

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final presentado para optar al
Grado de Ingeniero Agrónomo

CONTENIDO Y RETENCIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS
DEL DEPARTAMENTO RÍO CUARTO CÓRDOBA

Alumno: Dal Lago, Stefania

DNI: 37166135

Director: Ing. Agr. Marcos Bongiovanni

Co-Directora: Ing. Agr. Rosana Marzari

Río Cuarto – Córdoba

Abril / 2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: Contenido y retención de fósforo
en suelos del departamento Río Cuarto Córdoba.

Autor: Dal Lago Stefania
DNI: 37166135

Director: Ing. Agr. Marcos Bongiovanni
Co-Directora: Ing. Agr. Rosana Marzari

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la
Comisión Evaluadora:

Soledad Cabrera _____

Eduardo Gatica _____

Marcos Bongiovanni _____

Fecha de Presentación: ____ / _____ / _____.

Secretario Académico

DEDICATORIA

- A mis padres Sergio y Sonia, por ser el pilar fundamental de mi vida, por apoyarme durante toda la carrera, darme la posibilidad de estudiar y por sus consejos, sus valores y la motivación constante.
- A toda mi familia y amigos, en especial a mi abuelo Elio que siempre anheló la finalización de mi estudio.
- A mi director Marcos, por su apoyo, paciencia y por brindarme parte de su tiempo y conocimiento para la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
CONCLUSIONES.....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	28
ANEXOS.....	31

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO N° 1. Distribución de la frecuencia relativa según los niveles de fósforo extractable.	.....14
GRÁFICO N° 2. Distribución del fósforo extractable según el uso del suelo.	.....15
GRÁFICO N° 3. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función de la proporción de arcilla + limo.	.....17
GRÁFICO N° 4. Correlación de los niveles de fósforo extractable de los usos de suelo en función de la proporción de arcilla + limo.	.....18
GRÁFICO N° 5. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función del pH.	.....18

GRÁFICO N° 6. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función del pH potencial.	.....19
GRÁFICO N° 7. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función del porcentaje de materia orgánica.	.....20
GRÁFICO N° 8. Distribución del índice de retención de fósforo según el porcentaje de arcilla y limo.	.....22
GRÁFICO N° 9. Correlación del índice de retención de fósforo en función del pH actual.	.....23
GRÁFICO N° 10. Correlación del índice de retención de fósforo en función del porcentaje de materia orgánica.	.....23
GRÁFICO N° 11. Relación P retenido en función del P Adicionado.	.....24
GRÁFICO N° 12. Relación P retenido en función del P adicionado para diferentes rangos de arcilla + limo en el suelo.	.....25
GRÁFICO N° 13. Capacidad buffer a partir de P. Adicionado – P. Recuperado.	.....26

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N°1. Modelo simplificado de las formas de fósforo en el suelo (Adaptado de Quintero, 2002).6
--	--------

RESUMEN

El fósforo es un nutriente que afecta la producción de los cultivos. Forma parte de enzimas, ácidos nucleicos, proteínas y está involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía. En Argentina las áreas con deficiencia de fósforo se extendieron en los últimos años por la continua remoción que realizan los cultivos. Numerosas investigaciones indican que los suelos de la región pampeana se encuentran por debajo de los niveles críticos requeridos para los principales cultivos producidos. Es por eso que se tomaron muestras de distintos suelos con diferentes usos del departamento Río Cuarto, Córdoba, a una profundidad de 0-20 cm y se les determinó el nivel de P extractable por el método de Bray y Kurtz. A las muestras de uso agrícola, se les determinó el índice de retención de fósforo para obtener cuanto fósforo retiene cada suelo en función de su contenido de arcilla y limo y por lo tanto, cuanto deja disponible para que sea aprovechado por la planta. Por último, se realizaron índices de retención a distintas concentraciones de fósforo agregado, para obtener la capacidad buffer a partir de P. Adicionado – P. Recuperado y en función de ésta, calcular la dosis equivalente. Los resultados indican que la mayor frecuencia de los suelos analizados están alrededor de las 12,5 ppm de P extractable; que los suelos con mayor proporción de limo y arcilla retienen mayor cantidad de fósforo y dejan menor disponibilidad del mismo para las plantas, y que en estos tipos de suelos hay que agregar mayor cantidad de fertilizante para elevar en una unidad las ppm de fósforo del suelo; y que la dosis optima equivalente encontrada para un grupo de suelos fue de 3,35 kg/ha de fósforo.

Palabras claves: fósforo extractable; índice de retención.

SUMMARY

Phosphorus is a nutrient that affects crop production. It is part of enzymes, nucleic acids, proteins and is involved in virtually all energy transfer processes. In Argentina, phosphorus deficient areas has been spreading in recent years, due to the continuous removal of crops. Numerous investigations indicate that the soils of the pampean region are below the critical levels required for the main crops produced. This is why samples of different soils with different uses of the department Río Cuarto, Córdoba, were taken at a depth of 0-20 cm and were determined the level of extractable P by the method of Bray and Kurtz. Also, the samples of agricultural use, were determined the index of retention of phosphorus, to obtain how much phosphorus retains each soil in function of its content of clay and silt, and therefore, what it leaves available so that it is taken advantage of by the plant. Finally, retention indices were performed at different concentrations of added phosphorus, to obtain buffer capacity from P. Added - P. Recovered and based on this, calculate the equivalent dose. The results indicate that the highest frequency of the analyzed soils is around 12.5 ppm extractable P; that the soils with a higher proportion of silt and clay retain more phosphorus and leave less availability of the same for the plants, and that in these types of soils we must add more fertilizer to raise the ppm of soil phosphorus; and that the optimum equivalent dose found for a group of soils was 3.35 kg / ha of phosphorus.

Keywords: extractable phosphorus; retention index.

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un elemento esencial para todos los organismos vivos. Como componente de cada célula viva es indispensable, ya que ningún otro elemento puede reemplazarlo en su papel vital, de muchos procesos fisiológicos y bioquímicos. Como consecuencia, la producción de cultivos para alimentación, forraje, combustible y fibra requiere un suministro adecuado de P en el suelo. De los nutrientes que las plantas requieren en grandes cantidades, el P es el de mayor preocupación debido a la tasa de explotación que tiene para satisfacer la demanda actual (FAO, 2008).

El P es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza y es, conjuntamente con el nitrógeno y el potasio, un constituyente primario de los seres vivos, vegetales y animales. El P posee una serie de funciones en el metabolismo vegetal y es uno de los nutrientes esenciales requeridos para el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Desempeña funciones estructurales en las macromoléculas como los ácidos nucleicos y de transferencia de energía en los procesos metabólicos de biosíntesis y degradación. A diferencia de los nitratos y sulfatos, los fosfatos no son reducidos en la planta y permanecen en su forma más oxidada (Marschner, 1993).

El P es uno de los nutrientes principales para las plantas, siendo necesario su adecuado suministro por parte de los suelos para condiciones no limitantes del crecimiento vegetal (Hernández y Zamalvide, 1998).

Por su importancia biológica y la complejidad de su ciclo en el suelo, es uno de los macro-nutrientes más estudiados en el mundo (Bachmeier y Rollán, 1994).

Es un elemento común, ocupando el puesto 11 en orden de abundancia en la corteza terrestre. Sin embargo, la concentración en las rocas es generalmente muy pequeña (FAO, 2008).

Se lo considera un elemento esencialmente inmóvil, sin embargo se moviliza muy lentamente en el suelo por procesos difusivos (Berardo *et al.*, 2009).

El uso eficiente de los fertilizantes de P es importante por ciertas razones; en primer lugar, la roca de fosfato, de la que se fabrican los fertilizantes de P, es un recurso finito, no renovable, que debe ser utilizado de manera eficiente con el fin de prolongar su aprovechamiento. En segundo lugar, es necesario mantener y mejorar el estado de P de muchos suelos para mejorar el rendimiento de los cultivos, para la fuente de alimentos, fibras y bioenergía (FAO, 2008).

Para efectuar recomendaciones de fertilizantes y enmiendas es indispensable utilizar los análisis de suelo de la manera más eficiente posible. Cualquier técnico que oriente a un agricultor en relación a estas prácticas, ya sea en forma directa o en la forma de un plan de

manejo, debe considerar la interpretación de estos resultados como los aspectos fundamentales en la toma de decisiones (Rojas Walker, 2003).

Para evaluar la disponibilidad de P previo a la siembra de un cultivo se recomienda el muestreo de suelo en superficie (0-20cm). En general, es importante tomar un número elevado de submuestras (20-30), particularmente en planteos bajo siembra directa, debido a la estratificación del P y la heterogeneidad en su distribución por la baja movilidad (Fertilab, 2015).

Quintero (2002) en su trabajo “Dosificación del fósforo según tipos de suelos”, recomienda realizar un análisis de suelo previo a la siembra, para estimar los requerimientos de fertilizante. En el caso del P, la mayoría de los laboratorios en la región pampeana, evalúan su disponibilidad por Bray y Kurtz. Este método, ha sido calibrado para los cultivos más importantes de la región, para una interpretación válida de los resultados. Así que en términos generales, se puede decir que valores por debajo de 5 mg kg⁻¹ son muy bajos, entre 5 y 10 son bajos, entre 10 y 20 medios y por encima de 20 a 25, pueden considerarse adecuados.

El método de Bray resulta apropiado para valorar la disponibilidad de P para las plantas, pero no es eficiente por sí solo para orientarnos acerca de cuánto fertilizante aplicar. Es un método de gran versatilidad que ha mostrado muy buenas relaciones con el rendimiento y el P absorbido por las plantas, en distintos suelos. Sin embargo, las recomendaciones de fertilización requieren de alguna determinación o índice, que evalúe el poder de retención de P del suelo (Quintero, 2002).

Otro de los objetivos del análisis de P disponible es que al conocer este valor en un momento dado a nivel de lote, es posible monitorear la cantidad de P disponible a través del tiempo, lo que constituye una valiosa información para la evaluación de las prácticas y necesidades de fertilización en los sistemas agrícolas (Rojas Walker, 2003).

Para aumentar la eficiencia del trabajo de diagnóstico, es necesario que el técnico se encuentre familiarizado con los conceptos básicos relativos a los índices nutricionales que se emplean en los laboratorios de rutina, tales como el índice de P disponible (Rojas Walker, 2003).

Fósforo extractable o disponible

Numerosas investigaciones han demostrado que el contenido de P disponible de los suelos es función, en gran medida, de su estado evolutivo, así como de su mineralogía y granulometría. A medida que la textura se hace más gruesa, el nivel de P disponible disminuye (Bachmeier y Rollán, 1994).

El P tiene muy baja movilidad y sólo parte del total se encuentra disponible para las plantas (Galantini *et al.*, 2005).

La disponibilidad de P en el suelo, corresponde a una pequeña fracción del P total contenido en el suelo, reflejando parte del P de la solución del suelo y aquella que se encuentra en la fase sólida, susceptible de ser asimilada por las plantas (Rojas Walker, 2003).

La cantidad de P disponible en el suelo, no es un valor único y constante, ya que varía de acuerdo a las condiciones ambientales que a su vez influyen sobre el suelo y el desarrollo de las plantas (Rojas Walker, 2003).

Las diversas formas de P varían en relación al pH; P-Al y P-Fe predominan con pH 5 a 6, disminuyendo por encima de ese valor (Bachmeier y Rollán, 1994).

El P es absorbido de la solución del suelo por las raíces de las plantas como iones ortofosfato, principalmente H_2PO_4^- y en un menor grado por HPO_4^{2-} (FAO, 2008).

El P forma compuestos débilmente solubles con cationes divalentes y monovalentes. Por esta razón, la cantidad de P de la solución del suelo es muy pequeña. Las plantas que crecen en el suelo, absorben esta pequeña cantidad de la solución suelo, que a su vez se encuentra en equilibrio con el P de la fase sólida. Así, cada una de las formas químicas del suelo contribuye de manera distinta a enriquecer el P disponible para el cultivo. Deben producirse condiciones que favorezcan la rápida liberación de fosfatos desde las formas orgánicas y/o de las formas inorgánicas de modo de mantener un adecuado suministro de formas disponibles. El compartimiento clave desde donde las plantas absorben P para su nutrición corresponde a aquel del P de la solución del suelo (Rojas Walker, 2003).

De particular relevancia para los ambientes semiáridos es el hecho de que un buen suministro de P, se asocia con un buen desarrollo radical que genera un mayor poder de exploración del suelo en búsqueda de nutrientes y agua. Una deficiencia de P retarda el crecimiento general de la planta (Kiessling *et al.*, 2008).

En el suelo existen distintas y variadas formas minerales y orgánicas de P que se encuentran en un equilibrio dinámico. El modelo simplificado podría ser descrito por el esquema propuesto por Larsen (1967) (Figura 1). El P lábil representa a los fosfatos adsorbidos, los minerales de mayor solubilidad, y a las formas orgánicas de fácil y rápida mineralización, que están en equilibrio con el P en solución. El P no lábil no está en equilibrio con la solución y constituye la reserva de P en formas minerales y orgánicas estables, donde se encuentra más del 90 % del P total del suelo (Quintero, 2002).

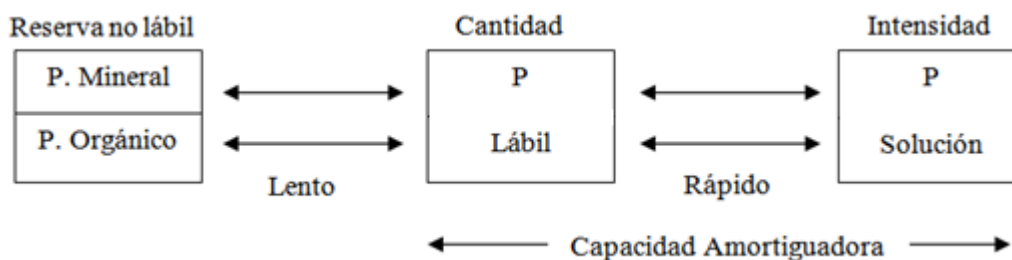


Figura 1. Modelo simplificado de las formas de fósforo en el suelo (Adaptado de Quintero, 2002).

Los factores más importantes que controlan la disponibilidad de P para las raíces de las plantas son, su concentración en la solución del suelo y la capacidad tampón de P en el suelo. Este último, controla la velocidad a la que el P se repone de la solución del suelo, es decir, la tasa de desorción de P de la fase sólida del suelo, que es más rápida en los suelos con una alta capacidad de tampón. (FAO, 2008). También, la cantidad de P que permanece lábil en el suelo depende de la extracción efectuada por los cultivos (Rojas Walker, 2003).

La concentración de un nutriente en la solución del suelo representa la intensidad del mismo, en este caso, los fosfatos en solución (Figura 1). La cantidad del elemento que está en la fase sólida, en equilibrio con la solución, es el factor cantidad. Para el P, esta es la fracción lábil. La relación dinámica entre la cantidad y la intensidad es conocida como el factor capacidad o capacidad “buffer”. La capacidad amortiguadora es la propiedad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de P en solución, en estado de equilibrio, al extraer o agregar P (Quintero, 2002).

El factor capacidad es importante en la nutrición de las plantas: un suelo de alta capacidad amortiguadora repondrá rápidamente el P extraído de la solución, por parte de las plantas. Por otro lado, en suelos con diferente capacidad amortiguadora se requieren distintas cantidades de fertilizante para alcanzar un mismo nivel de P en solución (Quintero, 2002).

La capacidad buffer de P o poder amortiguador del suelo tiene un efecto directo sobre la cantidad de fertilizante que pasará a formas no disponibles para las plantas. En suelos de media a alta capacidad buffer, como los suelos rojos de Misiones o norte de Corrientes, un 70 % del P adicionado puede pasar rápidamente a formas no lábiles y poco disponibles.

Suelos franco limosos a franco arcillosos tienen baja capacidad de retención, quedando un 40 a 50 % del fósforo aplicado fácilmente disponible para las plantas. Mientras que en los suelos de texturas gruesas, solo 30 a 40 % pasa a formas no lábiles. Dependiendo del tipo de suelo, la cantidad de fertilizante que hay que aplicar para alcanzar un determinado valor de P disponible, es diferente (Quintero, 2002).

Bongiovanni *et al.*, (2010), realizaron en el trabajo “Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y el sudeste de San Luis”, un relevamiento del nivel de P

disponible por Bray y Kurtz en suelos agrícolas del gran grupo de Haplustoles y Hapludoles ubicados al sur de Córdoba para evaluar la suficiencia de P comparándolo con el nivel crítico. Al comparar los datos observados en suelos agrícolas de los cuatro departamentos de sur de Córdoba, se observó que del total de las muestras un 55% se encontraban con niveles de P disponible inferiores a 11 ppm. Los niveles de P disponible en el sur de Córdoba difirieron significativamente entre departamentos, siendo los valores medios encontrados en Río Cuarto de 11,3 ppm.

El umbral crítico de un nutriente en el suelo es el valor de disponibilidad que separa el nivel de deficiencia del nivel de suficiencia. En los planteos agrícolas se suele recomendar la dosis de fertilizante fosforado en función de los umbrales críticos de respuesta de cada cultivo. Son esperables respuestas positivas al agregado de fertilizantes en aquellos suelos con valores menores al umbral crítico. Los umbrales suelen estar expresados en términos de concentración de P extractable en los primeros centímetros del perfil. En la actualidad existen consistentes estimaciones de los umbrales críticos. Para el caso de trigo y maíz los mismos oscilan entre 14 y 19 mg kg⁻¹ respectivamente (Rubio *et al.*, 2007).

Melgar *et al.* (1995), sostienen que el valor de 10 ppm de P extractable puede ser considerado como umbral crítico para decidir la fertilización en soja.

Si bien constituyen la base de la recomendación de la fertilización, los umbrales críticos son insuficientes para determinar la dosis de fertilizante a aplicar. La información sobre umbrales debe ser complementada con modelos que permitan predecir la dosis necesaria en cada suelo particular para alcanzar esos umbrales críticos (Rubio *et al.*, 2007).

Fósforo retenido

La pérdida del P soluble de la solución del suelo es un proceso continuo, no solo por la remoción efectuada por las raíces de las plantas y microorganismos, sino también por mecanismos de adsorción y/o precipitación en la superficie de los coloides quedando como P insoluble (Rojas Walker, 2003).

El P agregado a los suelos a través de los fertilizantes reacciona rápidamente con diferentes constituyentes del suelo, formando compuestos de muy baja solubilidad como los que forman con cationes de hierro, aluminio y calcio. Estos procesos determinan una pérdida de la asimilabilidad para las plantas del P agregado en función del tiempo. La intensidad de dichos procesos presenta variaciones entre suelos, lo cual determina diferencias en su capacidad de retención y en la eficiencia de utilización por la planta del P agregado. De aquí la importancia de caracterizar la intensidad de dichos procesos en diferentes suelos y de identificar características de los suelos asociados con ellos (Hernández y Zamalvide, 1998).

En la medida que se agite una cierta cantidad de P soluble en contacto con el suelo, rápidamente una proporción importante de este P soluble desaparece de la solución, debido a que queda retenido en la fase sólida, fenómeno que se conoce con el nombre general de “fijación”. Una proporción importante de este P evoluciona a formas insolubles por lo que vuelve con gran dificultad a la solución y otra fracción queda retenida casi irreversiblemente con gran energía, lo que se considera prácticamente una pérdida de P y se conoce también con el nombre de “P fijado o bloqueado” (Rojas Walker, 2003).

La metodología básica de las isotermas de retención de P consiste en equilibrar muestras de un mismo suelo con soluciones de diferente concentración conocida de P, determinando, luego de cierto tiempo, cuanto del P agregado permaneció en solución y cuanto pasó a formas retenidas en la fase sólida del suelo. Luego se establecen relaciones entre los valores de P en la solución y los correspondientes a P retenido en la fase sólida, relacionando el ajuste de diferentes modelos matemáticos y la estimación de parámetros de retención de P (índices de retención), los cuales permiten caracterizar los suelos desde el punto de vista de su capacidad de retener al P (Hernández y Zamalvide, 1998).

Rubio *et al.*, (2007), en el trabajo “¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo?” calcularon para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana, que la inversa de la pendiente (coeficiente b) de la recta que relaciona el incremento de P extractable y la dosis agregada de P, se ajustó mediante el modelo lineal simple. El coeficiente b queda definido entonces como el incremento en el P extractable en el suelo ante la adición de un mg P kg^{-1} en el suelo.

Quintero (2002) en el trabajo “Dosificación de Fósforo según Tipos de Suelos”, también encontró que la inversa de la pendiente de las rectas que relacionan dosis de P aplicado y la disponibilidad a los 60 días, expresa los kilos de fertilizante que se requieren para lograr un incremento en el P disponible de una unidad, valor que se denomina “Dosis Equivalente” (De). Esta pendiente, está estrechamente relacionada con las características del suelo que hacen a su poder de fijación (contenido de arcillas, óxidos libres, etc) o medidas del poder buffer.

La capacidad de retención de P es una propiedad de cada suelo, relacionada con el porcentaje de arcilla y óxidos libres (Quintero, 2002).

En varias investigaciones que se han desarrollado en nuestro país, se han encontrado altas correlaciones de los índices de retención de P con el contenido de óxidos de hierro, arcilla y aluminio intercambiable de los suelos. Los resultados que se obtienen de caracterizar los procesos de retención de P en diferentes suelos, permiten la caracterización primaria de los suelos desde el punto de vista de su poder de retención de P, en función de características asociadas al proceso y su efecto en la eficiencia de uso del P agregado para las plantas. Por otra parte, la evaluación de algunos índices de retención de P posibilitará su uso

futuro como parámetro de caracterización de suelos y como información complementaria a los test de análisis de suelo para P asimilable, a los efectos de realizar recomendaciones de fertilización fosfatada (Hernández y Zamalvide, 1998).

Siguiendo con el trabajo de Hernández y Zamalvide (1998), en los estudios de isotermas de retención de P se encontraron diferencias entre los suelos estudiados en términos de retención del P agregado. Dichas diferencias estuvieron relacionadas con el contenido de óxidos de hierro, arcilla y aluminio intercambiable. Suelos desarrollados a partir de materiales del Basamento Cristalino, lavas basálticas y Sedimentos Pelíticos Grises mostraron los valores más elevados de P retenido por la fase sólida para mantener los diferentes niveles de P en la solución. Por otra parte, suelos desarrollados a partir de sedimentos arenosos (areniscas triásicas y cretácicas) mostraron bajos índices de retención de P. A mayor retención de P por parte del suelo, la eficiencia de utilización de este nutriente por la planta es más baja.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis:

- Los niveles medios de P disponibles en el suelo, se encuentran por debajo de los niveles críticos requeridos para los principales cultivos producidos en el departamento Río Cuarto.
- Los niveles de retención de P por el suelo, son una medida muy relacionada a los niveles de arcilla y limo de los suelos del departamento Río Cuarto.

Objetivo general:

- Realizar un relevamiento de los niveles de P disponible en suelos de diferentes texturas del departamento Río Cuarto.
- Evaluar la retención P de los suelos al agregado de fertilizantes.

Objetivos específicos:

- Determinar niveles de P extractable para distintos suelos del departamento Río Cuarto.
- Determinar niveles de retención de P de punto único.
- Establecer relaciones cuali – cuantitativas de P en muestras de similares granulometrías y diferentes condiciones de uso.
- Establecer relaciones entre niveles de retención y posibles dosis equivalentes de fertilizantes para los distintos suelos estudiados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El siguiente trabajo de investigación se realizó desde junio de 2015 hasta agosto de 2016, en el laboratorio de Sistema Suelo-Planta de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, ubicada en la ruta nacional N° 36, en el km 601 de Río Cuarto, Córdoba.

Fósforo extractable:

El área de estudio está localizada entre los paralelos 32,59° y 34,10° de latitud sur y los meridianos 64,84° y 61,55° de latitud oeste y comprende las cuencas del río cuarto y los arroyos santa catalina, el gato y el ají (2.297.500 Ha).

En lotes de campos identificados en cada unidad ambiental homogénea y en función del uso y sistema de producción se extrajeron con barreno 107 muestras de 0-20 cm de diferentes tipos de suelos del departamento Río Cuarto, con distintos usos, ganaderos y agrícolas. La forma de muestreo fue estratificado al azar. Se les determinó el contenido de fósforo extractable en ácido fluorhídrico diluido, por el método de Bray y Kurtz (1945). La combinación de CIH y NH₄F tiene como finalidad remover las formas de P que son fácilmente solubles en ácidos, mayormente fosfatos de calcio y una parte de los fosfatos de Fe y Al. El NH₄F disuelve los fosfatos de Fe y Al, por la formación de iones complejos de estos metales en la solución ácida. Se eligió este método porque es el más satisfactorio en suelos levemente ácidos como los del departamento Río Cuarto.

Las muestras analizadas corresponden a suelos con distintos usos:

- 71 muestras de uso agrícola: uso agrícola para la producción de cultivos de maíz o soja.
- 22 muestras de uso ganadero: implantado con pastura de alfalfa.
- 14 muestras de uso ganadero baja perturbación (Ganadero BP): implantado con pasturas de gramíneas como pasto llorón por más de 10 años.

Los reactivos usados fueron:

- Solución extractiva: 15 ml de fluoruro de amonio 1 N y 25 ml de HCl 0,5 N y enrase con agua destilada hasta 1 litro.
- Solución mezcla sulfomolídica-tartarato.
- Solución o reactivo color: 0,24 gr de ácido ascórbico y 62 ml de solución mezcla y enrase con agua destilada hasta 250 ml.

Se pesó 2,85 gr de suelo en un tubo falcon de 50 ml y se agregó 20 ml de solución extractiva. Se agitó durante 5 minutos exactos. Finalizada la agitación se filtro con papel de filtro banda azul para obtener un extracto límpido. Se transfirió una alícuota de 1 ml a un tubo de ensayo, se añadieron 9 ml de solución color y se homogeneizó la disolución. También se realizó un blanco que contenía 1 ml de solución extractiva con 9 ml de solución color. Luego de 10 minutos se midió el color fotométricamente a una longitud de onda de 882 nm.

Se realizó el cálculo para determinar la concentración de P en ppm:

$$\text{ppm P suelo} = \frac{\text{extracto (ml)}}{\text{peso suelo (g)}} \times \frac{\text{volumen final (ml)}}{\text{alícuota (ml)}}$$

Ppm de P en el suelo = ppm de P en la disolución x 70.

Índice de retención de P:

Se seleccionaron 63 muestras de distintos suelos de 0-20 cm de uso agrícola y se les determinó el índice de retención de P remanente o índice de punto único (Quintero *et al.*, 1995), el cual expresa la concentración de P en la solución de equilibrio después de agitar una solución de 60 mg L⁻¹ de P en CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, durante 1 hora, en una relación suelo:solución de 1:10, a 21 °C.

Soluciones utilizadas:

- CaCl₂ 0,02 M: 1,472 gr de CaCl₂ y enrasar con agua destilada a 0,5 litros.
- Solución estándar de 500 mg L⁻¹ de P: se disolvió 1,0982 g de KH₂PO₄ (seco a estufa durante 2 horas a 105 °C) en 0,5 litros.
- Solución de cloruro de Ca 0,01 mol L⁻¹ con 60 mg L⁻¹ de P: se mezcló 500 ml de la solución de CaCl₂ 0,02 mol L⁻¹ con 120 ml de la solución de 500 mgL⁻¹ de P. Se llevo a 1000 ml.

En un tubo de 25 ml se colocaron 2,5 g de suelo y 25 ml de la solución 60 mg L⁻¹ de P en CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, se agitó durante 1 hora con un agitador a horizontal. Se filtro con papel de filtro banda azul o equivalente.

Se extrajo 1 ml de alícuota y se le agregó 9 ml de solución color (idem a Bray y Kurtz 1945). Se realizó un blanco con 1 ml de solución extractiva y 9 ml de solución color. Y además, se colocó 1 ml de solución de 60 mg L⁻¹ de P en CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ con 9 ml de solución color. Luego se leyó en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 882 nm.

Para calcular este índice de retención de fósforo, se utilizaron los resultados de la determinación anterior (P remanente), siendo:

$$\text{Ppm de P en el suelo} = \text{ppm de P en la curva} \times [(\text{ml de extracto} / \text{peso del suelo en gr}) \times (\text{volumen final} / \text{alícuota})]$$

Curvas de fósforo retenido:

Por último, para realizar las curvas de fósforo retenido en la fase sólida en función del fósforo en solución, se utilizaron 4 suelos con diferente contenido de arcilla y limo, y se les determinó el índice de retención a distintas concentraciones como 7,5 – 15 – 30 y 60 mg L⁻¹ de P en CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. El procedimiento fue el mismo que el descrito anteriormente para índice de retención.

Datos complementarios como porcentaje de arcilla y limo, pH, pH potencial y materia orgánica fueron realizados por integrantes del programa de investigación llevado a cabo por los docentes del área de Sistema Suelo-Planta, FAV – UNRC que comenzó en el año 2009.

Análisis estadístico

El análisis de los datos obtenidos se realizó por medio de análisis descriptivos, ANOVA en diseño completo al azar y regresiones lineales según la variable en estudio. Para los análisis estadísticos se utilizó el software InfoStat (DiRenzo, 2011). Cuando no se encontró normalidad de los datos las comparaciones de medias se realizaron por métodos no paramétricos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fósforo extractable o disponible

Los suelos de la región pampeana, principal región productora de granos del país, muestran una continua disminución en los niveles de P disponible, ésta disminución ha sido atribuida a la mayor producción de granos y el reducido uso de fertilizantes fosfatados (Quiroga y Bono, 2012).

Las formas del P en los suelos son función de sus propiedades, las cuales varían en forma interdependiente y en distinta magnitud, según el estado de evolución de los mismos. Los cambios debido al avance en el desarrollo de un suelo, como la acumulación de la materia orgánica, el descenso del pH o la reducción de la saturación de bases, se reflejan en cambios reconocibles en la distribución del P del suelo, tales como disminución del P extraíble con ácido y la acumulación de este elemento en formas secundarias (Boschetti *et al.*, 2003).

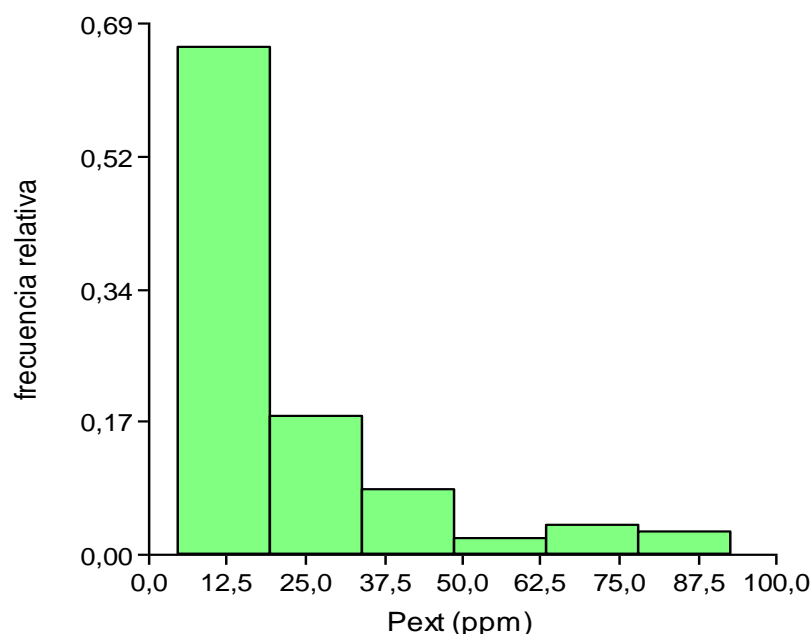


Gráfico N° 1. Distribución de la frecuencia relativa según los niveles de fósforo extractable.

En el Gráfico N° 1 se puede observar que la mayor proporción (65% aproximadamente) de suelos con respecto al total de las muestras analizadas en el departamento Río Cuarto, poseen un contenido promedio de P extractable de 12,5 ppm. La

frecuencia relativa se hace menor proporcionalmente con el aumento de las ppm de P extractable.

Bongiovanni *et al.*, (2010) en el trabajo “Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y Sudeste de San Luis” concluyeron que en el departamento Río Cuarto los valores medios de P disponible encontrados fueron de 11,3 ppm y el 63% de las muestras se encontraron dentro de rango de 4 a 10 ppm de P disponible. En función de estos niveles medios de P disponible encontrados, se puede concluir que, para el caso de maíz que presenta niveles críticos aproximados entre 14 a 20 ppm, el departamento Río Cuarto se encuentra con valores de P disponible por debajo de los niveles críticos. Si se toma la decisión de fertilizar en estos casos, se obtendría una respuesta positiva al agregado de fertilizantes.

Por otra parte, la forma de distribución de los valores de P en el Gráfico N° 1 presentan una asimetría a la derecha, es decir, no poseen distribución simétrica.

Angelini *et al.*, (2012) en el trabajo “Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra Pampeana argentina” encontraron en el análisis de la distribución de los datos, una desviación de la normalidad ($p < 0,05$), dado que la mayor parte de las muestras se encontró en el rango de concentración de P-Bray considerado muy bajo y bajo ($0-10 \text{ mg kg}^{-1}$ y $10,1-15 \text{ mg kg}^{-1}$).

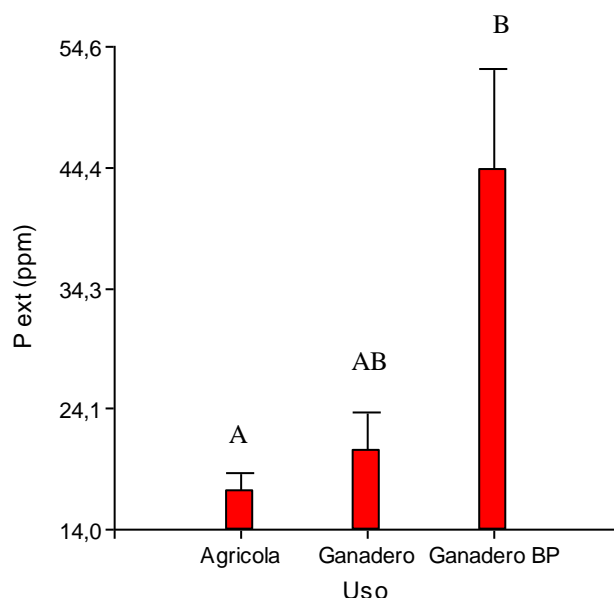


Gráfico N° 2. Distribución del fósforo extractable según el uso del suelo. (Letras distintas indican diferencias estadísticas $p < 0,05$).

La intensificación de la agricultura, sin rotación de cultivos y sin el correspondiente incremento en la utilización de fertilizantes, ha provocado pérdidas de nutrientes en muchos suelos de la región pampeana (Krüger *et al.*, 2006).

En el Gráfico N° 2 se observa que los mayores niveles de P corresponden al uso ganadero BP, uso ganadero y por último se encuentran los suelos agrícolas con los menores niveles de P extractable. También se aprecia que las muestras agrícolas presentan menos variabilidad que las ganaderas. Las muestras que presentaron la mayor variabilidad correspondieron al uso ganadero.

La baja variabilidad de los usos agrícolas puede atribuirse al similar manejo que se realiza y en la mayoría de los casos, a la escasa reposición de este nutriente, por lo tanto, los niveles críticos se mantienen o disminuyen a lo largo de los años. En cuanto a los ganaderos BP la variabilidad podría explicarse por la heterogeneidad en el manejo del pastoreo, niveles de remoción y diferencias en los años de implantación de la pastura.

Para evitar esta degradación química usualmente se recomienda agregar fertilizantes, que compensen la extracción de nutrientes por los cultivos y el chequeo periódico de la fertilidad de la capa arable (Krüger *et al.*, 2006).

Se observa que cuando se separan los distintos usos del suelo, la distribución de los niveles de P extractable varía significativamente. Esto explica que existen diferencias significativas en cuanto al uso de los suelos.

La textura del suelo puede modificar el equilibrio y la disponibilidad de P como consecuencia de sus propiedades minerales y fisicoquímicas, su influencia en los procesos de adsorción-desorción-difusión de fosfato. La cantidad y la labilidad de P inorgánico depende de la distribución de los diferentes tamaños de las partículas del suelo, su material parental y el grado de meteorización. Aunque el P es mucho menos móvil que los otros nutrientes en el suelo, como nitratos o sulfatos, el impacto directo de la textura del suelo sobre la disponibilidad de P es muy relevante para la producción de cultivos. En suelos arenosos, la difusión de fosfato hacia las raíces del cultivo es menor; en suelos arcillosos, la fijación puede ser mayor, disminuyendo así la provisión de P. Diferentes texturas de suelo, por tanto, generan una amplia gama de comportamiento de P en el suelo (Galantini y Suñer, 2015).

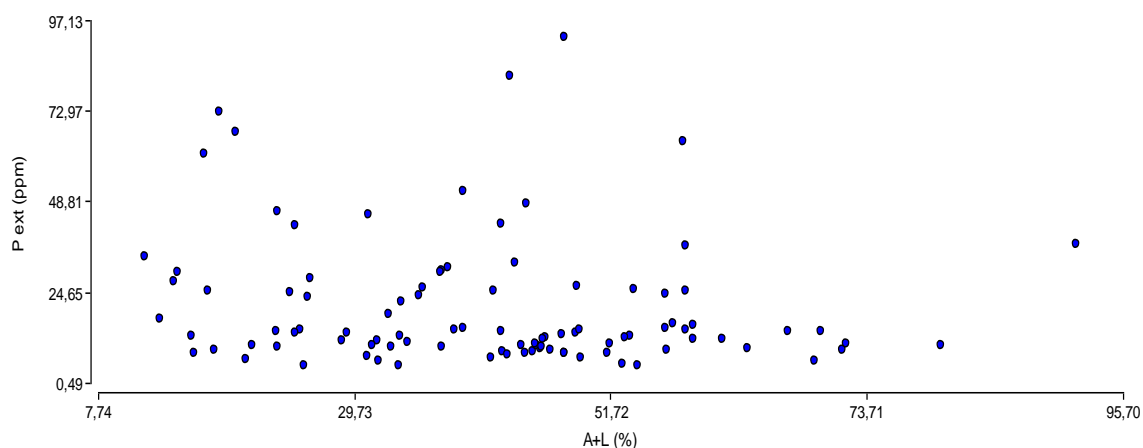


Gráfico N° 3. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función de la proporción de arcilla + limo.

En el Gráfico N° 3, cada punto representa a un análisis de P extractable. Para el grupo de muestras estudiadas no se encontró correlación entre el P extractable y los niveles de Arcilla + Limo.

Lo encontrado en el presente trabajo en relación a P y textura, se contradice con lo expuesto en Bachmeier y Rollan (1994), quienes afirman que a medida que la textura se hace más arenosa, el nivel de P disponible disminuye. También, que existe una correlación entre el contenido de P disponible, espesor del horizonte superficial y su contenido de materia orgánica, ya que, el carbono orgánico y el clima dominante determinarán la tasa del P orgánico que anualmente pasará a P mineral.

Galantini y Suñer, 2015, encontraron una correlación positiva entre el contenido de formas de P y el contenido de limo y arcilla del suelo; que el mayor contenido de arena provoca dilución del contenido de P, lo que disminuye la reserva total de P en suelos arenosos; y que en la fracción fina, se observó una correlación positiva entre las formas de P y el contenido de arcilla y limo del suelo.

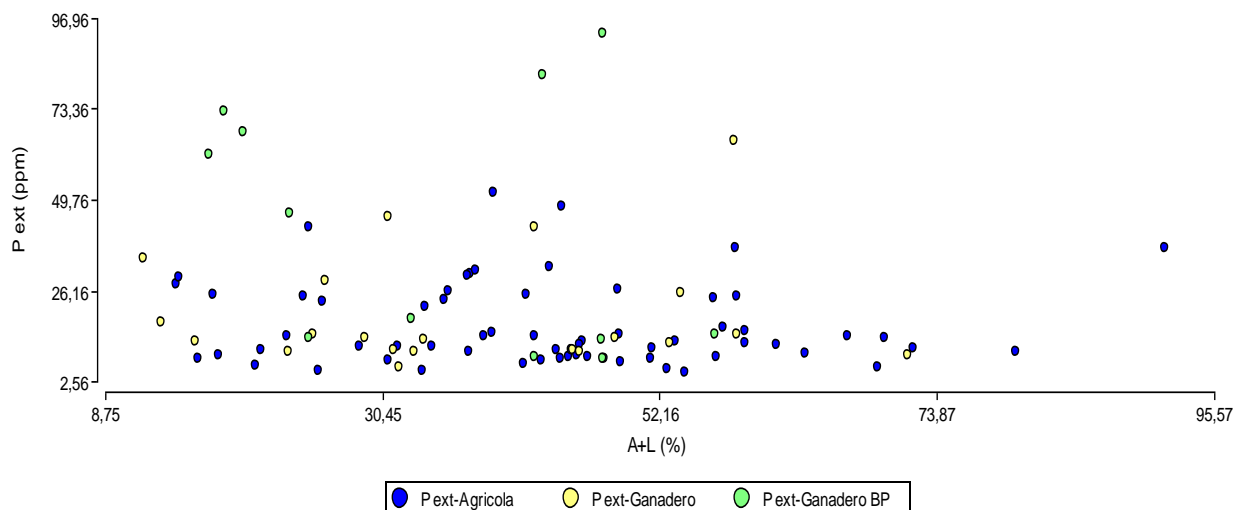


Gráfico N° 4. Correlación de los niveles de fósforo extractable de los usos de suelo en función de la proporción de arcilla + limo.

En el Grafico N° 4, cada punto representa un análisis de P extractable, pero al diferenciarse los distintos usos, se puede concluir que los puntos que corresponden al uso agrícola están en el más bajo nivel de P extractable, independientemente de la textura. En cuanto al Ganadero de BP se visualiza una alta variabilidad de valores. Se observa una gran dispersión de muestras y no hay aproximación de puntos a una recta. Por lo tanto, para el grupo de muestras estudiadas no se encontró correlación entre el P extractable y los niveles de Arcilla + Limo.

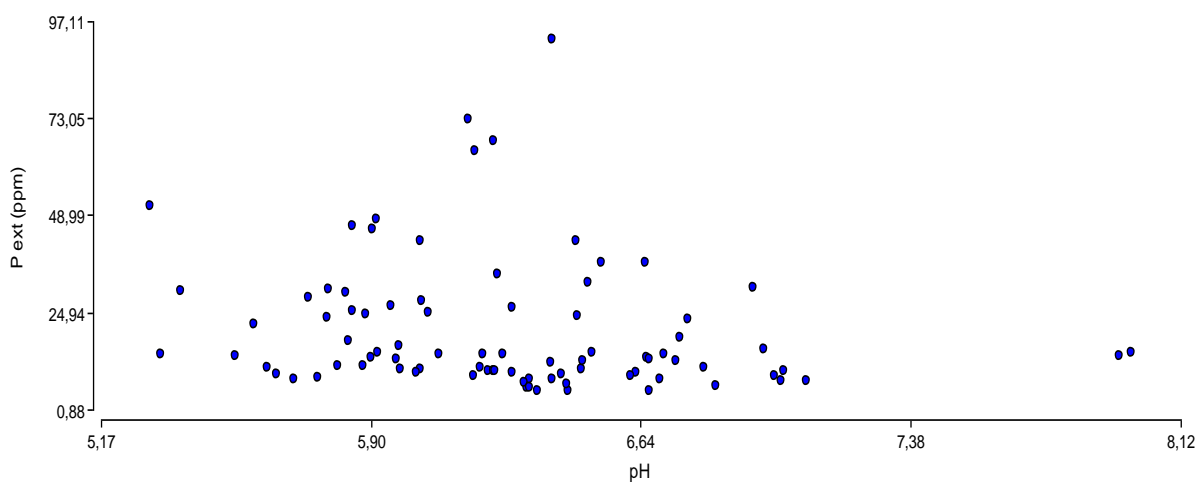


Gráfico N° 5. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función del pH.

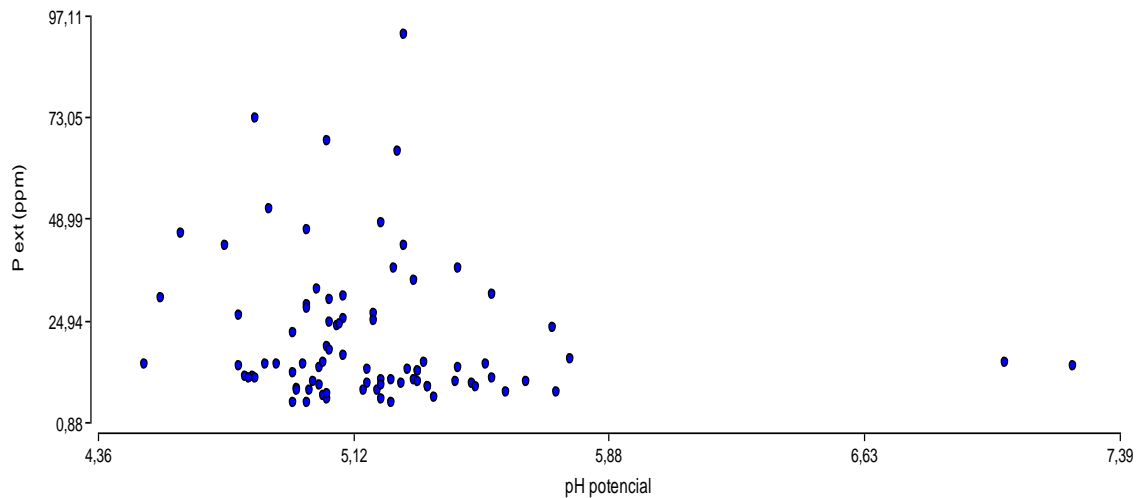


Gráfico N° 6. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función del pH potencial.

Los Gráficos N° 5 y 6 muestran que no hay una relación directa entre el P extractable y el pH. También se observa que todas las muestras se ubican alrededor de un pH levemente ácido a neutro y esto justifica la extractiva utilizada en este trabajo que es la de Bray y Kurtz.

Los suelos con bajos pH y dominancia de óxidos de Fe y Al, tienen altas cantidades de P en las formas orgánicas e inorgánicas extraíbles con álcalis y muy bajos valores de P extraído con ácido diluido (Boschetti *et al.*, 2003).

El pH es una propiedad fundamental que regula la mayor parte de los procesos químicos, físicos, y biológicos que ocurren en el suelo. La disponibilidad del P es regulada por el pH. Esto determina que suelos con alto contenido de carbonato de calcio (pH mayores de 8), tengan baja disponibilidad de P para los cultivos (Krüger *et al.*, 2006).

Los autores Bachmeier y Rollan (1994), determinaron que los coeficientes de correlación entre P-extractable y pH fueron altamente significativos ($p < 0,001$).

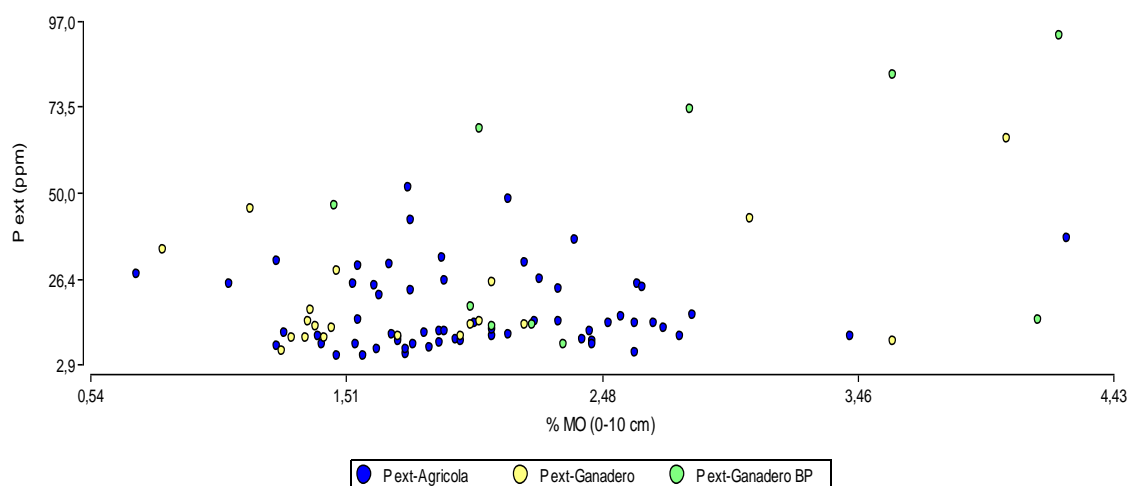


Gráfico N° 7. Correlación de los niveles de fósforo extractable en función del porcentaje de materia orgánica.

La estrecha relación entre el P inmediatamente disponible para las plantas con el contenido de carbono orgánico del suelo, indica el importante efecto de la materia orgánica sobre la disponibilidad de P. Los compuestos orgánicos de los suelos incrementan el P disponible porque recubren los óxidos de Fe y Al, formando una cubierta protectora que reduce la adsorción del P o por el reemplazo de los aniones $H_2PO_4^-$ en los sitios de adsorción por aniones orgánicos tales como citrato, oxalato, tartrato o malato. Sin embargo la materia orgánica no solo afecta el intercambio aniónico, también interviene en la dinámica del P por la formación de complejos órgano-fosfatados que son fácilmente atacables por los microorganismos del suelo y de esta manera al mineralizarse contribuyen al P disponible (Boschetti *et al.*, 2003).

La mineralización del P orgánico proveniente de la MO representa una contribución significativa para las necesidades de P para la plantas. La mineralización y disponibilidad del P orgánico depende de la descomposición de la MO. Cualquier reducción en el aporte de materia orgánica y una aceleración de la mineralización en un suelo resulta en una mineralización neta de la materia orgánica del suelo, como la que ocurre por parte de las labranzas. A medida que los residuos se descomponen para formar materia orgánica y liberar algunos de los nutrientes asociados, el P es liberado en cantidades mayores que aquellas determinadas por las transformaciones inorgánicas de P. Entonces la degradación de la materia orgánica controla la liberación de P orgánico, pero una vez liberado, los sitios de absorción y las reacciones químicas compiten por la disponibilidad del P liberado de manera que la mineralización de P por sí sola no es una medida del abastecimiento de P para las

plantas y gran parte del P mineralizado rápidamente queda no disponible (Quiroga y Bono, 2012).

En el estudio de Bachmeier y Rollan (1994) se hallaron correlaciones altamente significativas entre P-extractable y materia orgánica, confirmando la estrecha relación entre el ciclo del P y el del carbono orgánico del suelo.

En el Gráfico N° 7 se observa que hay una correlación entre estas variables pero con un ajuste muy bajo (0,12).

Índice de Retención de Fósforo

Una característica del P es su tendencia a pasar a formas menos disponibles, ya que presenta una fuerte interacción con fases sólidas, inorgánicas y orgánicas (Giuffre, 1989).

En los suelos que presentan mayor poder de retención, es necesario agregar más fertilizante para obtener un mismo nivel de absorción de fósforo por las plantas, esto indica una menor eficiencia de uso del nutriente (Hernández y Zamalvide, 1998).

Giuffre (1989) encontró índices relacionados a las propiedades físico-químicas de los suelos. Se encontraron relaciones positivas entre valores de adsorción y las fracciones texturales finas. La retención de P por el material arcilloso puede explicarse por acción de puentes de Ca. En cuanto al pH, en el mismo trabajo se encontró una asociación negativa entre el pH y la adsorción de fosfatos y esto podría explicarse por una mayor repulsión electrostática a medida que las superficies del suelo se vuelven más electronegativas. En cuanto a la materia orgánica los coeficientes de correlación mostraron signos positivos y negativos, sin llegar a los niveles de significación prefijados. Estos aspectos contradictorios reflejan las evidencias contrapuestas encontradas por distintos investigadores, ya que en numerosos trabajos se encuentra correlación positiva entre la materia orgánica y la fijación de P, que puede producirse por intercambio aniónico o por retención de humatos de calcio. Por otro lado existen evidencias de competencia entre materia orgánica y P por los sitios de adsorción.

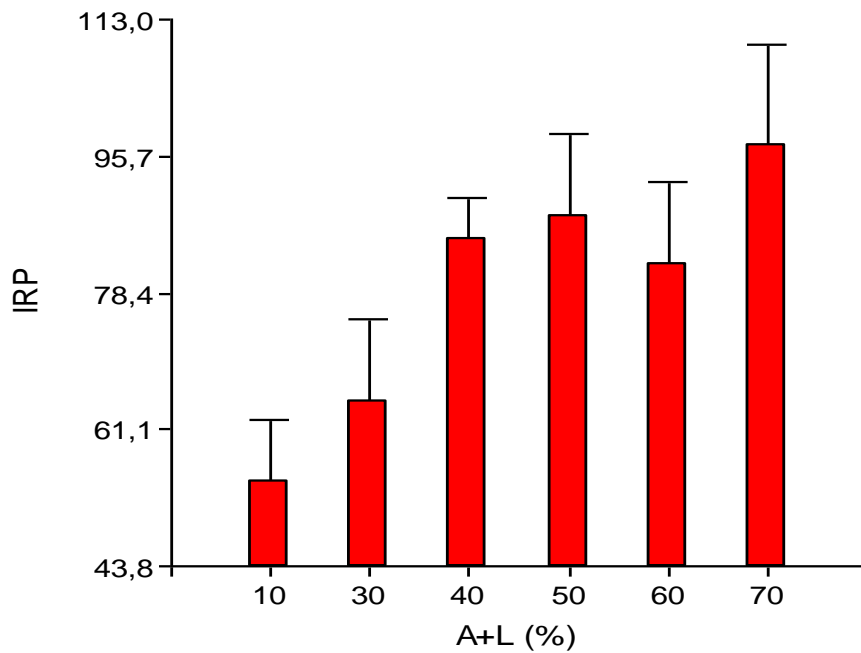


Gráfico N° 8. Distribución del índice de retención de fósforo según el porcentaje de arcilla y limo.

Se encontraron diferencias significativas entre el IRP y el porcentaje de arcilla y limo en el suelo. A diferencia del P extractable, en el Gráfico N° 8 se observa que a medida que aumenta el porcentaje de arcilla y limo, la retención de P por la fase sólida es mayor, es decir, habrá menos P disponible para la planta. Teniendo en cuenta la Figura 1, el equilibrio se desplaza a la izquierda, aumentando el P lábil y disminuyendo el que conforma el factor intensidad. Los suelos arenosos tienen menor poder de retención de P, por lo tanto dejan a disposición para la planta una mayor cantidad de P disponible.

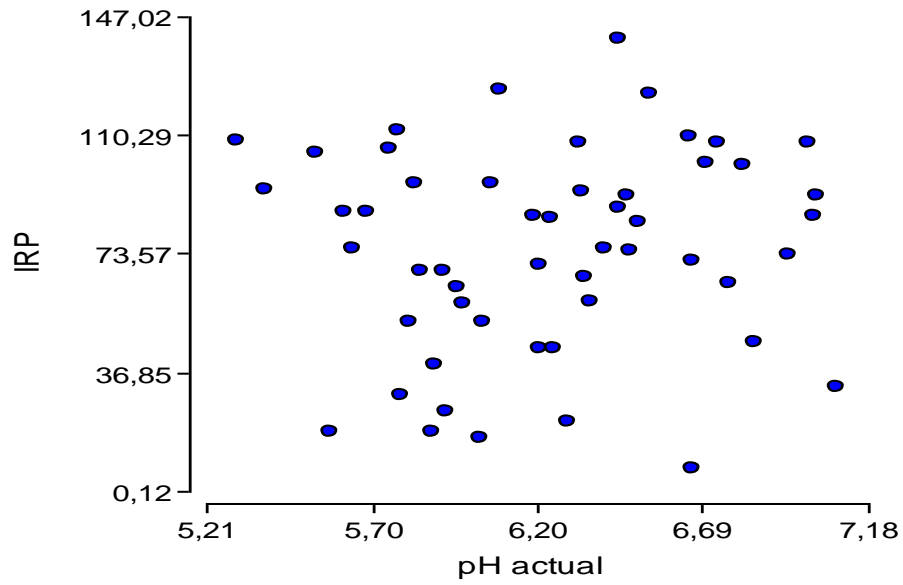


Gráfico N° 9. Correlación del índice de retención de fósforo en función del pH actual.

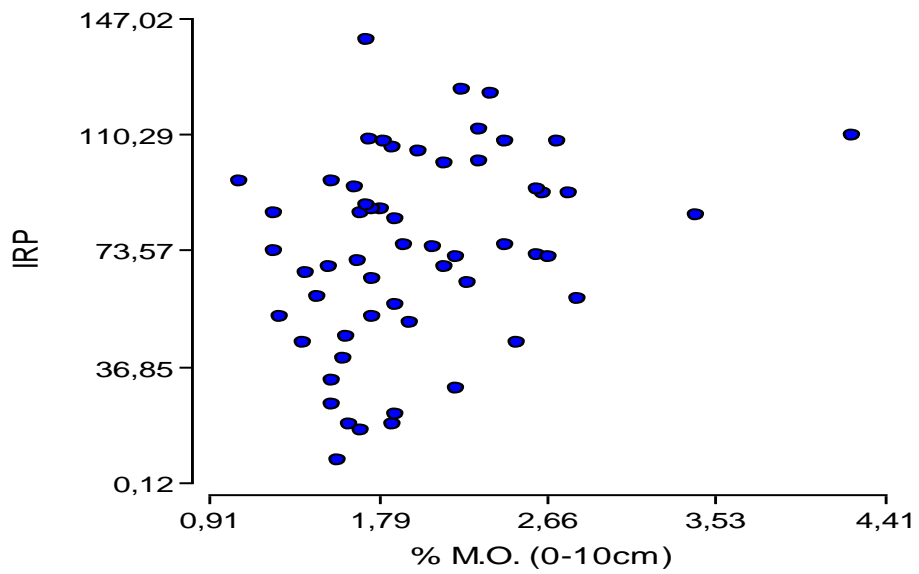


Gráfico N° 10. Correlación del índice de retención de fósforo en función del porcentaje de materia orgánica.

Los resultados que se obtuvieron en el presente trabajo, en cuanto a pH (Gráfico N° 9) no indican correlación entre las variables; y para el caso del porcentaje de materia orgánica (Gráfico N° 10), no existe una correlación, pero hay una tendencia a aumentar el índice de retención con el aumento de la materia orgánica.

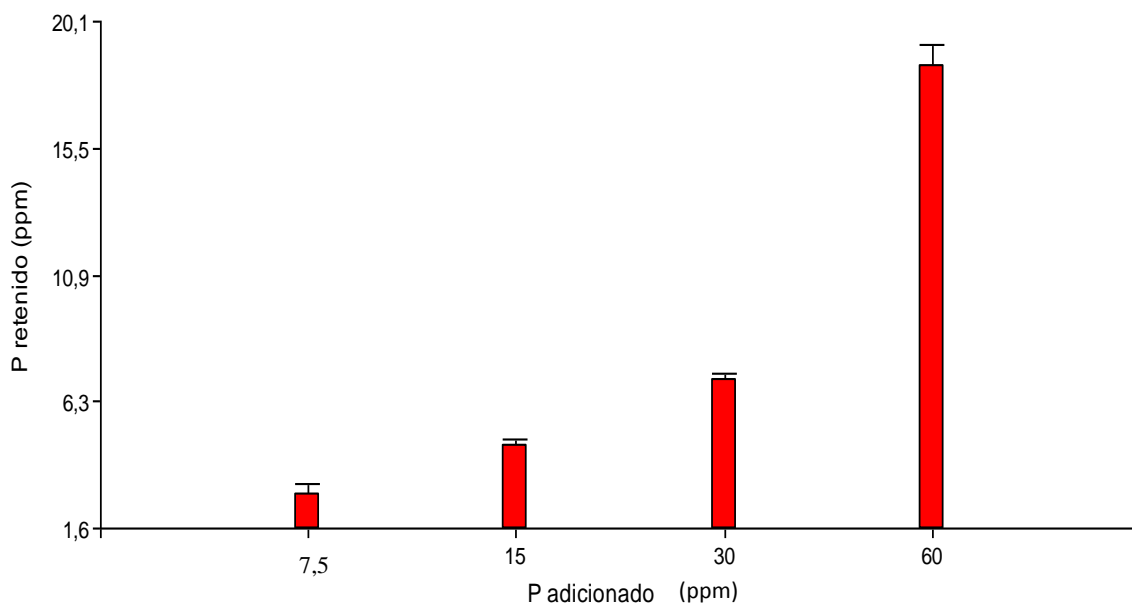


Gráfico N° 11. Relación P retenido en función del P Adicionado.

El gráfico N° 11 explica que a medida que se agrega más P, aumenta el P retenido. Cada barra de P adicionado indica un valor medio de diferentes suelos con distintos porcentajes de arcilla y limo, de ahí la poca variabilidad que se observa.

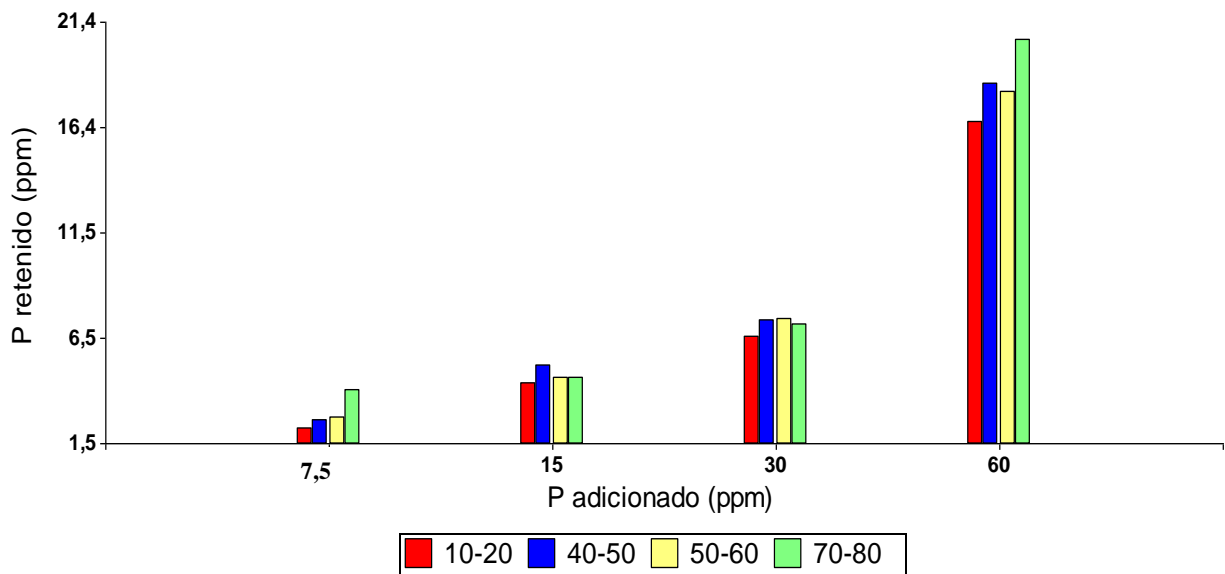


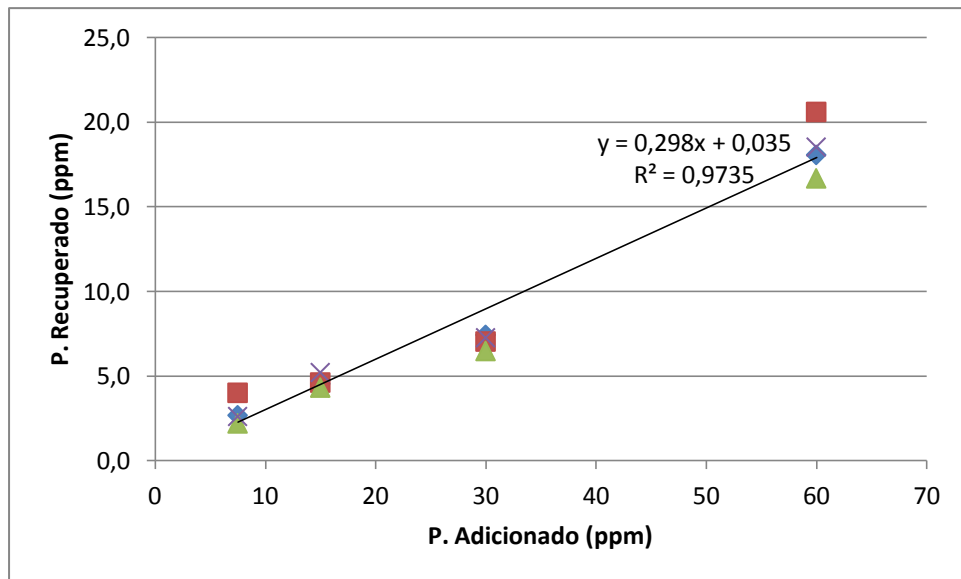
Gráfico N° 12. Relación P retenido en función del P adicionado para diferentes rangos de arcilla + limo en el suelo (Diferentes colores indican suelos con distintos niveles de limo+arcilla).

En el Gráfico N° 12 se puede ver la relación entre la textura y el índice de retención de P. A medida que aumenta el % de limo y arcilla, el suelo retiene más P.

Esto se corresponde con el trabajo de Hernández y Zamalvide (1998), en donde los materiales más arcillosos mostraron alto poder de retención de P. Dicho comportamiento surge de los valores más elevados de P retenido en la fase sólida para mantener los diferentes niveles de P en la solución. En el mismo trabajo, los suelos con más arena fueron los de menor poder de retención de P, al igual que los resultados del presente trabajo.

La capacidad buffer de P del suelo tiene un efecto directo sobre la cantidad de fertilizante fosforado que pasará a formas disponibles para poder ser tomado por las plantas.

El coeficiente “b” o la pendiente, representa el incremento en P Bray ante el agregado de una unidad de fertilizante al suelo, es decir, 1 ppm o mg de P kg⁻¹ al suelo. Para una zona determinada, a mayor contenido de arcilla y a menor contenido de P extractable del suelo es necesario agregar más P para elevar la disponibilidad en 1 ppm (Rubio *et al.*, 2007).



- Referencias:
- ◆ Patrón
 - Muestra de Maíz
 - ▲ Muestra 38
 - × Muestra 44

Gráfico N° 13. Capacidad buffer a partir de P. Adicionado – P. Recuperado (Distintos colores indican suelos con distinto nivel de limo+arcilla).

El gráfico N° 13 muestra una función lineal, siendo la inversa de la pendiente (coeficiente b) de esta recta la Dosis Equivalente (DE).

$$P \text{ recup.} = 0,035 + 0,298 P \text{ adicionado}$$

Boschetti y Quintero (1998), encontraron una DE de 3,2 kg/ha de P; Agusti (2005) trabajando en un suelo de la zona de Río Cuarto encontró una DE de 3,38 kg/ ha de P. El trabajo actual para el grupo de suelos seleccionados del sur de Córdoba, arroja una DE de 3,35 kg/ ha de P. Esto indica que hay que agregar 3,35 kg de P para aumentar 1 ppm el P extractable del suelo.

CONCLUSIONES

A través de este trabajo, se encontró que un 65% del total de suelos analizados en el departamento Río Cuarto, posee un contenido de fósforo extractable de 12,5 ppm, siendo la frecuencia relativa menor, proporcionalmente, con el aumento de las ppm de fósforo extractable. El uso agrícola tiene los menores niveles de fósforo extractable y se diferencia significativamente del ganadero de baja perturbación. No se encontró correlación entre el P extractable con el contenido de arcilla y limo, ni con el pH; si hubo una correlación con un ajuste muy bajo entre el fósforo extractable y la materia orgánica.

En cuanto a la retención de fósforo de los suelos al agregado de fertilizantes, se encontró que los suelos que tienen mayor contenido de limo y arcilla retienen más fósforo y dejan menor disponibilidad del mismo para las plantas. A medida que se incorpora al suelo mayor cantidad de fósforo, mayor cantidad de este nutriente queda retenido por la fase sólida. No se encontró relación entre el fósforo retenido con el pH. En cuanto al fósforo retenido y la materia orgánica, no se encontró una correlación muy fuerte, pero hay una tendencia a aumentar el índice de retención con el aumento de la materia orgánica.

Por último, se obtuvo una dosis equivalente de 3,35 kg de fósforo para aumentar 1 ppm el P extractable del suelo, para un grupo de suelos agrícolas del departamento Río Cuarto, a partir de la relación entre P adicionado y P recuperado.

BIBLIOGRAFÍA

AGUSTI, L. P. 2005. Determinación del nivel crítico de fósforo en un suelo haplustol típico para el cultivo de trigo. Tesis de grado. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 35 p.

ANGELINI, H.; H. ECHEVERRIA; H. SAINZ ROZAS. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra Pampeana argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias. Vol. 38. Núm. 1. Enero-abril, 2012. Pp 33-39. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Buenos Aires, Argentina.

BACHMEIER, O. A. y A. A. ROLLÁN. 1994. Fosforo extractable en un suelo Haplustol éntico del área semiárida central de Córdoba, Argentina. Comparación de dos métodos de evaluación. Agriscientia, 1994, vol. xi: 23-28. Septiembre 1994.

BERNARDO, I.; M. BONGIOVANNI; E. R. HAMPP. 2009. El fósforo como indicador de procesos pedogenéticos y su relación con la disponibilidad para los cultivos. Trabajo Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables. Fósforo, Nitrogeno y Cultivos de Cobertura. AACCS. CERZOS - CONICET. Agosto 2009. Bahía Blanca, Buenos Aires.

BONGIOVANNI, M. D.; R. MARZARI; M. RON. 2010. Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y Sudeste de San Luis. Trabajo XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Junio de 2010, Rosario, Santa Fe, Argentina.

BOSCHETTI, G. N. y C. E. QUINTERO. 1998. ¿Cuánto fósforo aplico? Proyecto Fertilizar. INTA. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Univ. Nac. Entre Ríos. En: <http://www.fertilizando.com/articulos/Cuanto%20Fosforo%20Aplico.asp>. Consultado: 29/11/2016.

BOSCHETTI, G. N.; C. E. QUINTERO; R. A. BENAVIDEZ; L. GIUFFRE. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia argentina. Ciencia del Suelo 21 (1) 2003. Facultad de Ciencias Agropecuarias U.N.E.R. Paraná - Entre Ríos, Argentina. Mayo de 2003.

BRAY, R. H. y L. T. KURTZ. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils Soil Sci. 59:39-45.

DI RIENZO, J. A.; F. CASANOVES; M. G. BALZARINI; L. GONZALES; M. TABLADA; C.W. ROBLEDO. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

FAO. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behavior with agronomic information. Food and agriculture organization of the united nations. Rome, 2008. FAO fertilizer and plant nutrition bulletin 18.

GALANTINI, J. A.; H. KRUGER; L. SUÑER. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida Pampeana durante 13 años de trigo continuo. Revista Investigaciones Agropecuarias. Comisión Investigaciones Científicas, Pcia. Bs.As. EEA Bordenave del INTA. Volumen 34. Pp 13-31. Agosto 2005.

GALANTINI, J. A. y L. SUÑER. 2015. Efecto de la textura sobre los contenidos y distribución del fósforo en suelos de la región Semiárida Pampeana. Boletín electrónico Cerzos. CONICET. Año 14. Numero 27. Julio 2015.

GIUFFRÉ, L. 1989. Índices de sorción de fósforo y su relación con algunas propiedades de los suelos. Ciencia del Suelo – Volumen 7 – N° 1-2-1989. Pp 43-50.

HERNÁNDEZ, J y J. P. ZAMALVIDE. 1998. Procesos de retención de fósforo por los suelos evaluados a través de parámetros de suelo y planta. Agrociencia. Vol I. N° 2. Pag 48-63. Agosto de 1998.

KIESSLING, R. J.; J. A. GALANTINI; H. KRUGER; S. VENANZI. 2008. Formas de fósforo en un suelo con diferentes sistemas de labranza. Dpto. Agronomía-UNS. INTA Bordenave. Resumen del trabajo presentado en el VII Congreso Nacional de Trigo. Simposio nacional de cereales de siembra otoño invernal. Santa Rosa, La Pampa, 2008.

KRÜGER, H.; S. VENANZI; M. GIMÉNEZ. 2006. Análisis de suelo. ¿Por casa como andamos? Información adaptada del trabajo: Variación espacial y temporal de propiedades químicas en suelos del sudoeste bonaerense. INTA EEA. Bordenave. Presentado en el XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. Septiembre de 2006.

LABORATORIO DE SUELOS FERTILAB. 2015. Nutrición de cultivos de verano. Elaborado por Grupo Técnico de Fertilab. Mar del Plata, año 2015. En http://www.laboratoriofertilab.com.ar/Paginas/Newsletters/Comunicacion_tecnica_2015_3.pdf. Consultado: 17/10/2016.

LARSEN, S. 1967. Soil phosphorus. *Advan. Agron.* 19: 151-210.

MARSCHNER, H. 1993. Mineral nutrition of higher plants. Londres, Academic Press Ltd., Harcourt Brace y Co. Publishers.

MELGAR, R.; E. FRUTOS; M. L. GALETTO; H. VIVAS. 1995. El análisis de los suelos como predictor de la respuesta de la soja a la fertilización fosfatada. Compendio de trabajos presentados en 1er Congreso Nacional de Soja y 2da. Reunión Nacional de Oleaginosas. Pergamino, octubre de 1995. Tomo I. Pp. 167-174.

QUINTERO C. E.; N. G. BOSCHETTI; R. A. BENAVIDEZ. 1995. Fertilización fosfatada de pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos (Argentina). *Ciencia del Suelo*. AACS. 13(2):60-65.

QUINTERO, C. E. 2002. Dosificación del fósforo según tipos de suelos. Publicado en *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N° 16. Pp 8- 10. Diciembre de 2002.

QUIROGA, A. y A. BONO. 2012. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. EEA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas” Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pp 106-112. Noviembre, 2002.

ROJAS WALKER, C. 2003. El fosforo disponible y su incremento en los suelos degradados. Página 33 a 45. Centro Regional de Investigación Rayentué. Litueche, Hidango. Abril, 2003.

RUBIO, G.; M. J. CABELLO; F. H. GUTIÉRREZ BOEM. 2007. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? Cálculos para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS). A Publication of the International Plant Nutrition Institute (IPNI). Número 35, Setiembre 2007.

ANEXOS

La Tabla N°1 divide las muestras analizadas por uso agrícola, ganadero y ganadero de baja perturbación. La variable analizada corresponde a las ppm de P extractable. La cantidad de muestras agrícolas, ganaderas y ganaderas de baja perturbación analizadas fueron 71, 22 y 14 respectivamente.

En cuanto a la media, las ppm de P en el uso agrícola estuvieron alrededor de 17,27; en las 107 muestras. Las ppm de P en el uso ganadero estuvieron alrededor de 20,6; en las 107 muestras. Las ppm de P en el uso ganadero de baja perturbación estuvieron alrededor de 44,28; en las 107 muestras.

Siguiendo con la desviación estándar, las ppm de P se alejan en alrededor de 12,11 ppm de P del promedio que fue 17,27 ppm de P para el uso agrícola. Para el uso ganadero, las ppm de P se alejan de 14, 92 ppm de P del promedio que fue 20,6 ppm de P. Y para el uso ganadero de baja perturbación, las ppm de P se alejan de 31,63 ppm de P del promedio que fue 40,28 ppm de P.

En los tres casos de uso, el coeficiente de variación encontrado fue muy variable (más del 70 %). El rango en los tres casos también fue muy variable, lo que indica que en la muestra los valores son distintos.

La Tabla N° 2 muestra el análisis no paramétrico para datos que no tienen distribución normal. Para corroborar si las variables están asociadas linealmente a nivel poblacional se debe realizar una prueba de hipótesis. Es decir, comprobar si el uso y las ppm de P extractable están relacionados o asociados linealmente. El coeficiente de correlación lineal poblacional de Pearson (p) es menor al 5 %, por lo tanto se rechaza la hipótesis de que las variables están relacionadas linealmente. Además, no hay evidencia estadísticamente significativa para afirmar la correlación lineal entre las variables.

El Gráfico N°1 qqplot, el cual permite observar cuan cerca está la distribución de un conjunto de datos a alguna distribución ideal ó comparar la distribución de dos conjuntos de datos. La función qqplot grafica las funciones quantile de una muestra vs. la de la otra. Se observa que el qqplot no cambia por una transformación lineal de los datos, los puntos no siguen la recta lineal, por lo tanto, no se presenta una distribución normal.

Uso	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Agrícola	P ext	71	17,27	12,11	70,09	4,88	67,03
Ganadero	P ext	22	20,60	14,92	72,43	6,36	64,86
Ganadero BP	P ext	14	44,28	31,63	71,43	8,38	92,74

Tabla N°1. Estadísticos resultantes de InfoStat de P extractable.

Variable	Uso	N	Medias	D.E.	Medianas	Promedio
<u>rangos</u>	<u>H</u>	<u>p</u>				
P ext	Agricola	71	17,27	12,11	12,25	
			48,38	10,59	0,0050	
P ext	Ganadero	22	20,60	14,92	13,79	
			57,18			
P ext	Ganadero BP	14	44,28	31,63	40,85	
			77,50			

Tabla N°2. Test de Kruskal Wallis de P extractable.

Trat.	Ranks
Agricola	48,38 A
Ganadero	57,18 A B
Ganadero BP	77,50 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

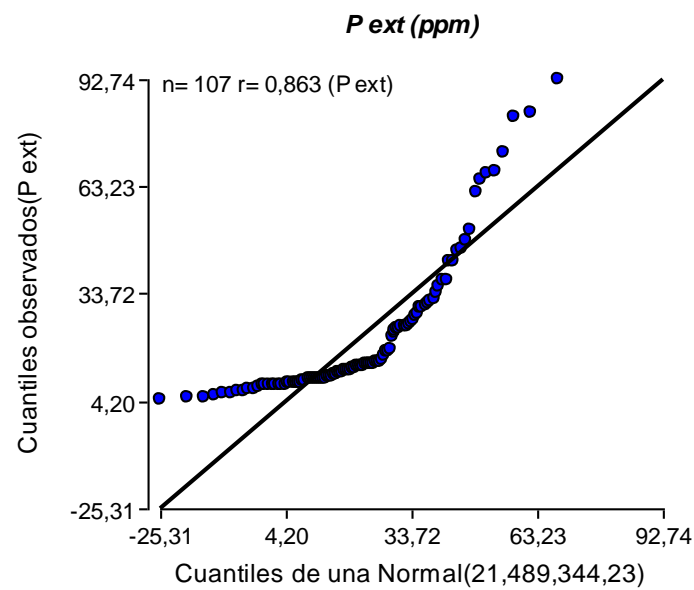


Gráfico N°1. QQPlot de P extractable.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
P ext	98	0,02	0,01	314,24	841,53	849,29

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows
const	27,52	4,81	17,97	37,07	5,72	<0,0001	
A+L	-0,17	0,11	-0,38	0,05	-1,54	0,1268	3,36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	715,16	1	715,16	2,37	0,1268
A+L	715,16	1	715,16	2,37	0,1268
Error	28938,94	96	301,45		
Total	29654,10	97			

Tabla N° 3. Regresión Arena + Limo

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
P ext	85	0,04	0,02	278,45	720,78	728,11

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows
const	60,38	22,91	14,80	105,96	2,64	0,0100	
pH	-6,37	3,64	-13,60	0,87	-1,75	0,0837	4,04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	824,99	1	824,99	3,07	0,0837
pH	824,99	1	824,99	3,07	0,0837
Error	22335,18	83	269,10		
Total	23160,18	84			

Tabla N° 4. Regresión pH.**Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
P ext	85	0,02	0,01	283,18	722,26	729,58

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
<u>CpMallows</u>						
const	49,75	23,42	3,17	96,33	2,12	0,0366
pH pot	-5,67	4,51	-14,63	3,30	-1,26	0,2120
	2,58					

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	433,18	1	433,18	1,58	0,2120
pH pot	433,18	1	433,18	1,58	0,2120
Error	22727,00	83	273,82		
Total	23160,18	84			

Tabla N° 5. Regresión pH potencial.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
P ext	92	0,12	0,11	292,57	779,60	787,17

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
<u>CpMallows</u>						
const	3,82	5,22	-6,55	14,19	0,73	0,4659
MO0-10	8,26	2,40	3,49	13,04	3,44	0,0009
	12,71					

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3174,63	1	3174,63	11,82	0,0009
MO0-10	3174,63	1	3174,63	11,82	0,0009
Error	24164,13	90	268,49		
Total	27338,76	91			

Tabla N° 6. Regresión Materia orgánica (0-10 cm).

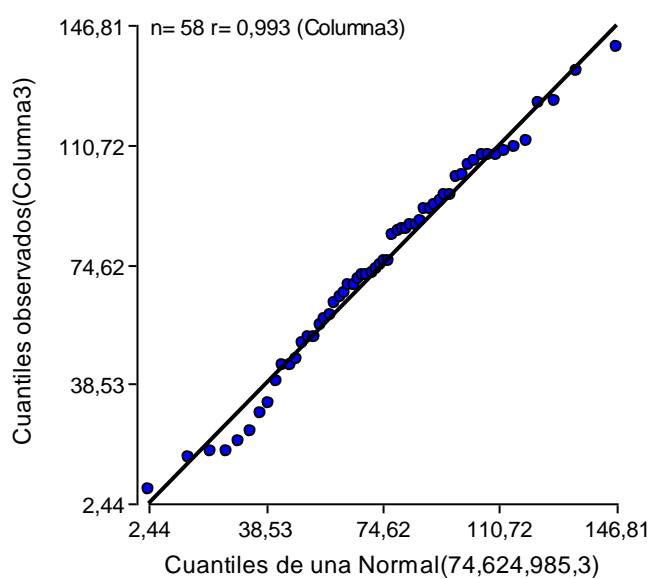


Gráfico N° 2. Normalidad del los datos de IRP.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Columna3	58	0,20	0,12	39,46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	11076,50	5	2215,30	2,56	0,0385
Columna1	11076,50	5	2215,30	2,56	0,0385
Error	45085,34	52	867,03		
Total	56161,84	57			

Test:Duncan Alfa=0,05

Error: 867,0259 gl: 52

Columna1	Medias	n	E.E.			
10-30	56,86	11	8,88	A		
30-40	62,18	14	7,87	A	B	
60-70	77,97	3	17,00	A	B	C
40-50	82,05	19	6,76	A	B	C
50-60	93,90	9	9,82		B	C
70-80	97,12	2	20,82			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Columna5	Columna2	Variable	n	Media
10-20	8	Columna3	1	2,20
10-20	15	Columna3	1	4,30
10-20	30	Columna3	1	6,50
10-20	60	Columna3	1	16,70
40-50	8	Columna3	1	2,60
40-50	15	Columna3	1	5,20
40-50	30	Columna3	1	7,30
40-50	60	Columna3	1	18,50

50-60	8	Columna3	1	2,70
50-60	15	Columna3	1	4,60
50-60	30	Columna3	1	7,40
50-60	60	Columna3	1	18,10
70-80	8	Columna3	1	4,00
70-80	15	Columna3	1	4,60
70-80	30	Columna3	1	7,10
70-80	60	Columna3	1	20,60

Tabla N° 7. Analisis de Varianza IRP