización (Cotton & Wilkinson, 1988) y otra menor se incorpora al suelo con las cenizas en los meses que siguen al fuego y luego disminuye drásticamente (Oro Castro et al., 2012; Romanyà et al., 1994). Las situaciones S_{105} y S_{Regional} fueron afectadas por este proceso durante varias décadas, no así la situación S_{35} (Andriulo y Cordone, 1998; Milesi et al, 2013).

El sistema de labranza y las secuencias de cultivos son factores que también afectan el ciclo de P del suelo (Richter et al., 2007). Mientras S_{105} y S_{Regional} estuvieron bajo SD continua durante los últimos 25 años, S_{35} estuvo siempre bajo laboreo convencional. Con respecto a las secuencias de cultivo, las tres situaciones no registraron grandes cambios: S_{105} y S_{Regional} tienden al monocultivo de soja y S_{35} es monocultivo de soja. Más allá de aumentar las fracciones orgánicas e inorgánicas bajo SD cerca de la superficie del suelo, no hay grandes cambios entre sistemas de labranza a nivel del horizonte A (Giannini, 2019). Además, la situación S_{Regional} a diferencia de la S_{105} estuvo bajo manejo agrícola-ganadero hasta la década del 70. Durante la fase de ganadería, la exportación de P es menor que durante la fase agrícola (Milesi et al., 2018).

Los 105 años de agricultura continua (S_{105}), elevaron la proporción Po/PT con respecto al inicio (57 vs 41%). Álvarez et al. (2018), analizando en conjunto Argiudoles de diferentes subregiones de la región pampeana obtuvieron para la profundidad de 0-25 cm una disminución promedio del 10 y 27% para las formas Po y Pi, respectivamente, cuando compararon sitios cultivados y sitios sin antecedentes de agricultura. La disminución reportada en el presente trabajo para la serie Pergamino (20 y 37% para Po y Pi, respectivamente, en promedio de los sitios S_{Regional} , S_{35} y S_{105}) respecto a S_{Pris} , si bien fue mayor a la media, se encontró dentro del intervalo obtenido por Álvarez et al. (2018).

Cambios en el Pe bajo cada manejo

Los valores obtenidos para la situación S_{Pris} coinciden con suelos que en su condición prístina presentaban niveles elevados de Pe en el horizonte A (Giuffré et al., 1998; Michelena et al., 1989; Novello y Quintero, 2009). Para la situación S_{Regional} los sitios se encontraron en el centro del intervalo de valores típicos reportado para la subregión pampa ondulada, entre 10 y 15 mg kg⁻¹ (Sainz Rozas et al., 2012; Figura 4). Teniendo en cuenta la clasificación que hicieron dichos autores, bajo agricultura actual regional (S_{Regional}), los valores resultarían moderados (10-20 mg kg⁻¹), altos en la situación S_{35} (>20 mg kg⁻¹) y bajos (<10 mg kg⁻¹) bajo agricultura centenaria (S_{105}). La disminución de la concentración de Pi del horizonte A en las situaciones S_{Regional} y S_{105} respecto a S_{Pris} sugiere que la agricultura continua disminuye el P soluble y lábil del suelo (continuamente exportado por los cultivos), mientras que permanecen formas progresivamente menos lábiles (Negassa & Leinweber, 2009). De hecho, la disminución en el valor de Pe puede atribuirse a la pérdida de Pi ($r=0,92$, $P<0.01$). El valor medio de Pe de S_{105} (8,3 mg kg⁻¹), se ubicó ligeramente por debajo de la concentración crítica (8,5 mg kg⁻¹) en relación con el rendimiento relativo de soja (85%) calculado para estos suelos (Appelhans et al., 2016; Figura 4) y podría limitar la productividad de los cultivos.

Evidentemente, la mineralización de la MOS durante las primeras décadas posteriores a la introducción de la agricultura resultó en la liberación de formas lábiles de P que evitaron limitaciones en la nutrición fosforada de los cultivos. El mismo proceso se observó en las Grandes Planicies de América del Norte (Tiessen et al., 1994) aunque con menores tasas de mineralización debidas a temperaturas medias anuales más bajas que en nuestra región. Luego de ese período, los valores de Pe comenzaron a disminuir sin que significara una limitación para la productividad de los cultivos. Posteriormente, en años de posguerra, mientras en Norteamérica comenzó un plan sistemático de fertilización mineral que alimentó el Pi (Siebers et al., 2017), en la Pampa Ondulada se mantuvo un paradigma productivo sin fertilización con P, acelerando la degradación de las reservas moderadamente lábiles de Po y, luego, las de Pi. El aumento de la dosis de fertilizantes fosforados, si bien constituye una solución para elevar la productividad, hace que los sistemas productivos sigan siendo ineficientes respecto al uso del P del suelo. Es necesario que se realice un correcto diagnóstico de la fertilidad fosfatada y se utilicen dosis de P que mantengan la eficiencia alta sin producir balances negativos. Para limitar la dependencia de las reservas minerales de P, se debería fomentar el reciclado y la diversificación de fuentes, evitando su diseminación hacia los cuerpos de agua. En este contexto, es necesario investigar respecto a estrategias que optimicen la eficiencia del uso de P en los sistemas (e.g. bacterias solubilizadoras de P, cultivos de cobertura y abonos orgánicos).

CONCLUSIONES

La agricultura continua en las situaciones controladas permitió demostrar que el Po disminuye en las primeras décadas posteriores a la introducción de la agricultura, permaneciendo estabilizados en las décadas siguientes. Por lo tanto, las formas orgánicas de P remanentes en suelos con prolongada historia agrícola no contribuirían a la fertilidad fosforada al resultar inaccesibles para la descomposición química y biológica. Con el paso del tiempo, las reservas de PT siguen disminuyendo a partir de la reducción del Pi, corroborándose por la disminución abrupta de las concentraciones del Pe. Si bien las reservas de P asociadas con altos niveles de MOS y una constitución mineralógica del material originario con especies fácilmente meteorizables brindaron resiliencia a un sistema agrícola que tradicionalmente se caracterizó por balances de P edáfico negativos, actualmente, podría comprometerse la productividad de los agroecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

A Diego Colombini, Fabio Villalba y Fernando Rimatori por los trabajos a campo. A Leticia Garcia, Jimena Dalpiaz y Roman Dilello por los análisis de laboratorio. A Ana Clara Caprile por la asistencia en las figuras. A INTA por los fondos otorgados a través de la beca de formación INTA.

REFERENCIAS

- Álvarez, R., Steinbach, H.S. & De Paepe, J.L. (2016). Historical balance of nitrogen, phosphorus, and sulfur of the Argentine Pampas. *Ciencia del Suelo*, 34, 231–244.
- Álvarez, R., Gangi, D., Caffaro, M., Molina, C. & Berhongaray, G. (2018). Cultivation affected the level of inorganic phosphorus more than the organic pool of the Pampas soils in Argentina. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(7), 1022–1033.
- Andriulo, A. (1995). Modélisation de l'évolution des matières organiques des sols de la Pampa. *Relation avec les systèmes de culture*. Thèse INAPG, Paris.
- Andriulo, A. y Cordone, G. (1998). Impacto de las labranzas y rotaciones sobre la MO de los suelos de la región pampeana húmeda. En: *Siembra Directa*. Pp.65-96. Ed. Hemisferio Sur.
- Andriulo, A.E., Reynoso, L.R.M., Portela, S.I., Irizar, A.B., Restovich, S.B., Bortolato, M., Dalpiaz, M.J., Garcia, L.S., Torti, M.J., Darder, M.L., Hanuch, L., Colombini, D.A., Villalba, F.L., Roldan, A. y Rimatori, F.M. (2011). *Guía de buenas prácticas para el manejo de nutrientes (N y P) en la Pampa Ondulada: desarrollo de índices de riesgo de contaminación por N y P. Informe técnico*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Repositorio Institucional Biblioteca Digital.
- Appelans, S.C., Melchiori, R.J., Barbagelata, P.A. & Novelli, L.E. (2016). Assessing Organic Phosphorus Contributions for Predicting Soybean Response to Fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 80(6), 1688–1697.
- Arens, P. (1969). *Algunos paisajes geoquímicos de la región pampeana*. Actas V Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, Santa Fe.
- Bray, R.H. & Kurtz, L.T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Burke, W., Gabriela, D. & Bruma, J. (eds.). (1986). *Soil structure assessment*. Rotterdam, A.A. Balkema.
- Cabrini, S.M. y Calcaterra, C.P. (2009). *Sistemas de producción en el partido de Pergamino. Valoración económica del impacto sobre la capacidad productiva de los suelos*. Ediciones EEA INTA Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Correndo, A. (2018). *Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con N y P en maíz y soja en región pampeana*. [Tesis de Maestría en producción vegetal] Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Cotton F.A. & Wilkinson G. (1988). *Advanced Inorganic Chemistry*. 5th Edition. John Wiley, New York.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2013). Grupo InfoStat, Facultad Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Ferraris, G., Ferrari, M. y Ostojic, J. (2001). Fertilización fosforada en Soja: fitotoxicidad en aplicaciones localizadas a la siembra y efectos sobre el rendimiento. *Revista de Tecnología Agropecuaria*, VI(18), 20-23.
- Galantini, J.A. (2005). Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Marbán, L y Ratto, S (Eds.) *Manual "Tecnología en Análisis de Suelos: Alcances a laboratorios agropecuarios"* de (Capítulo IV, parte 2, pp. 95-106). AACs.
- García, F.O., Picone, L.I. y Berardo, A. (2006). Fósforo. Pág. 99-121. En: Echeverría H.E. y García F.O. (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- García, F.O., Picone, L.I. y Ciampitti, I.A. (2015). Fósforo. Pp. 229-264. En: Echeverría H.E y F.O. García (Eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- García, F. O. y Correndo, A. A. (2016). *Cálculo de Requerimientos Nutricionales. Planilla de cálculo para estimar la absorción y extracción de nutrientes*. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
- Giannini, A.P. (2019). *Evolución de la especiación de fósforo de mediano y largo plazo en Argiudoles de la subregión Pampa Ondulada*. [Tesis

- de maestría en producción vegetal] Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Giuffrè L., Heredia, O., Pascale, C. y Carbajales, M.M. (1998). Formas de fósforo del suelo y su relación con las rotaciones y labranzas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 17, 281-287.
- Gosling, P. & Shepherd, M. (2005). Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 105, 425-432
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghersa, C.M. & Culot, J.P. (1992). Field-crop systems of the Pampas. In: Pearson, C.P. (Ed) *Ecosystems of the world: field crop ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Hedley, M.J., J.W.B. Stewart, & B.S. Chahuan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 970-976.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (1972). *Carta de suelo de la República Argentina*
- Leytem, A. (2009). Total Phosphorus in Soil. In: Kovar, J. L. & Pierzynski, G.M. *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residues, and Waters* (2nd Edition). Southern Cooperative Series Bulletin
- MacDonald, G.K., Bennett, E.M., Potter, P.A. & Ramankutty, N. (2011). Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 3086-3091.
- Michelena, R.O., Iruñia, C.B., Vavruska, F.A., Mon, R. y Pittaluga, A. (1989). Degradación de suelos en el norte de la región pampeana. *Publicación Técnica 6: Proyecto de Agricultura Conservacionista*. INTA, Pergamino, Argentina.
- Milesi Delaye, L.A., Irizar, A.B., Andriulo, A.E & Bruno, B. (2013). Effect of Continuous Agriculture of Grassland Soils of the Argentine Rolling Pampa on Soil Organic Carbon and Nitrogen. *Applied and environmental soil science* 2013, 1-17
- Milesi Delaye, L.A., Caprile, A.C., Torti, M.J. & Andriulo, A.E. (2018). *Is agricultural production of the upper basin of Pergamino stream responsible for soils and water degradation?* Global Symposium on Soil Pollution. FAO. Roma. Italia.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MAGYP). *Sistema Integrado de Información Agropecuaria* (SIIA).
- Morras, H. (1999). Geochemical differentiation of Quaternary sediments from the Pampean region based on soil phosphorus contents as detected in the early 20th century. *Quaternary International*, 62, 57-67.
- Moscatelli, G. & Pazos, M.S. (2000). Soils of Argentina: Nature and Use. En: I. Kheoruenromne & S. Theerawong (Eds.) 2000. *Proceedings of International Symposium on Soil Science: Accomplishments and Changing Paradigm towards the 21st Century* (81-92).
- Negassa, W. & Leinweber, P. (2009). How does Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 305-325.
- Novello, O.A. y Quintero, C.E. (2009). Contenidos de fósforo total en suelos del distrito Villa Eloisa (Santa Fe). *Informaciones Agronómicas*, 41, 11-15.
- Oro Castro, N.P., Diodato, S.L., Mansilla, P.M., Selzer, L.J. y Paredes, N.I. (2012) S.O.S Incendios forestales: Una problemática creciente en Tierra del Fuego. *Centro Austral de Investigaciones Científicas*, La Lupa.
- Rasmussen, P.E. & Collins, H.P. (1991). Long-term impacts of tillage, fertilization and crop residues on soil organic matter in temperate semi-arid regions. *Adv. Agron.* 45, 93-134.
- Richter, D. de B., Hofmockel, M., Callahan, M.A., Powlson, D.S. & Smith, P. (2007). Long-Term Soil Experiments: Keys to Managing Earth's Rapidly Changing Ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 266-279.
- Romanyà, J., Khanna, P.K. & Raison, R.J. (1994). Effects of Slash Burning on Soil Phosphorus Fractions and Sorption and Desorption of Phosphorus. *Forest Ecology and Management*, 65(2-3), 89-103.
- Saunders, W.M.H. & Williams, E.G. (1955). Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.*, 6, 254-267.
- Sainz Rozas, H., Echeverría H. y Angelini, H. (2012). Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana Argentina. *RIA*, 38, 33-39.
- Santín C. & Doerr, S.H. (2016). Fire effects on soils: the human dimension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 371:20150171.
- Sasal, M. C., Castiglioni, M. G., & Wilson, M. G. (2010). Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 108(1-2), 24-29.
- Siebers, N., Sumann, M., Kaiser, K. & Amelung, W. (2017). Climatic effects on phosphorus fractions of native and cultivated North American grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 81(2), 299-309.
- Sommers, L. & Nelson, D. (1972). Determination of total phosphorus in soils: A rapid perchloric acid digestion procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 36, 902-904.
- Stewart, J.W.B. & Tiessen, H. (1987). Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, 4, 41-60.
- Suñer, L.G., Galantini, J.A. y Rosell, R.A. (2000). *Formas de fósforo en Molisoles de la provincia de Buenos Aires y su relación con otros parámetros edáficos*. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, 11-14 de Abril de 2000.

- Tiessen, H., Stewart, J.W.B. & Cole, C.V. (1984). Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of American Journal*, 48, 853-858.
- Tiessen, H., Stewart, J.W.B. & Oberson, A. (1994). Innovative soil phosphorus availability indices: Assessing organic phosphorus. In: J.L. Havlin and J.S. Jacobsen (Eds.), *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA, Madison, WI.
- Vázquez, M., Noellemeyer, E. & Coremberg, P. (1991). The dynamics of different organic and inorganic phosphorus fractions in soils from the south of Santa Fe province, Argentine. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 22(11 & 12), 1151 – 1163.
- Vázquez, M.E. (2002). Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones Agronómicas*, 16, 3-7.
- Yan, Z., Collins, H., Machado, S. & Long, D. (2021). Residue management changes soil phosphorus availability in a long-term wheat-fallow rotation in the Pacific Northwest. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 120, 69–81.