



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

EFFECTO ACUMULADO DE LA FERTILIZACIÓN FOSFORADA SOBRE DISTINTAS FRACCIONES DE FÓSFORO EN EL SUELO

“Trabajo final de graduación presentado para obtener el título de Ingeniero Agrónomo”

Autores: Aliaga, Neri; Gutiérrez, Nicolás

Directora: Dra. Alvarez, María Lucila
Cátedra de Edafología y Manejo de suelos

Co-directora: Dra. Noellemeyer, Elke
Cátedra de Edafología y Manejo de suelos

Evaluadores:

Mg. Dillchneider, Alexandra
Cátedra de Cereales y Oleaginosas

Dra. Gaggioli, Carolina
Cátedra de Cereales y Oleaginosas

FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Santa Rosa (La Pampa)- Argentina 2022

ÍNDICE

Resumen	3
Abstract	3
Introducción	4
Hipótesis.....	6
Objetivos	6
Materiales y Métodos	7
Resultados	8
Discusión.....	12
Conclusiones	13
Bibliografía.....	14

RESUMEN

El P aportado a través de fertilizantes puede quedar acumulado en el suelo, hallándose bajas eficiencias de uso y poca respuesta en rendimiento. Las formas lábiles con el tiempo pueden volverse más estables, quedando poco disponibles para el cultivo. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto acumulado de cinco años de fertilización fosforada a distintas dosis sobre fracciones lábiles y no lábiles de P, el contenido de carbono orgánico del suelo y el rendimiento de un cultivo. El ensayo se llevó a cabo en un campo cercano a Eduardo Castex, realizándose tres tratamientos con distintas dosis de P como fosfato monoamónico (MAP): Testigo (P0), 60 kg ha⁻¹ de MAP (P60) y 120 kg ha⁻¹ de MAP (P120), en un diseño en franjas con dos repeticiones. En los tratamientos fertilizados se observaron incrementos en el rendimiento de trigo, en carbono orgánico y en el fósforo extractable por Bray Kurtz N°1. Las tres fracciones de fósforo se incrementaron con la dosis de P, aumentando en mayor proporción las formas lábiles respecto a P-Ca. El efecto acumulado de la fertilización mejoró la disponibilidad de fósforo y las condiciones que favorecen la misma a través del incremento en el carbono orgánico, lo cual contribuiría a mejorar la condición física del suelo.

Palabras clave: Carbono orgánico, Trigo (*Triticum aestivum* L.), Región semiárida

ABSTRACT

The P supplied through fertilizers can be accumulated in the soil, resulting in low efficiencies and low response in yield. Labile forms can become more stable over time, leaving little available for cultivation. The objective of the work was to evaluate the accumulated effect of five years of phosphorous fertilization at different doses on labile and non-labile fractions of P, the organic

carbon content of the soil and the yield of a crop. The trial was carried out in a field near Eduardo Castex, carrying out three treatments with different rates of P as monoammonium phosphate (MAP): Control (P0), 60 kg ha⁻¹ of MAP (P60) and 120 kg ha⁻¹ of MAP (P120), in a striped design with two repeats. In the fertilized treatments, increases were observed in wheat yield, in organic carbon and in extractable phosphorus by Bray Kurtz N°1. The three fractions of phosphorus increased with the dose of P, increasing in greater proportion the labile forms with respect to P-Ca. The accumulated effect of fertilization improved the availability of phosphorus and the conditions that favour it through the increase in organic carbon, which would contribute to improving the physical condition of the soil.

Key words: Organic Carbon; Wheat (*Triticum aestivum* L.); Semiarid region

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para los cultivos y limitante del rendimiento de estos. La agricultura moderna es altamente dependiente de entradas al sistema de fertilizante fosforado como insumo, para reponer el fósforo perdido del suelo por la cosecha de cultivos y mantener altos rendimientos. En los últimos años se ha dado una disminución en los niveles de P disponible (Sainz Rozas et al., 2019) debido a la intensificación agrícola, el aumento de rendimientos y en muchos casos el bajo nivel de reposición mediante fertilización (Slazak et al., 2014). Existe la necesidad de mantener y mejorar el status de P en muchos suelos, particularmente en países en vías de desarrollo (Johnston et al., 2014). Por otro lado, los fertilizantes fosforados derivan principalmente de la roca fosfórica, la cual constituye un recurso finito y no renovable. Se proyecta un incremento en la demanda de P (Cordell et al., 2011), disminuyendo la calidad de la roca fosfórica remanente y un incremento del precio de los

fertilizantes (Heckenmüller et al., 2014). El 90% de la demanda global de P es para la producción de alimentos, lo cual actualmente significa alrededor de 148 millones de toneladas de roca fosfórica por año (Smil, 2002). Con un aumento en la población global que ya excede los 6000 millones de habitantes, con proyecciones que hablan de más de 9000 millones hasta el año 2050 (United Nations, 2008), es fundamental realizar un manejo adecuado del fósforo (P) para aumentar la productividad de los cultivos y la eficiencia en el uso del resto de los insumos.

El P es absorbido por las plantas en las formas iónicas H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} y la solución del suelo sólo contiene una pequeña cantidad que puede estar disponible en cualquier momento. Los procesos generales de transformación de P son: meteorización y precipitación, mineralización e inmovilización, y adsorción y desorción. La meteorización, la mineralización y la desorción aumentan la disponibilidad para la planta, mientras que la inmovilización, la precipitación y la adsorción disminuyen su disponibilidad. La mineralización e inmovilización son procesos importantes del ciclo del P en los suelos con alto contenido de materia orgánica, y el P orgánico puede ser una fuente importante para la nutrición vegetal. Los compuestos solubles del P presentan reactividad muy alta, solubilidad baja y movilidad reducida. La máxima disponibilidad de P ocurre a un pH del suelo entre 6,5 y 7,0. Especialmente en suelos ácidos, calcáreos y alcalinos la disponibilidad de P es limitante (Daroub et al., 2003).

La fertilidad fosforada y la disponibilidad de P para las plantas puede verse reflejada en respuestas en la calidad y el rendimiento del cultivo, mejorando la absorción de otros nutrientes, y contribuyendo a la tolerancia a sequía (Rubio et al., 2012; Suñer y Galantini, 2012). Sin embargo, los resultados de varios estudios indicarían que parte de los aportes de P-fertilizante se han acumulado en los suelos (Renneson et al., 2015; Wang et al., 2015), sugiriendo una baja

eficiencia en el uso de este fertilizante y poca respuesta en términos de rendimiento por parte de los cultivos (Roberts y Johnston, 2015). Además, con el tiempo, incluso las formas más lábiles de P maduran a formas menos disponibles, especialmente en suelos que contienen altas proporciones de Ca (Jalali y Ranjbar, 2010), como pueden ser los suelos de la subregión de Planicie con tosca de la Región semiárida central. La disponibilidad de P para las plantas depende de las cantidades de las diferentes formas de este en el suelo. La distribución de P en sus distintas fracciones está relacionada con otras propiedades químicas y con su desarrollo pedogenético (Cross y Schlesinger, 2001). El manejo del suelo y la fuente de fertilización utilizada inciden sobre la partición del P en sus distintas fracciones (Zamuner et al., 2012), y afectan su disponibilidad. El fraccionamiento secuencial de Hedley diferencia fracciones de P de acuerdo a su solubilidad en diferentes extractantes, es decir que estas fracciones se encuentran definidas operacionalmente. Sin embargo este método constituye una herramienta útil para investigar la dinámica del P en agroecosistemas (Negassa y Leinweber, 2009; Yang y Post, 2011).

HIPÓTESIS

La fertilización fosforada a altas dosis a lo largo de los años produce incrementos principalmente en la fracción de P ligada a Ca.

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto acumulado de seis años de fertilización fosforada a distintas dosis sobre fracciones lábiles y no lábiles de P, el contenido de carbono orgánico del suelo y el rendimiento de un cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a delante en un campo ubicado en cercanías a E. Castex, Provincia de La Pampa (36°02'22.0'' S; 64°11'09.9'' O) en un ensayo de fertilización fosforada con cinco años de efecto acumulado. En el mismo se realizaron tres tratamientos donde se aplicaron dosis de P como fosfato monoamónico (MAP) de 0 kg ha⁻¹ (P0), 60 kg ha⁻¹ de MAP (P60) y 120 kg ha⁻¹ de MAP (P120), con un diseño en franjas con dos repeticiones. La rotación de cultivos agrícolas fue maíz- soja- maíz- trigo- trigo, aplicando los tratamientos mencionados en cada campaña de siembra. En cada franja se tomaron muestras compuestas por cinco sub- muestras de 0 a 10 cm de suelo previo a la siembra de trigo (campaña 2020), Se determinó el contenido de carbono orgánico (CO) mediante la técnica de Walkley and Black, textura por el método del hidrómetro de Bouyoucos, se midió potenciométricamente el pH en una relación suelo: agua de 1:2,5 y P extractable mediante el método de Bray- Kurtz N°1. Por medio del método secuencial de Hedley se determinaron las siguientes fracciones de P: P en solución (P solución), por agitación con membrana de intercambio aniónico durante 18 hs; P consistente con formas lábiles (P lábil) mediante agitación por 18 hs con una solución de NaHCO₃ 0,5 M (pH: 8,5); y P consistente con formas ligadas a Ca (P- Ca) mediante agitación por 18 hs con una solución de HCl 1M (Tiessen y Moir, 2006). Posteriormente se determinó la concentración de P de los extractos por la colorimetría de Murphey y Riley y lectura en espectrofotómetro. Se determinó el rendimiento en grano del cultivo de trigo, el peso de mil granos y el número de granos por hectárea. Se calculó la EUA (eficiencia en el uso del agua) mediante la siguiente fórmula: $EUA = \text{kg grano ha}^{-1} / \Delta H + PP$, donde ΔH es la diferencia entre humedad edáfica inicial y final y PP son las precipitaciones caídas durante el periodo del cultivo.

Se utilizó el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2013), y se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) con la prueba de Tukey, análisis de correlación mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Se utilizó el modelo lineal- plateau para relacionar el rendimiento con el P extractable por Bray- Kurtz N°1 y con las distintas fracciones de P.

RESULTADOS

El suelo presentó una textura franco-arenosa con un contenido medio de 755 g kg⁻¹ de arena, 142 g kg⁻¹ de limo y 103 g kg⁻¹ de arcillas y el pH no presentó diferencias significativas entre tratamientos, con una media de 6,9. Se observó un mayor contenido de CO en los tratamientos fertilizados, los cuales presentaron 17,0 g kg⁻¹ (P120) y 17,5 g kg⁻¹ (P60), mientras que en P0 el contenido de carbono orgánico fue de 15,0 g kg⁻¹ (p<0,10).

Los valores de P extraído mediante el método de Bray- Kurtz N°1 se incrementaron significativamente (p<0,05) con la dosis de fertilizante. El tratamiento P0 presentó un contenido de 6,4 mg kg⁻¹, 17,1 mg kg⁻¹ con la dosis de P60 y 68,4 mg kg⁻¹ con la dosis de P120 (Figura 1). Con el incremento en la dosis de fertilizante se observó un aumento en las tres fracciones de P analizadas (Figura 1). El fósforo en solución en P0 fue de 3,13 mg kg⁻¹, 8,86 mg kg⁻¹ para el tratamiento P60 y 24,74 mg/kg⁻¹ en el tratamiento P120. En cuanto al P lábil la media fue de 5,79 mg kg⁻¹ para P0, de 13,94 mg kg⁻¹ en el tratamiento P60 y de 25,96 mg kg⁻¹ para P120. Para el P-Ca se observó que la media en P0 fue de 186,75 mg kg⁻¹, para una dosis de 60 kg la media fue de 207,92 mg kg⁻¹ y de 247,42 mg kg⁻¹ para el tratamiento de 120 kg de fosfato mono amónico. Si bien con el incremento en la dosis de P todas las fracciones aumentaron, también se observó un incremento en la relación entre las fracciones de mayor disponibilidad y el P- Ca (P solución+ P lábil: P-Ca). En el tratamiento P0 esta relación fue de 4,8 aumentando significativamente

($p < 0,05$) a 11,0 y 20,5 en P60 y P120, respectivamente, indicando que las formas disponibles se incrementaron en mayor proporción que formas menos disponibles (P- Ca).

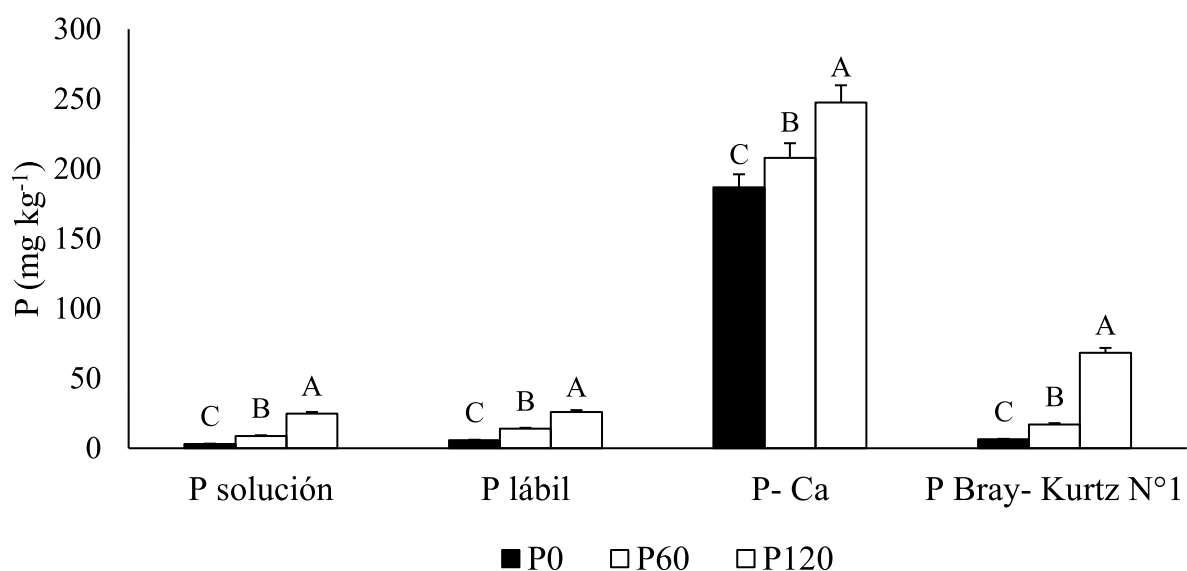


Figura 1. Contenido en mg kg^{-1} de P en solución, P lábil, P- Ca y P Bray- Kurtz N°1 en los tratamientos sin agregado de fertilizante (P0), con 60 kg ha^{-1} (P60) y con 120 kg ha^{-1} (P120). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

El rendimiento en grano de trigo presentó una respuesta significativa ($p < 0,05$) a la fertilización de 1472 kg ha^{-1} (124% de incremento) en el tratamiento P60 y de 1730 kg ha^{-1} (145 % de incremento) en P120, respecto a P0, sin embargo, las diferencias no fueron significativas entre los tratamientos fertilizados. El número de granos siguió la misma tendencia, mientras que para el peso de mil granos sólo se diferenció P120 de P0. Durante el periodo del cultivo se registró un total de precipitaciones de 150 mm, y una humedad inicial de 180 mm y final de 20 mm, a partir

de estos valores se determinó el uso consuntivo del agua y la eficiencia en el uso del agua (EUA), hallándose mayores EUA en los tratamientos fertilizados respecto a P0, nuevamente sin encontrarse diferencias significativas entre estos (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimiento en grano de trigo (kg ha^{-1}), número de granos por m^2 , peso de mil granos (g) y eficiencia en el uso de agua (EUA) en los tratamientos sin agregado de P (P0), con 60 kg ha^{-1} (P60) y con 120 kg ha^{-1} (P120).

Tratamiento	Rendimiento (kg ha^{-1})	Nº granos m^{-2}	Peso mil granos (g)	EUA ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
P0	1190 B	3370 B	35,4 B	3,8 B
P60	2662 A	7212 A	36,9 AB	8,6 A
P120	2920 A	7721 A	37,8 A	9,4 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Las fracciones de P presentaron altos valores de correlación entre sí y con P Bray- Kurtz N°1, el cual se asoció principalmente con la fracción de P solución ($r=0,99$). Por otro lado, el rinde estuvo correlacionado con todas estas variables y, si bien en menor medida, también con el contenido de CO (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre Carbono orgánico (CO), P solución, P lábil, P- Ca, P Bray- Kurtz N°1 y Rinde.

Coef/Prob	CO	P solución	P lábil	P- Ca	P Bray- Kurtz N°1	Rinde
CO	1					
P solución	Ns	1				
P lábil	Ns	0,91 **	1			
P- Ca	Ns	0,94 **	0,95 **	1		
P Bray- Kurtz N°1	Ns	0,99 **	0,89 **	0,92 **	1	
Rinde	0,66 *	0,78 *	0,80 **	0,79 *	0,72 *	1

* $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; ns= no significativo

Se ajustó un modelo lineal- plateau para los rendimientos relativos y las concentraciones de P determinadas por el método Bray- Kurtz N°1 y las fracciones que representan formas de mayor

disponibilidad como el P solución y el P lábil (Figura 2). En los tres casos se hallaron buenos ajustes con este modelo obteniéndose valores de R^2 altos, sobre todo con el P solución, indicando que estos tres parámetros que se encuentran altamente correlacionados entre sí, pueden explicar la variabilidad en el rendimiento.

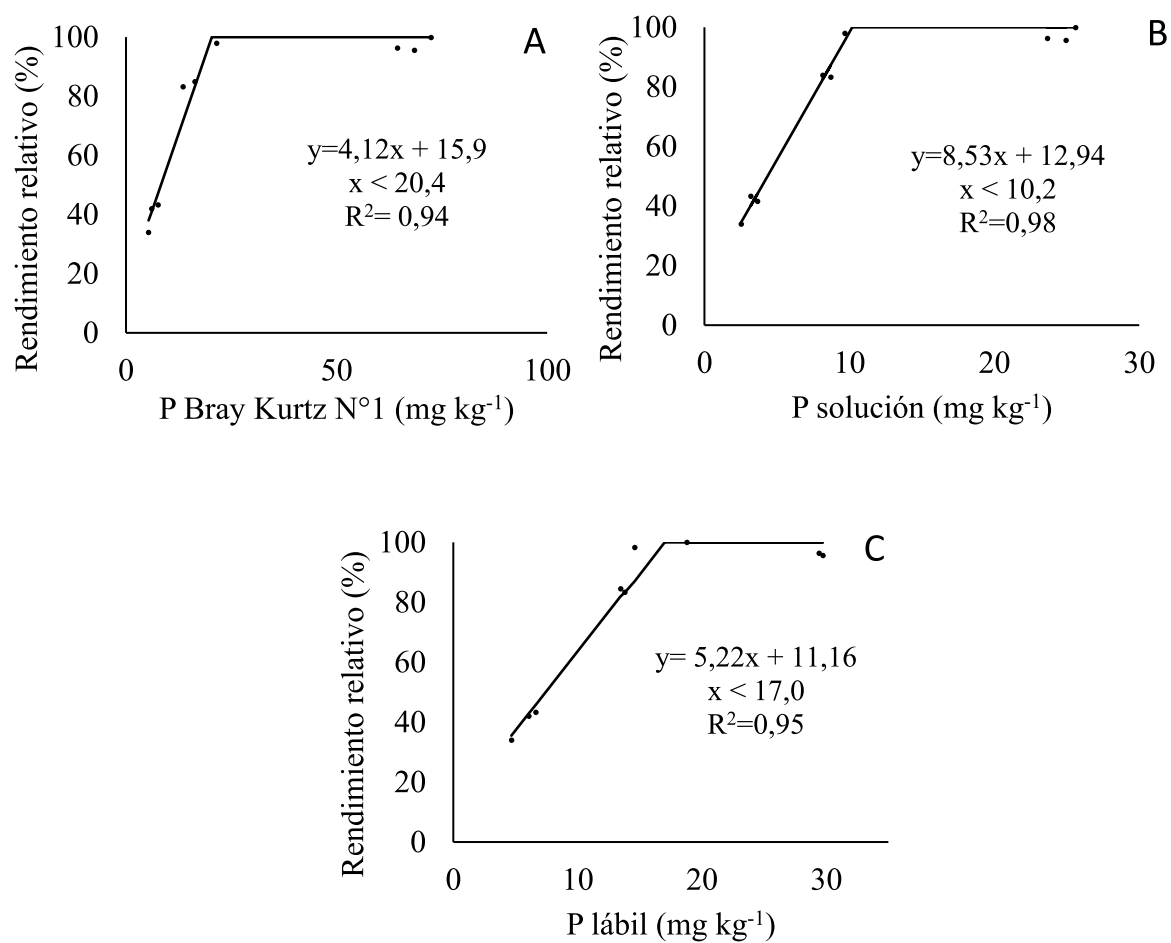


Figura 2. Modelo lineal- plateau para el rendimiento relativo en función de la concentración de P Bray Kurtz N°1 (A), P solución (B) y P lábil (C).

DISCUSIÓN

En estudios previos correspondientes a suelos de la región se ha encontrado que la fracción P-Ca es la dominante, con valores en un rango entre 120 mg kg^{-1} y 230 mg kg^{-1} en los primeros 20 cm de suelo bajo agricultura (Alvarez, 2021), similar a lo encontrado en este trabajo. El aporte de P-fertilizante produjo un incremento en las formas de P menos disponibles como P- Ca, sin embargo, este fue acompañado de incrementos proporcionalmente mayores en la disponibilidad de P, como quedó evidenciado al analizar la relación entre las formas lábiles y el P- Ca. Este incremento se considera como tal, tomando como referencia los valores observados en el testigo sin aplicación de fertilizante. Sin embargo, en el testigo se ha dado además una disminución del nivel de P en el suelo ya que los cultivos han extraído nutrientes que no han sido repuestos al suelo. Otros autores también han observado incrementos en todas las fracciones de P y en general una mejora en la fertilidad fosforada en ensayos de larga duración, sobre todo en los estratos superficiales (Milić et al., 2019), hallando además que en aplicaciones conjuntas de fertilizante mineral con materia orgánica, la proporción de P-Ca acumulado en el suelo disminuye. Esto refleja la importancia de la materia orgánica en la dinámica del P y en la solubilidad de los compuestos más estables, lo cual coincide con varios estudios donde se confirma el efecto positivo de los ácidos orgánicos sobre la solubilidad y disponibilidad de P (Mihoub et al., 2017; Moradi et al., 2014; Taghipour y Jalali, 2012; von Wandruszka, 2006; Wang et al., 2015; Yang et al., 2019). En este trabajo se halló un aumento en el contenido de CO en los tratamientos fertilizados, lo cual contribuiría a mejorar la relación entre las formas disponibles y el P-Ca y de esta manera la disponibilidad de P para las plantas. Por otro lado, este incremento en CO viene dado por el mayor aporte de biomasa tanto aérea como radicular al suelo, producto de la mejora en la producción debido a la fertilización, lo cual se vio reflejado en los rendimientos en trigo. A

su vez la materia orgánica juega un rol esencial en la fertilidad física del suelo, si bien en este trabajo no ha sido estudiada, probablemente contribuya a un mejor funcionamiento del sistema.

Sucunza et al. (2018) observaron que después de 14 años de fertilización fosforada con balance positivo (tasa promedio anual de 37 kg ha⁻¹ de P) los niveles de P de los suelos excedían el valor crítico, el cual situaron en 19 mg kg⁻¹ de P Bray- Kurtz N° 1 para el cultivo de trigo. En el presente trabajo, con dosis más altas de P y menor tiempo de efecto acumulado se observó algo similar, incluso el rendimiento máximo se alcanzó con un nivel de P similar al hallado por estos autores (20,4 mg kg⁻¹ de P Bray- Kurtz N° 1). Esto explica la respuesta en rendimiento en los tratamientos fertilizados respecto al testigo, y no entre las dos dosis de P- fertilizante, ya que en ambas se excede el nivel crítico de P y el rendimiento queda limitado por otros factores que no fueron estudiados en este trabajo. La mejora en la eficiencia en el uso del agua en los tratamientos fertilizados también remarca la importancia de realizar un manejo correcto y sustentable de la fertilidad, sobre todo en regiones semiáridas.

CONCLUSIONES

Si bien en la hipótesis originalmente se había planteado principalmente un incremento del P-Ca a lo largo de los años con altas dosis de P, en este trabajo se encontró que las formas más lábiles se incrementaron en mayor proporción. Mejorar la fertilidad fosforada del suelo traería beneficios no solamente en el rendimiento de los cultivos, sino también en el incremento de carbono orgánico, lo cual favorece además las condiciones para que el P aportado se encuentre disponible para las plantas, aumentando su eficiencia de uso. El aumento en carbono orgánico podría traer beneficios en cuanto a las condiciones físicas del suelo, así como también en la fertilidad biológica y química, logrando una mejora integral en la fertilidad del suelo. Es decir que, la

fertilización fosforada debería verse como una inversión a mediano y largo plazo y no sólo para una campaña.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, M.L., 2021. Caracterización de las formas de fósforo y de los procesos que afectan su disponibilidad en suelos de diferentes geoformas en la región semiárida central. Tesis Doctoral en Agronomía. Universidad Nacional del Sur.
- Cordell, D., Rosemarin, A., Schröder, J.J., Smit, A.L., 2011. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84, 747–758. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.032>
- Cross, A.F., Schlesinger, W.H., 2001. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry* 52, 155–172. <https://doi.org/10.1023/A:1006437504494>
- Daroub, S.H., Gerakis, A., Ritchie, J.T., Friesen, D.K., Ryan, J., 2003. Development of a soil-plant phosphorus simulation model for calcareous and weathered tropical soils. *Agric. Syst.* 76, 1157–1181. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00082-3)
- Heckenmüller, M., Narita, D., Klepper, G., 2014. Global Availability of Phosphorus and Its Implications for Global Food Supply: An Economic Overview. Kiel Work. Pap. 26.
- Jalali, M., Ranjbar, F., 2010. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma* 155, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.030>

- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Phosphorus. Its Efficient Use in Agriculture., 1st ed, Advances in Agronomy. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00005-4>
- Mihoub, A., Daddi Bouhoun, M., Naeem, A., Saker, M.L., 2017. Low-molecular weight organic acids improve plant availability of phosphorus in different textured calcareous soils. *Arch. Agron. Soil Sci.* 63, 1023–1034. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1249477>
- Milić, S., Ninkov, J., Zeremski, T., Latković, D., Šeremešić, S., Radovanović, V., Žarković, B., 2019. Soil fertility and phosphorus fractions in a calcareous chernozem after a long-term field experiment. *Geoderma* 339, 9–19. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.12.017>
- Moradi, N., Hassan, M., Sadaghiani, R., Sepehr, E., 2014. Effects of low-molecular-weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils Effects of low-molecular-weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils. *Turk J Agric.* <https://doi.org/10.3906/tar-1106-38>
- Negassa, W., Leinweber, P., 2009. How does the hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 305–325. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800223>
- Renneson, M., Vandenberghe, C., Dufey, J., Marcoen, J.M., Bock, L., Colinet, G., 2015. Degree of phosphorus saturation in agricultural loamy soils with a near-neutral pH. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 33–41. <https://doi.org/10.1111/ejss.12207>
- Roberts, T.L., Johnston, A.E., 2015. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.013>

- Rubio, G., Faggioli, V., Scheiner, J.D., Gutiérrez-Boem, F.H., 2012. Rhizosphere phosphorus depletion by three crops differing in their phosphorus critical levels. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 810–871. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200307>
- Sainz Rozas, H., Echeverria, H., Angelini, H., 2019. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. *Ria* 38, 33–39.
- Slazak, a, Freese, D., Matos, E.S., Nii-Annang, S., Hüttl, R.F., 2014. Phosphorus pools in soil after land conversion from silvopasture to arable and grassland use. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 159–167. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200334>
- Smil, V., 2002. Phosphorus : Global Transfers. *Causes Consequences Glob. Environ. Chang.* 3, 536–542.
- Sucunza, F.A., Gutierrez Boem, F.H., Garcia, F.O., Boxler, M., Rubio, G., 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Eur. J. Agron.* 96, 87–95. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2018.03.004>
- Suñer, L.G., Galantini, J.A., 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la Región Sudoeste pampeana. *Cienc. del suelo, Arg.* 30, 57–66.
- Taghipour, M., Jalali, M., 2012. Effect of low-molecular-weight organic acids on kinetics release and fractionation of phosphorus in some calcareous soils of western Iran. *Environ. Monit. Assess.* 185. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2960-y>
- Tiessen, H., Moir, J., 2006. Chapter 25 Characterization of Available P by Sequential Extraction, in: Carter, M., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.

- von Wandruszka, R., 2006. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochem. Trans.* 7, 1–8. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-7-6>
- Wang, Y., Chen, X., Whalen, J.K., Cao, Y., Quan, Z., Lu, C., Shi, Y., 2015. Kinetics of inorganic and organic phosphorus release influenced by low molecular weight organic acids in calcareous, neutral and acidic soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178, 555–566. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500047>
- Yang, X., Post, W.M., 2011. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences* 8, 2907–2916. <https://doi.org/10.5194/bg-8-2907-2011>
- Yang, Xiaoyan, Chen, X., Yang, Xitian, 2019. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil Tillage Res.* 187, 85–91. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.11.016>
- Zamuner, E., Picone, L., Diez, a, 2012. Effect of long-term phosphorus fertilization on soil phosphorus fractions. *Span. J. Soil Sci.* 2, 50–61. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2012.V2.N2.03>