

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**PROFUNDIDAD DE MUESTREO Y MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE P  
EXTRACTABLE EN SUELO PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA  
FERTILIDAD EN PASTURAS**

**por**

**W. Robin CUADRO LÓPEZ**

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
*Magister* en Ciencias Agrarias  
opción Ciencias del Suelo

MONTEVIDEO

URUGUAY

Setiembre 2019

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. PhD Fernando García; Ing Agr. PhD Jorge Hernández, y Ing Agr PhD Marcelo Ferrando, el 3 de setiembre de 2019. Autor/a: W. Robin Cuadro. Director Ing Agr. PhD. Andrés Quincke, Co-directora Ing Agr. PhD Amabelia Del Pino.

Dedico este trabajo a mi familia por estar siempre presente, brindándome el apoyo y la comprensión en todo momento durante este largo proceso.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director de tesis Andrés Quincke, por la dedicación y consejos recibidos durante toda esta etapa.

A Monica Cadenazzi, que realmente me dio una gran mano y conocimientos durante el proceso de análisis de la información.

A Amabelia del Pino por las sugerencias recibidas en las etapas iniciales tan importante a la hora de ir definiendo objetivos.

Al director de programa de pasturas Ing Agr. (PhD) Fernando Lattanzi por haberme brindado todo el apoyo y confianza en poder realizar esta capacitación, así como también aportando sugerencias durante los procesos de análisis.

A todo el equipo de pasturas que formo parte de la red de ensayos de fertilización: Alejandro Morón, Diego Giorello; Andrés Quincke; Raúl Bermúdez, Virginia Pravia, Walter Ayala, que me permitieron el uso de toda la información generada en dicha red para poder utilizarla y sacar los resultados que aquí son presentados.

A INIA por darme la oportunidad de ser parte del equipo de investigadores del Programa Nacional de Pasturas y Forrajes, y haberme permitido realizar esta capacitación.

Al personal de apoyo: Orosildo Presa, Máximo Suárez, David Lima y Mauricio Silveira por el apoyo recibido en las actividades de campo y laboratorio, que permitieron poder llegar con la información que hoy se presenta en esta tesis.

Al equipo técnico de pasturas de INIA Tacuarembó Rafel Reyno, Martín Jaurena, Diego Giorello, Javier Do Canto, por toda la ayuda recibida ante las diversas consultas realizadas y apoyo para la culminación de la tesis.

A mis compañeros de Maestría, Fiorella Cazulli, Daniela Correa, Zully Ramos por el trabajo realizado en conjunto en varios cursos realizados.

A los integrantes del tribunal de los seminarios I, II y defensa de tesis.

## TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	VIII
SUMMARY.....	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.2.1. <u>Marco general</u> .....	2
1.2.2. <u>Fuentes de P</u> .....	7
1.2.3. <u>Estratificación del P en el perfil del suelo</u> .....	8
1.2.4. <u>Profundidad de muestreo</u> .....	9
1.2.5. <u>Métodos para estimar P en suelo</u> .....	10
1.2.6. <u>Modelos de análisis de P extractable en suelos</u> .....	13
1.2.7. <u>Objetivos del presente trabajo</u> .....	15
2. <u>COMPARACIÓN DE DOS PROFUNDIDADES DE MUESTREO DE FÓSFORO EN SUELO EN PASTURAS DE LEGUMINOSAS SEMBRADAS AL VOLEO</u> .....	17
2.1 RESUMEN.....	18
2.2 SUMMARY.....	19
2.3 INTRODUCCIÓN.....	20
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.4.1 <u>Fuente de información</u> .....	23
2.4.2. <u>Determinaciones realizadas</u> .....	26
2.4.2.1. Análisis de P extractable en suelo.....	26
2.4.2.2. Determinaciones en la pastura.....	27
2.4.3. <u>Descripción de la base de datos analizada</u> .....	27
2.4.4. <u>Procedimiento del análisis estadístico</u> .....	29
2.5. RESULTADOS .....	31

2.5.1. <u>Productividad de forraje</u> .....	31
2.5.2. <u>Estratificación del fósforo en el suelo</u> .....	32
2.5.3. <u>Evolución del fósforo en los primeros 15 cm del perfil del suelo</u> .....	33
2.5.4. <u>Relaciones entre rendimiento relativo (RR) y análisis de suelo (Metodología ALCC)</u> .....	35
2.5.5. <u>Análisis de varianza de los <math>r^2</math></u> .....	36
2.5.6. <u>Efecto de la profundidad de muestreo</u> .....	37
2.6. DISCUSIÓN.....	40
2.7. CONCLUSIONES.....	43
2.8. BIBLIOGRAFÍA.....	44
3. <u>COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE FÓSFORO EN SUELO PARA PASTURAS DE LEGUMINOSAS</u> ...	50
3.1. RESUMEN.....	51
3.2 SUMMARY.....	52
3.3 INTRODUCCIÓN.....	53
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	56
3.4.1. <u>Fuente de información</u> .....	56
3.4.2. <u>Determinaciones realizadas</u> .....	59
3.4.2.1. <u>Análisis de P extractable en suelo</u> .....	59
3.4.2.2. <u>Determinaciones en la pastura</u> .....	61
3.4.3. <u>Descripción de la base de datos analizada</u> .....	61
3.4.4. <u>Procedimiento de análisis estadístico</u> .....	63
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
3.5.1. <u>Productividad de pasturas</u> .....	65
3.5.2. <u>Relaciones entre rendimiento relativo (RR) y análisis de suelo</u> .....	66
3.5.3. <u>Análisis de los coeficientes de determinación (<math>r^2</math>)</u> ...	66
3.5.4. <u>Efecto de la interacción entre el método de análisis de P extractable en el suelo y la fuente de P utilizada</u> .....	69
3.5.5. <u>Correlaciones entre los diferentes métodos de</u>	74

<u>análisis</u> .....	
3.6. DISCUSIÓN.....	76
3.6.1. <u>Diferencias entre métodos cuando se usa FN</u> .....	76
3.6.2. <u>Diferencias entre métodos cuando se usa ST</u> .....	78
3.7. CONCLUSIONES.....	80
3.8. BIBLIOGRAFÍA.....	81
4. <u>DISCUSIÓN FINAL</u> .....	86
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	89
6. <u>ANEXOS</u> .....	103

# PROFUNDIDAD DE MUESTREO Y MÉTODO DE DETERMINACIÓN DE P EXTRACTABLE EN SUELO PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIDAD EN PASTURAS

## RESUMEN

En Uruguay, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes para la fertilización fosfatada de pasturas presentan limitantes en la valoración del fósforo (P) extractable en suelo, en algunos suelos del país o con distinta historia de fertilización. Los objetivos propuestos son: i) Comparar las profundidades de muestreo de suelo (0-7,5 vs. 0-15 cm) y ii) Comparar tres métodos de extracción de P en suelo por su correlación con la respuesta vegetal. Se analizó la información de una red de 14 sitios sobre diferentes suelos en Uruguay, sobre dos pasturas (*Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*), dos tipos de fuentes de P: fosforita natural (FN) y superfosfato triple (ST) y 7 regímenes de dosis de P. Se efectuaron mediciones anuales de producción de forraje. El P en suelo fue analizado a dos profundidades de muestreo (0-7,5 y 0-15 cm), utilizando tres métodos analíticos (Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico). Se ajustaron modelos de regresión lineal entre el rendimiento relativo y los valores de P en suelo, usando el modelo del arcoseno-logaritmo (ALCC). La profundidad de muestreo no tuvo efecto sobre la correlación de los distintos métodos con la respuesta en producción anual. Para suelos fertilizados con FN, el método del ácido cítrico mostró las mayores correlaciones. En cambio, para suelos fertilizados con ST, los métodos Bray I y del ácido cítrico fueron los de mejor ajuste, sin diferencias entre ellos. Desde el punto de vista de la correlación, no habría razones para recomendar un muestreo de suelo más superficial. El método del ácido cítrico ha mostrado en general un buen comportamiento para el total de los suelos y fuentes evaluadas, aunque para fuentes solubles, el Bray I tiene menor variabilidad que cítrico en los valores de P en suelo.

**Palabras claves:** Correlación, ácido cítrico, profundidad de muestreo.



## **SAMPLING DEPTH AND SOIL P TEST METHOD FOR ASSESSING P FERTILITY IN PASTURES**

### **SUMMARY**

Guidelines and recommendations for P fertilization of pastures in Uruguay offer limitations in assessing P availability in some soil types or some fertilization histories. Proposed objectives are: i) to compare two sampling depths (0-7.5 vs. 0-15 cm) and ii) to compare three soil P test methods, based on the correlation between soil P test and plant response. The data source was a set of trials on 14 sites established on different soils of Uruguay, with annual forage yield records of either *Trifolium repens* or *Lotus corniculatus*. Treatment factors were P source (phosphate rock and triple superphosphate) and seven P rate regimes. Soil test P was measured at two sampling depths (0-7.5 and 0-15 cm), using three analytical methods (Bray I, resins and citric acid). Lineal regression models were adjusted between relative yield and soil P test using the arcsine-logarithm model (ALCC). Soil sampling depth had no effect on correlation between soil P test methods and annual yield response. When soils had been fertilized with rock phosphate, citric acid had higher correlations. However, when soils had been fertilized with triple superphosphate, Bray I and citric acid had higher correlations, with no difference among them. Based on correlations, there would be no reasons for recommending the shallow sampling depth. With regards to soil P test methods, citric acid had in general a good performance and P sources, although for soluble P sources, Bray I had lower variability than citric acid.

**Keywords:** correlation, citric acid, sampling depth

## 1. INTRODUCCIÓN

Producir más alimentos de una manera sostenible manteniendo la calidad del medio ambiente, presenta a la comunidad científica desafíos sin paralelo que requieren nuevos enfoques y nuevas formas de pensar (Godfray et al., 2010). Mientras que tales enfoques pueden implicar mejorar el potencial de rendimiento de los cultivos, se están haciendo grandes esfuerzos para mejorar la eficiencia en el suministro de nutrientes esenciales para el rendimiento de los cultivos y la calidad del producto (Doberman y Cassman, 2002).

A diferencia de la era preindustrial, los fertilizantes químicos en la actualidad son fundamentales para la producción sostenida de cultivos y la seguridad alimentaria (Roy et al., 2006). Más de la mitad de la producción mundial de alimentos de hoy se atribuye a nutrientes aplicados con los fertilizantes, una fracción que probablemente aumentará en el futuro (Stewart et al., 2005).

El fósforo (P) es el segundo elemento en importancia después del nitrógeno para sostener el rendimiento de los cultivos (Kashchandra, 2005.). Es esencial para la vida, y el aporte de fertilizante fosfatado es fundamental para la producción creciente de alimentos, carne, fibra, ante una creciente población mundial; teniendo implicaciones para el medio ambiente en términos de eutrofización (Delgado y Scalenghe, 2008).

La pérdida de fósforo producto de manejos inadecuados de fertilización se ha convertido en un problema ambiental extendido que contribuyó a la eutrofización del agua en las últimas décadas (Sharpley et al., 1994; Pierzynski y Logan, 1993). Este fenómeno es particularmente evidente en zonas donde la producción agropecuaria es más intensiva.

Para contribuir a un manejo más eficiente del P desde el punto de vista productivo y ambiental, es necesario poder contar con estudios de respuesta de cultivos y pasturas, relacionándolo con lo que el suelo puede aportar.

Ante esto, un elemento básico en cualquier programa de análisis de suelo es identificar un extractante y procedimiento adecuado para valorar el aporte de P del suelo para la absorción por parte de las plantas. Esta información sirve como una guía para las necesidades de fertilización seguida de una calibración apropiada con los estudios a campo. Esta calibración permitirá manejar criterios más seguros respecto a la fertilización fosfatada, evitando así el uso de dosis de P por encima de las necesarias, lo cual tendría implicancias negativas no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista ambiental, frente a eventos de riesgo que contribuyan a la eutrofización de aguas superficiales.

## **1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **1.2.1. Marco general**

La competitividad de la producción de carne y leche de Uruguay se basa en gran medida en la rentabilidad del sistema pastoril. A su vez, es ampliamente conocido que se necesita contar con especies leguminosas forrajeras para aumentar la producción de forraje, tanto en cantidad como en calidad, y así lograr intensificar la producción pecuaria. Sin embargo, los suelos del Uruguay son naturalmente deficientes en su capacidad de suministro de fósforo (P) (Morón, 2008; Barbazán *et al.*, 2007) y, por lo tanto, el fertilizante fosfatado es un insumo central en pasturas a base de leguminosas. Por ello, la fertilización fosfatada es un pilar fundamental en la productividad ganadera. Esto ha sido comprobado sobre varios tipos de pasturas en diferentes zonas del país (Risso *et al.*, 2014; Bermúdez *et al.*, 2008; Hernández, 2008a; Morón, 2008).

El fertilizante fosfatado está hecho de roca fosfórica (RF), un recurso natural no renovable. Existen depósitos de roca fosfórica en todo el mundo y algunos son explotados principalmente como materia prima para la producción de fertilizantes fosfatados solubles en agua (Zapata, 2007).

Durante la última década, ha habido preocupación de que en el mundo pronto se agotarían los recursos de RF, y se enfrentaría a una escasez de P. Sin embargo, las estimaciones recientes y exhaustivas de la oferta mundial de RF indican que una crisis de P no es inminente, y que no nos quedaremos sin RF pronto (Steve, *et. al.*; 2013). La International Fertilizer Development Center (IFDC) reveló más reservas de RF de las que se habían informado en el año 2010 por parte de la United States Geologic Survey (USGS).

El P es un elemento esencial e insustituible en todas las células vivas. La importancia del P para la vida ha centrado la atención en el uso eficiente de P en la agricultura en los últimos años por tres razones principales. En primer lugar, la roca fosfórica a partir de la cual se hacen los fertilizantes fosfatados es un recurso finito, no renovable, y debe utilizarse eficientemente para maximizar su vida útil. En segundo lugar, es necesario mantener y mejorar el estado P de muchos suelos, para el crecimiento de los cultivos, y pasturas. Tercero, puede llegar a ser el determinante principal del efecto adverso de la eutrofización en cuerpos de agua superficiales (Johnston *et. al.*, 2014).

Prácticamente todos los fertilizantes inorgánicos actuales se producen a partir de RF. La roca fosfórica se encuentra tanto en depósitos sedimentarios como en depósitos ígneos a través del mundo. La mayoría (80 a 90%) de la RF utilizada para producir fertilizante es de origen sedimentario. Los depósitos sedimentarios son algunas veces llamadas fosforitas. La apatita, un mineral de fosfato de calcio, es el principal componente de P de la RF.

Las fertilizaciones deben producir un aumento deseado en los rendimientos de las pasturas, cultivos y en la calidad de los mismos, para de esta manera evitar los riesgos asociados al mal manejo de los fertilizantes, que da como resultado la degradación potencial del medio ambiente. Para que esto suceda el primer paso es mantener el fertilizante en la zona más próxima de

la raíz y disponible para la planta, integrando la gestión de todos los recursos y técnicas involucradas para que eso suceda (Hochmuth y Hanlon, 2010).

No obstante, en las últimas décadas se ha observado una creciente preocupación mundial, debido a que el uso de fertilizantes fosfatados más allá de los requerimientos de los cultivos, y su consecuente pérdida por escurrimiento o erosión hacia cursos de agua, ha promovido la eutrofización de los mismos. Dicho proceso se caracteriza por un aumento en el crecimiento de algas no deseadas y malezas acuáticas, seguido de escasez de oxígeno a medida que se descompone la biomasa. En los últimos tiempos, el foco de atención sobre el uso del P en los sistemas agropecuarios ha aumentado la demanda de información sobre métodos de análisis de suelo, agua y materiales residuales para formas de P relevantes para el medio ambiente (Kovar y Pierzynski, 2009)

La situación política que rodea el uso de fertilizantes a menudo distorsiona las recomendaciones de fertilización. Algunos argumentan que los fertilizantes han causado un considerable daño ambiental, mientras que otros promueven el uso de fertilizantes, por la mejora en el rendimiento y la calidad de los cultivos y pasturas. De hecho, ambas opiniones son correctas. La única forma de documentar y decidir sobre recomendaciones apropiadas de fertilización es a través de un fuerte enfoque científico, para que las preocupaciones y los problemas de ambos lados se aborden y expliquen con exactitud (Hochmuth y Hanlon, 2010).

Es importante tener en cuenta, que las recomendaciones originadas en otras zonas, con diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales, pueden llegar a ser menos eficientes en el lugar que a nosotros nos interesa fertilizar (Hochmuth y Hanlon, 2010).

En la última parte del siglo 20, en las recomendaciones de fertilización se comenzaron a incorporar referencias más fuertes relacionadas al manejo de los fertilizantes en el contexto de la protección del medio ambiente. Hoy en

día, las recomendaciones de fertilización deben considerar tanto la parte productiva y económica, como así también de mantener un suministro de alimentos seguro y un ambiente saludable (Hochmuth y Hanlon, 2010).

Así, el concepto central del Manejo Responsable de Nutrientes es realizar, para cada situación específica, un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de la “fuente” correcta de nutrientes, en la “dosis” correcta, en el “momento” correcto y en la “forma” correcta (Correndo y García, 2016).

La situación general es que, aunque la cantidad total de P en el suelo puede ser alta (Hernández *et al.*, 1995), a menudo está presente en formas no disponibles o en formas que solo están disponibles fuera de la rizosfera. Pocos suelos no fertilizados liberan P lo suficientemente rápido como para soportar las altas tasas de crecimiento de las especies de plantas de cultivo. Además, luego de realizar una fertilización con P, la recuperación de dicho P por parte de las plantas en una temporada de crecimiento es relativamente baja, porque más del 80% del P se vuelve no disponible debido a procesos de adsorción, precipitación o inmovilización (Holford, citado por Schachtman *et al.*, 1998).

La oferta del P por parte del suelo se estima usualmente a través del análisis de las formas “disponibles” o “extractables” presentes. Los análisis de suelos con fines de diagnóstico de fertilidad son extracciones químicas y/o bioquímicas rápidas que intentan estimar la disponibilidad de nutrientes (Havlin *et al.*, 2005; Sims, 2000). El desarrollo del análisis de suelos como diagnóstico requiere de una inversión significativa en recursos técnicos, económicos y de tiempo. Esta sería una razón importante para explicar por qué a nivel mundial los estudios de correlación y calibración, que fueron numerosos en distintos países entre las décadas de 1950 y 1970, se han reducido notablemente en las últimas décadas (Fixen, 2005).

La implementación de programas de diagnóstico de fertilidad, basados en el análisis de suelo, involucran seis etapas principales, partiendo normalmente

de redes de ensayo de campo: 1) Muestreo, 2) Análisis de laboratorio, 3) Correlación, 4) Calibración, 5) Interpretación, y 6) Recomendaciones (Havlin *et al.*, 2005; Walsh y Beaton, 1973).

Varios equipos de investigadores nacionales han revisado y resumido la trayectoria de experimentación e investigación sobre el tema (Bordoli, 2007; Morón, 2007). En general, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes presentan limitantes para implementar un adecuado manejo de la fertilización fosfatada en forma generalizada a nivel de país.

Los métodos de determinación del P del suelo se pueden agrupar en: a) métodos que utilizan soluciones extractantes, y b) métodos que se basan en reacciones de adsorción-desorción (resinas catiónicas y membranas de intercambio, papeles impregnados). Los métodos más comunes utilizados local e internacionalmente son los primeros. Ellos se basan en extraer parte de la fracción más lábil del P del suelo, principalmente inorgánica. Los distintos extractantes se ajustan a las diferentes características edáficas como pH, mineralogía y la fracción de P inorgánico dominante del suelo (García *et al.*, 2009).

A medida que los científicos se enfocan en el destino del P aplicado a los suelos, se ha vuelto cada vez más claro que se necesitan métodos de análisis de P extractable en suelos que permitan la comparación de los resultados a través de las fronteras regionales (Kovar y Pierzynski, 2009). Por el contrario, los métodos de análisis de suelo se desarrollaron con una alta prioridad para satisfacer las necesidades locales.

Como resultado, se han desarrollado muchas variaciones locales en los extractantes y procedimientos de laboratorio para lograr un análisis oportuno y una mejor correlación con las respuestas de las plantas dentro de regiones bien definidas. Los criterios de selección acerca de cuál método es el mejor, incluye la precisión del método para predecir las respuestas de los cultivos y

la aceptación general por parte de los técnicos en el campo de los análisis de suelo.

Otro factor importante relacionado al factor eficiencia en el uso del P es el método de aplicación y fuentes de P utilizadas. Con la incorporación de la tecnología del cero laboreo se han producido varios cambios en las condiciones del suelo y de crecimiento de los cultivos. Estos cambios afectan la disponibilidad de nutrientes a diferentes profundidades del suelo, la temperatura y contenido de agua de los suelos, el crecimiento y distribución de los sistemas radiculares, la absorción de nutrientes por parte de los cultivos y la eficiencia de uso de los fertilizantes aplicados y, por lo tanto, pueden llegar a afectar las técnicas recomendadas de muestreo de suelo (Bordoli, 2001).

### **1.2.2. Fuentes de P**

La posibilidad de la utilización de otras fuentes de P alternativas a los fosfatos solubles al agua (Superfosfato) ha sido explorada e investigada en distintos países desde las primeras décadas del Siglo XX. El principal motivo de la exploración de fuentes alternativas generalmente ha sido de carácter económico. Actualmente se agregan otras consideraciones, como es la producción de alimentos denominados «naturales» u «orgánicos» que promueven la utilización de fosforitas en detrimento de los superfosfatos (Morón, 2002).

El tipo de fuente de P puede jugar un papel importante en la eficiencia biológica y económica de producción de estas pasturas. En suelos ácidos, del tipo de los dominantes en esta región, las fosforitas pueden compararse e incluso aventajar a la fuente más común, el superfosfato (Morón, 2002).

Los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como los superfosfatos son fabricados y comúnmente recomendados para corregir las deficiencias fosfóricas; sin embargo, la mayoría de los países en desarrollo deben



importar estos fertilizantes, los que se encuentran en cantidades limitadas y representan un gran desembolso para los pequeños agricultores. Además, la intensificación de la producción agrícola requiere la aplicación de P no sólo para aumentar la producción de los cultivos sino también para mejorar el nivel de este elemento en los suelos y así evitar una mayor degradación de éstos.

Bajo ciertas condiciones de suelo y de clima, la aplicación directa de las rocas fosfóricas, especialmente si se hallan disponibles localmente, ha demostrado ser una alternativa interesante a los superfosfatos, tanto agronómica como económicamente, ya que estos últimos son de mayor costo (Risso *et. al.*, 2014).

### **1.2.3. Estratificación del P en el perfil del suelo**

Una característica de la dinámica de P en los sistemas de siembra directa (SD) es la estratificación del P dentro del horizonte superficial. Se encuentran mayores concentraciones de P disponible en la capa más superficial del suelo (Mallarino y Borges, 2006; Scheiner y Lavado, 1998; Guertal *et al.*, 1991; Kitchen *et al.*, 1990; Weil *et. al.*, 1988)

Varios procesos pueden explicar este fenómeno, como son, la acumulación de residuos en superficie; aplicación superficial de fertilizantes fosfatados, ausencia del mezclado de suelo; aumento de materia orgánica, que además de aportar P, puede disminuir la capacidad de fijación del P del suelo (Mallarino y Borges, 2006; Guppy *et al.*, 2005; Calviño, citado por García y Picone, 2004; Scheiner y Lavado, 1998).

Las implicancias para el sistema pueden ser positivas o negativas, dependiendo del proceso en cuestión. Los residuos superficiales mantienen el suelo más húmedo, mejorando la velocidad de difusión del P hacia las raíces. Paralelamente, la menor mezcla del suelo con el fertilizante disminuye la fijación y aumenta la saturación de los sitios de fijación de P,

dejando un mayor porcentaje del P total disponible para reponer lo que ha sido absorbido por las plantas (Sweeney, citado por Galantini *et. al.*, 2007).

Por otro lado, las implicancias negativas que podemos tener pueden estar asociadas a un mayor riesgo ambiental debido al lavado del P que se genera por los procesos de erosión, preferentemente de las capas más superficiales y finas de suelo, producto de las lluvias (Morgan, 2005; Sharpley y Rekolainen, 1997), lo que lleva a la contaminación de las aguas superficiales en las zonas más bajas del terreno (Sharpley *et. al.*, 2000). En las plantas, hay un cambio en la arquitectura radicular, provocando un mayor desarrollo y concentración de raíces en las zonas del suelo con más P (Barber y Stanley, 1995), que al ubicarse en el estrato superior puede dejar expuestas a las plantas a una mayor susceptibilidad al déficit hídrico, incluso provocando la disminución de la absorción de P (Simpson y Pinkerton, 1989).

#### **1.2.4. Profundidad de muestreo**

Otro problema asociado a esta estratificación de nutrientes inmóviles, es la profundidad de muestreo de suelos para estimar disponibilidad de nutrientes. En Uruguay no existe acuerdo entre los distintos institutos de investigación sobre la profundidad de muestreo para análisis de P en suelo. Resulta así muy importante el análisis de este tema, ya que es posible que se encuentren diferencias significativas en los resultados obtenidos muestreando a diferentes profundidades.

Según Welch, citado por del Pino y Ruiz (1986), al variar la fertilidad con la profundidad del suelo, puede introducirse un error considerable en el análisis de suelo a través de muestras obtenidas desde una profundidad inadecuada. Las técnicas estadísticas demuestran que las variaciones en profundidad de muestreo son la fuente más importante de error (Hantiaux, citado por del Pino y Ruiz, 1986)

En el caso particular de P, se ha hipotetizado que, con la expansión de la siembra directa, se podrían lograr mejores ajustes muestreando a profundidades menores de 0-20 cm. Sin embargo, las evaluaciones realizadas no han mostrado mejoras en el ajuste del método muestreando a 0-5 ó 0-10 cm de profundidad (Zamuner *et al.*, 2004; Zamuner *et al.*, 2003), y adicionalmente, los datos tienen mayor variabilidad (Ferraris, 2005).

Se ha sugerido una profundidad de muestreo menor (0-7,5 cm) a la convencional como forma de no subestimar la disponibilidad para los cultivos. Pero al cambiar la profundidad de muestreo es necesario proceder a calibrar estos valores para interpretarlos correctamente en términos de disponibilidad para el cultivo y redefinir niveles críticos (Bordoli, citado por Bordoli, 2001).

No obstante, Calviño *et al.* (2000) observaron que a pesar de los cambios debidos a la estratificación de P en el suelo, es posible diagnosticar los requerimientos de P en trigo con la misma profundidad de muestreo en laboreo convencional o SD.

#### **1.2.5. Métodos para estimar P en suelo**

El análisis de suelos nos provee la información básica para el desarrollo de las recomendaciones de fertilización, siendo confiable en la medida en que se trabaje con datos representativos de cada situación y se realicen las correspondientes calibraciones locales (Correndo y García, 2012).

Se ha demostrado que las cantidades de fosfato lábil extraídas por algunos análisis de suelo tienden a disminuir con el aumento de la capacidad buffer de los suelos (Holford y Mattingly, citado por Holford, 1980). Debido a que la magnitud de este efecto, y por lo tanto la sensibilidad relativa a la capacidad buffer varía entre los análisis de suelo, es razonable suponer que la capacidad buffer es una propiedad importante del suelo que influye en las

interrelaciones entre los análisis de suelo, principalmente de aquellos que extraen el P a partir de formas lábiles (Holford, 1980b).

Los métodos de extracción química extraen selectivamente los compuestos de P (compuestos generalmente solubles y débilmente adsorbidos de P) del suelo para estimar el P que está disponible para la absorción de las plantas durante una estación de crecimiento. El P extraído se calibra empíricamente contra la captación real del cultivo o la probabilidad de respuesta a la fertilización (Simard, citado por Ziadi, *et. al.*, 2013; Heckman *et al.*, 2006).

Es importante tener en cuenta que los extractantes químicos utilizados en las diversas técnicas para extraer el P extractable informan sobre la fracción de P lábil que incluye también el P en solución. La cantidad de P solubilizado será directamente proporcional a la energía del extractante utilizado. Esta energía depende de la composición del extractante, la que, a su vez, determina su pH y el tipo de interacción extractante-matriz de suelo (Bachmeier y Rollán, 1994). Desde las primeras investigaciones realizadas en Uruguay, se reportan que varias propiedades del suelo están influyendo sobre la capacidad predictiva de los diferentes métodos existentes. Dentro de ellas se mencionan la capacidad buffer, el pH, tipo y clase de arcilla y la humedad.

En Uruguay, en la década del 70, (Zamalvide *et al.*, 1975) evaluaron los métodos Bray I (Bray y Kurtz, 1945), Olsen, Mehlich 1 y Resinas catiónicas (Zamuz y Castro, 1974), desde el punto de vista de su poder predictivo de la disponibilidad de P para las plantas. En este estudio, el método Bray I permitió extraer cantidades significativas de P-Al y P-Fe, pero no de P-Ca. Por lo tanto, en suelos donde la forma dominante del P disponible fuera P-Ca, el método Bray I podría presentar muy baja correlación.

El método de resinas catiónicas resultó en las mayores correlaciones con los índices de disponibilidad (en el primer corte). Según los autores, este método permitió extraer cantidades significativas no sólo de P-Al y P-Fe,

sino también de P-Ca. Sin embargo, los autores interpretan que la extracción de P-Ca por parte de este método podría ser algo excesiva respecto a la disponibilidad de P para la planta.

El resultado de dicho estudio mostró que todos los métodos podían ser usados como indicadores de disponibilidad de P, aunque los diferentes métodos muestran diferencias en su capacidad predictiva, acentuándose éstas cuando se consideran diferentes tipos de suelos (Hernández, 2008b). Por ejemplo, Zamalvide *et al.* (1975) encontraron que para resinas catiónicas, los suelos de textura pesada (praderas negras de Paysandú y Río Negro) presentaron un comportamiento diferente respecto al resto de los suelos. Como posibles explicaciones, los autores indican que estos suelos pesados tendrían mayor capacidad de intercambio catiónico y también habría diferencias en las formas de P en el suelo (mayor proporción de P-Ca).

Posteriormente, en el año 1976 la Estación Experimental La Estanzuela del Centro de Investigaciones Agrícolas “Alberto Boerger” sintetizó la información generada en una “Guía para Fertilización de Pasturas”. Del análisis de dicha información se fueron constatando algunas limitaciones las cuales han presentado un grado variable de avance en el conocimiento: a) diferentes extractantes según diferentes suelos, b) coeficientes de los parámetros de la dinámica de P en el suelo, c) factores biológicos y físico-químicos que afectan la disponibilidad de P, d) respuestas diferenciales entre especies de leguminosas, e) pérdidas de P por factor animal (productos y deyecciones), f) profundidad de la toma de muestras de suelo, g) el análisis de planta como herramienta de diagnóstico, y h) utilización de diferentes fertilizantes fosfatados. El método Bray I, el más usado en nuestro país, realiza adecuadamente la estimación de P disponible para las plantas en la mayoría de los suelos de uso agrícola, de texturas medias y pesadas del sur y del litoral oeste. Sin embargo, presenta problemas de interpretación de los valores resultantes del análisis en suelos arenosos y en suelos con

alta actividad de carbonatos de calcio como son los suelos poco profundos sobre Fray Bentos. Para este tipo de suelos sería necesario realizar una calibración diferente de los valores (Bordoli y Mallarino, 1998).

En suelos sobre basalto, el método Bray extrae bajas cantidades de P, encontrándose toda la curva de respuesta a P entre valores tan cercanos como 3-6 ppm (Hernández, *et al.*, 2013), por lo que habría que seleccionar otro método, que posea mejor poder predictivo (Bordoli y Mallarino, 1998).

Otros métodos analíticos han sido evaluados más recientemente. Morón (2007) llevó adelante un relevamiento sobre cultivos de trébol blanco en la zona Este, evaluando el método del ácido cítrico, revelando que dicho método tendría una mejor asociación con el contenido de P en planta, en comparación con los métodos de resinas catiónicas y Bray I. En un estudio posterior sobre suelos de basamento cristalino, el mismo investigador evaluó la respuesta a P con *Lotus subbiflorus* cv El Rincón usando distintas fuentes de P, y encontró que el método del ácido cítrico (junto con el método de resinas catiónicas) tuvo mayor capacidad predictiva que el método Bray I.

Estudios más recientes, realizados por Bracco y Hernández (2018), sobre suelos de basamento cristalino ubicados en la cuenca del Río Santa Lucía, encontraron que para estos tipos de suelos, Bray I y cítrico presentaron altas correlaciones entre sí para una profundidad de muestreo de 0-7,5 cm, indicando que ambos métodos estimarían cantidades proporcionales de P en el suelo.

#### **1.2.6. Modelos de análisis de P extractable en suelos**

La calibración resulta indispensable para la interpretación de los análisis extractivos de nutrientes poco móviles. La precisión de las calibraciones disminuye con la heterogeneidad de los suelos y cultivos involucrados (Ron, 2014). La modelización matemática con los resultados de los ensayos se

relaciona con el rendimiento o la respuesta a la fertilización con un nutriente y su disponibilidad en el suelo.

En general, existe mucha dispersión de los datos cuando analizamos este tipo de variables. Dichas dispersiones son a menudo resueltas realizando estandarizaciones en función del tipo de variable que estamos analizando, por ejemplo, expresando el rendimiento en términos de rendimiento relativo (RR).

El método más utilizado para ajustar modelos de regresión es el de mínimos cuadrados ordinarios (MC). Un supuesto para utilizar correctamente este tipo de modelos es que solo la variable dependiente (por ejemplo, RR) es aleatoria, mientras que la variable regresora (por ejemplo, el análisis de suelo) tiene que ser fija y libre de error. Este enfoque es especialmente válido para los casos en los que la variable regresora es verdaderamente fija, como la dosis de fertilización. Pero con el caso de los valores de análisis de suelo esta variable no es fija y no está controlada por el investigador. Aun así, los investigadores continúan considerándola como fija.

En este sentido, se ha señalado que la regresión por MC se encuentra sobre-utilizada en el campo de la ciencia del suelo (Webster, citado por Correndo, 2018). Es así como, con este tipo de regresiones, la relación que aparece es bivariada, por lo cual debe describirse como tal y no como predictiva. Es necesario considerar una distribución conjunta de ambas variables llamada "bivariante o bivariada", cuyo caso más simple se denomina "normal bivariada" (Legendre y Legendre, 1998)

Dyson y Conyers (2013), han propuesto un tipo de análisis para la calibración de análisis de suelos cuando se aplica a un sistema de recomendación. El método se denomina curva de calibración del arcoseno logaritmo, ALCC por sus siglas en inglés (Arcsine Logarithm Calibration Curve), y ha sido desarrollado para determinar niveles críticos de análisis de suelo (ASC) para nitrógeno, fósforo, potasio y azufre y potencial de

respuesta en varios cultivos de grano en Australia (Anderson *et al.*, 2013; Bell *et al.*, 2013; Brennan y Bell, 2013).

Los autores resaltan que las estimaciones de los intervalos de confianza de la metodología son, a menudo, muy amplios como para realizar recomendaciones prácticas y comparaciones entre set de datos. Tal es así, que ellos sugieren reducir el nivel de confianza del 95% ( $P = 0,05$ ) al 70% ( $P = 0,30$ ) en ciertas comparaciones (Watmuff *et al.*, 2013).

No obstante, Correndo (2018) sugiere que es posible obtener estimaciones más precisas de los ASC sin la necesidad de reducir el nivel de confianza, sino mediante la modificación de pasos específicos de la metodología. Con esta metodología es posible obtener niveles críticos e intervalos de confianza más precisos, así como otros parámetros estadísticos que permiten poder comparar diferentes modelos entre sí.

Un aspecto muy importante, que se debe tener en cuenta y que no siempre sucede, es el hecho de que para que las calibraciones y recomendaciones realizadas tengan su validez en una aplicación “a posteriori”, deben ser realizadas bajo el mismo rango de condiciones manejadas en la etapa de calibración, en cuanto al manejo de la tecnología de fertilización, profundidad de muestreo, etc. (Ron, 2014).

### **1.2.7. Objetivos del presente trabajo**

Considerando los antecedentes generales del tema, presentados en párrafos anteriores, el presente trabajo se realizó con dos objetivos principales. Éstos fueron abordados en dos capítulos, de la siguiente manera:

Objetivo del artículo 1: determinar la incidencia de la profundidad de muestreo sobre el grado de ajuste entre los valores de P extractable en suelo y el rendimiento de las pasturas.



Objetivo del artículo 2: comparar el grado de ajuste de tres métodos de extracción de P en suelo (Bray I, ácido cítrico y resinas catiónicas) por su correlación entre los valores de P en suelo con la respuesta vegetal, para un conjunto de suelos diferentes, sobre dos tipos de pasturas fertilizadas con dos tipos de fuentes de P.

## **2. COMPARACIÓN DE DOS PROFUNDIDADES DE MUESTREO DE FÓSFORO EN SUELO EN PASTURAS DE LEGUMINOSAS SEMBRADAS AL VOLEO**

Cuadro Robin<sup>1</sup>, Quincke Andrés<sup>2</sup>.

*<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Estación Experimental INIA Tacuarembó. Ruta 5 km 386, Tacuarembó, Uruguay. Correo electrónico: [rcuadro@inia.org.uy](mailto:rcuadro@inia.org.uy)*

*<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Estación Experimental INIA La Estanzuela. Ruta 50 km 11, Colonia, Uruguay.*

*Artículo para ser presentado en Revista Agrocencia (Uruguay)*

## 2.1. RESUMEN

En Uruguay, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes de fertilización de pasturas presentan algunas limitantes, entre las que se encuentran, la determinación de la profundidad de muestreo más adecuada a los sistemas actuales de producción. El objetivo de este trabajo es comparar dos profundidades de muestreo por la correlación entre el P extractable en suelo y la respuesta en rendimiento anual de pasturas de leguminosas. Se analizó la información de una red de 14 sitios sobre diferentes suelos en Uruguay. Esta red incluyó: dos pasturas (*Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*), dos tipos de fuentes de fósforo (fosforita natural y superfosfato triple) y 7 regímenes de dosis de P. Se efectuaron mediciones anuales de producción de forraje durante 2 años. El P en suelo fue analizado a dos profundidades de muestreo (0-7,5 y 0-15 cm) utilizando tres métodos analíticos (Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico). Se ajustaron modelos de regresión lineal entre el rendimiento relativo de cada año y los valores de P en suelo, usando el modelo del arcoseno-logaritmo (ALCC). El aumento de P extractable debido a la fertilización fue mayor en el estrato 0-7,5 cm que en el de 7,5-15 cm. De todos modos, también se observó un enriquecimiento en P del estrato más bajo de suelo, comparando con el testigo. A pesar de eso, la profundidad de muestreo no tuvo efecto sobre la correlación entre el P extractable y la respuesta en producción anual de las leguminosas. Estos resultados llevarían a concluir que, desde de punto de vista de la correlación, no habría razones para recomendar un muestreo de suelo más superficial que el utilizado actualmente.

**Palabras claves:** ácido cítrico, correlación, pasturas, análisis de suelo.

## 2.2. SUMMARY

Guidelines and recommendations for pasture fertilization at Uruguay have limitations. One of them is establishing the most appropriate sampling depth according to current production systems. The objective is to compare two sampling depths by the correlation between soil P test and annual yield of legume pastures. Data from a network of 14 sites located on different soils of Uruguay were used. This included two pure pastures (*Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*), two P sources (rock phosphate and triple superphosphate), and 7 P rate regimes. Annual forage yield was recorded. Soil P test was analyzed for at two sampling depths (0-7.5 and 7.5–15 cm) using three analytical methods (Bray I, resins and citric acid). Lineal regression models were adjusted between relative yield and soil P test using the arcsine-logarithm model (ALCC). The increase in soil P test due to fertilization was higher for 0-7.5 than 7.5-15 cm. P enrichment in the second sampling layer was also observed. Nevertheless, sampling depth had no effect on the correlation between soil P test and annual forage yield response. It is concluded that, based on correlation, there are no reasons for recommending a shallower sampling depth than the currently utilized.

**Key words:** citric acid, correlation, pastures, soil P test.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

La fertilización fosfatada de pasturas ha sido objeto de intensos esfuerzos de investigación de distintos grupos. Por otra parte, varios autores nacionales han revisado y resumido la trayectoria de experimentación e investigación sobre el tema. En general, se reconocen limitantes para implementar pautas y recomendaciones para un adecuado manejo de la fertilización fosfatada en forma generalizada a nivel de país (Morón, 2007; Bordoli, 2007).

Se reconoce la importancia de un buen muestreo de suelos, sin embargo, siempre existen inquietudes sobre cuán intensivo y frecuente debe ser el muestreo y a qué profundidad debe llegar, particularmente por el gran interés que genera el manejo específico por sitio o agricultura de precisión (Roberts y Henry, 2001).

El cero laboreo produce varios cambios en las condiciones del suelo y de crecimiento de los cultivos. Estos cambios afectan la disponibilidad de nutrientes a diferentes profundidades del suelo, la temperatura y contenido de agua de los suelos, el crecimiento y distribución de los sistemas radiculares, la absorción de nutrientes por parte de los cultivos y la eficiencia de uso de los fertilizantes aplicados (Bordoli, 2001). En Uruguay no existe acuerdo entre los distintos institutos de investigación sobre la profundidad de muestreo para análisis de P en suelo. Resulta así muy importante el análisis de este tema, ya que es posible que se encuentren diferencias significativas en los resultados obtenidos muestreando a diferentes profundidades.

En el caso particular de P, se ha hipotetizado que, con la expansión de la siembra directa (SD), se podrían lograr mejores ajustes muestreando a profundidades menores a la profundidad de laboreo de 0-20 cm. Sin embargo, las evaluaciones realizadas no han mostrado mejoras en el ajuste del método muestreando a 0-5 ó 0-10 cm de profundidad (Zamuner *et al.*, 2004; Zamuner *et al.*, 2003), y se ha observado que los datos presentan

mayor variabilidad (Ferraris, 2005). Según Welch y Fits citado por del Pino y Ruiz (1986), al variar la fertilidad con la profundidad del suelo, puede introducirse un error considerable en el análisis de suelo a través de muestras obtenidas desde una profundidad inadecuada. Las técnicas estadísticas demuestran que las variaciones en profundidad de muestreo son la fuente más importante de error (Hantiaux, citado por del Pino y Ruiz, 1986).

El sistema de preparación del suelo (siembra directa o laboreo convencional) así como la colocación de fertilizantes afectan la distribución del P en el suelo (Mallarino y Borges, 2006). El sistema de siembra directa produce una mayor concentración y disponibilidad del P en el suelo superficial que el logrado con labranza convencional (Scheiner y Lavado, 1998; Guertal *et al.*, 1991; Kitchen *et al.*, 1990). Esto es producto, entre otros factores, del aumento de materia orgánica, que además de aportar P, puede disminuir la capacidad de fijación del P del suelo (Guppy *et al.*, 2005) y a la aplicación superficial de fertilizantes fosfatados (Calviño, citado por García y Picone, 2004; Scheiner y Lavado, 1998). Por otro lado, Galantini *et al.* (2007) señalan que las diferencias más importantes entre sistemas de labranza se encontraron en la cantidad ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y no en la concentración ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) de las diferentes formas de P, como consecuencia de los cambios de densidad aparente.

Además, los residuos superficiales mantienen el suelo más húmedo, mejorando la velocidad de difusión del P hacia las raíces. Paralelamente, la menor mezcla del suelo con el fertilizante disminuye la fijación y aumenta la saturación de los sitios de fijación de P, dejando un mayor porcentaje del P total disponible para reponer lo que ha sido absorbido por las plantas (Sweeney, citado por Galantini *et al.*, 2007).

Se ha sugerido una profundidad de muestreo menor (0-7,5 cm) a la convencional como forma de no subestimar la disponibilidad para los

cultivos. Pero al cambiar la profundidad de muestreo es necesario proceder a calibrar estos valores para interpretarlos correctamente en términos de disponibilidad para el cultivo y redefinir niveles críticos (Bordoli, 2001; Zamalvide, 1996). Por lo tanto, con el propósito de responder a la pregunta de cuál es la profundidad de muestreo óptima para realizar recomendaciones de fertilización, se planteó este trabajo con el objetivo de comparar dos profundidades de muestreo de suelo a través de la correlación entre el P extractable en el suelo y la respuesta en rendimiento anual de las pasturas de leguminosas sembradas.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1 Fuente de información

La información analizada consistió en el análisis de la base de datos generada por INIA, a partir de experimentos de campo instalados en 14 sitios ubicados en diferentes zonas del país (Figura 1, Cuadro 1), sobre dos tipos de pasturas *Trifolium repens* (Trébol blanco, TB) y *Lotus corniculatus* (LC). El periodo experimental se desarrolló durante los años 2008 y 2012. En el Cuadro 1 y 2 del anexo se presenta la información fisicoquímica detallada de cada suelo en función de la profundidad de muestreo realizada.



Figura 1. Mapa de ubicación de los sitios experimentales de la red de ensayos de fertilización de pasturas.



Cuadro 1. Identificación y características edáficas de los sitios experimentales de la Red de Fertilización de Pasturas.

<b>Nombre sitio</b>	<b>Tipo de Suelos</b>	<b>Material generador</b>
La Carolina	Brunosol Éútrico Lúvico.	Sedimentos cuaternarios sobre Cristalino
Trinidad	Brunosol Subéútrico Típico	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino
Florida	Brunosol Dístrico Háplico	Cristalino
Pan de Azúcar	Inceptisol Melánico	Cristalino
Palo a Pique	Brunosol Subéútrico Lúvico	Sedimentos poco espesos y gravillosos sobre Cristalino
Isla Patrulla	Luvisol Melánico Típico	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino alterado
Tres Puentes	Brunosol Subéútrico Típico	Sedimentos Pelíticos Grises
Rincón	Planosol Subéútrico	Sedimentos limo arcillosos
Sauce Cañote	Planosol Dístrico Ocrico	Sedimentos
Tambores	Brunosol Éútrico Vértico	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto
Glencoe	Vertisol Háplico	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto
Ombúes	Vertisol Rúptico Típico	Sedimentos cuaternarios
Young	Brunosol Éútrico Típico	Sedimentos cuaternarios sobre Fray Bentos
Palmitas	Brunosol Subéútrico Lúvico	Sedimentos arenosos sobre Cretáceo

En las Figuras 2, 3 y 4, se presentan diagramas de cajas (box plot) resumiendo las principales características fisicoquímicas de los 14 suelos estudiados.

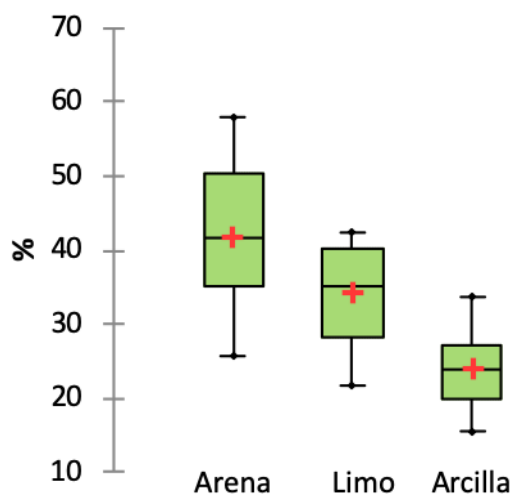


Figura 2. Valores promedio (+), mediana y cuantiles (0,05, 0,25, 0,75 y 0,95) del contenido de arena (%), limo (%) y arcilla (%) de los diferentes suelos estudiados, para una profundidad de muestreo de 15 cm.

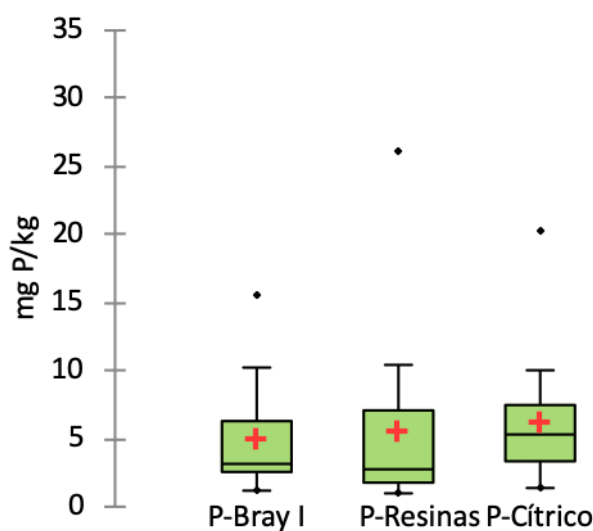


Figura 3. Contenido inicial de fósforo ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) extractable del suelo promedio (+) y medianas, de los diferentes suelos estudiados, según método de análisis, para una profundidad de muestreo de 15 cm.

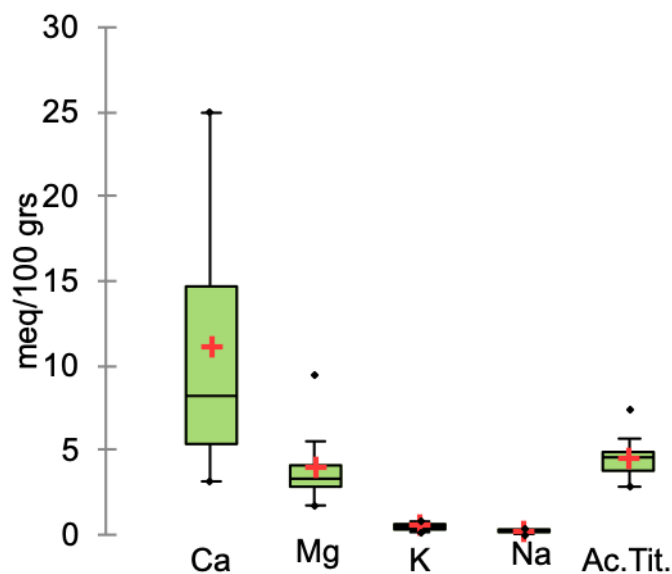


Figura 4. Valores promedio (+) (meq 100 g<sup>-1</sup>) y medianas de algunas propiedades químicas de los diferentes suelos estudiados, para una profundidad de muestreo de 15 cm.

Si bien en todos los sitios se buscó que la pastura previa fuera campo natural sin historia de fertilización alguna y que presentaran niveles bajos de P extractable en suelo, en dos sitios (Ombúes y Palmitas) los mismos recibieron agregados previos de P de algún tipo, lo que se ve reflejado claramente en los valores iniciales de 12,6 y 10,2 ppm Bray, respectivamente. En el caso de Ombúes, posiblemente haya habido redistribución de P vía deyecciones animales, mientras que en el caso de Palmitas es posible que haya habido historia de fertilización asociado a un manejo de rotación agrícola-ganadera del predio.

## 2.4.2. Determinaciones realizadas

### 2.4.2.1. Análisis de P extractable en suelo

Todos los años en marzo-abril se colectaron muestras de suelo a dos profundidades de muestreo (0-7,5 cm y 7,5-15,0 cm) para determinar el contenido de P extractable del suelo por tres métodos analíticos: Bray I (Bray y Kurtz, 1945); resinas catiónicas (Zamuz y Castro, 1974) y ácido cítrico

(Dyer, 1894), modificando la concentración del ácido al 0,5%. El contenido de P en suelo para la profundidad de 0-15 cm fue calculado como el promedio de P en extractable de 0-7,5 cm y 7,5-15 cm.

#### **2.4.2.2 Determinaciones en la pastura**

La producción de forraje (materia seca) se calculó anualmente mediante la suma de las producciones estacionales. Los cortes de forraje se realizaban con cortadora a motor, dejando una altura del forraje remanente de 5 cm. Previo al corte en cada parcela se efectuaba determinación visual de la composición botánica, separando los siguientes componentes: % de la especie sembrada; % malezas; % suelo desnudo, % otras especies. La producción total estacional se corrigió por el porcentaje de cobertura de la especie sembrada para obtener la producción anual de forraje de la especie evaluada. Para cada año se calculó el rendimiento relativo (RR) anual de la especie sembrada de cada parcela, tomando como 100% la parcela de mayor rendimiento de cada bloque para cada fuente ( $RR = \text{Rendimiento observado} / \text{Rendimiento máximo} * 100$ ).

#### **2.4.3. Descripción de la base de datos analizada**

Todos los experimentos instalados en cada sitio tenían un diseño experimental de bloques completos aleatorizados (DBCA), con cuatro repeticiones. Sobre cada pastura se evaluaron dos fuentes de P: superfosfato triple (ST 0-46/46-0) y fosforita natural de Argelia (FN 0-10/29-0), aplicados al voleo con diferentes niveles iniciales y de refertilización (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tratamientos evaluados

Fuente de P	Dosis inicial (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Dosis refertilización anual (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
Testigo	0	0
ST	120	0
ST	240	0
ST	120	30
ST	240	60
FN	120	0
FN	240	0
FN	120	30
FN	240	60

*Nota: ST: Superfosfato triple (0-46/46-0); FN: Fosforita natural Argelia (0-10-29-0)*

En 12 de los sitios (Young, Palmitas, La Carolina, Flores, Florida, Pan de Azúcar, Palo a Pique, Cuchilla los Ladrones, Rincón de Ramírez, Minas de Corrales, Tambores, y Glencoe), la información de producción de forraje correspondió al segundo y tercer año de la pastura (2009 y 2010), mientras en los dos restantes (La Carolina y Sauce Cañote) correspondieron a los años 2010 y 2011.

Basado en la información recolectada en el campo se procedió al análisis de outliers y casos de no respuesta al factor dosis de P. De dicho análisis se excluyeron dos ensayos, uno debido a la baja implantación de la pastura sembrada (trébol blanco en el sitio de Cuchilla los Ladrones) y otro por baja respuesta debido a que se partía de niveles altos de P en suelo (trébol blanco en el sitio de Palmitas).

#### **2.4.4. Procedimiento del análisis estadístico**

El análisis estadístico se realizó esencialmente en dos etapas.

Etapa 1 de análisis: las mediciones de P extractable en suelo de cada año, para las combinaciones de sitio, especie, fuente, profundidad de muestreo y método de análisis de P extractable, fueron relacionadas con el rendimiento relativo (RR) de dicho año, ajustando modelos de regresión lineal.

El ajuste entre ambas variables fue realizado utilizando el método denominado curva de calibración del arcoseno-logartimo (ALCC) modificado por Correndo *et al.* (2017a). El ALCC modificado, permite estimar con mayor precisión las correlaciones entre las dos variables estudiadas, tomando en cuenta sus aleatoriedades, así como también tener comparaciones más confiables entre conjuntos de datos a través del uso de los coeficientes de determinación ( $r^2$ ).

Para las calibraciones mediante el método ALCC modificado, se utilizó una hoja de cálculo de Microsoft Excel® desarrollada como herramienta de ajuste del modelo, denominada “Modified ALCC Tool” (Correndo *et al.*, 2017b).

A partir de las regresiones generadas producto de las combinaciones mencionadas anteriormente se procedió a trabajar con aquellas donde la correlación fue significativa ( $p < 0,05$ ), generando una tabla con los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) y los cuadrados medios del error de cada curva de ajuste.

Etapa 2 de análisis: se procedió a efectuar un análisis de varianza utilizando los  $r^2$  de las regresiones como variable de respuesta, y las 5 variables clasificatorias mencionadas como los factores de variación.

El modelo completo ajustado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + L_k + Sp_j + F_i + Prof_i + M_s + (L * Sp)_{kj} + (L * F)_{ki} + (Lp * Prof)_{kl} + (L * M)_{ks} + (Sp * F)_{ji} + (Sp * Prof)_{jl} + (Sp * M)_{js} + (F * Prof)_{il} + (F * M)_{is} + (Prof * M)_{ls} + \varepsilon$$

$\mu$  = media

$L_k$  = efecto Sitio

$Sp_j$  = efecto especie

$F_i$  = efecto fuente de P

$Prof_i$  = efecto profundidad de muestreo

$M_s$  = efecto método analítico

$\varepsilon$  = error experimental

Como forma de poder evaluar la capacidad de ajuste de los modelos, se tomó como criterio el coeficiente de regresión y el cuadrado medio del error de las regresiones. Los modelos seleccionados por su mayor capacidad de ajuste son aquellos que tienen un menor valor de este último criterio (Posada y Noguera, 2007). Para el análisis de toda la información, se utilizó el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et. al.*, 2018).

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1. Productividad de forraje

El rango de producciones de forraje que se obtuvieron se presenta en la Figura 5. Las producciones anuales promedio fueron muy similares entre el promedio de ambas fuentes y entre ambas especies. Los valores mínimos y máximos fueron, para TB entre 0-8200 kg MS/ha y para LC 0-7500 kg MS/ha, respectivamente.

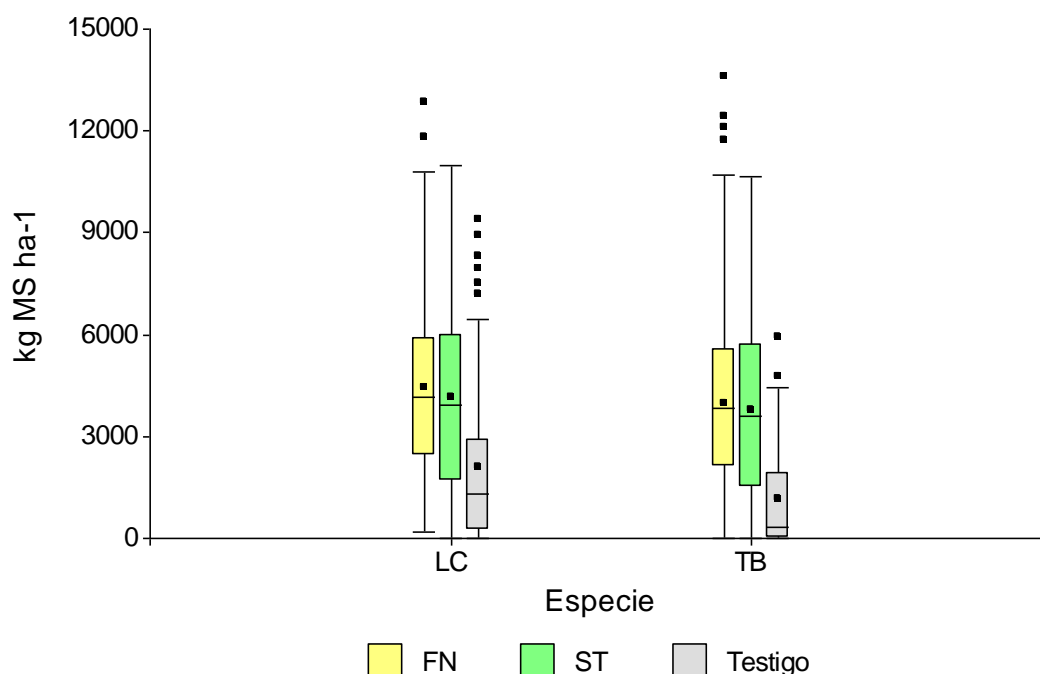


Figura 5. Distribución de las productividades anuales promedio de forraje (kg/ha/año) de *Lotus corniculatus* (LC) y trébol blanco (TB), según fuente de P utilizada (FN: fosforita natural; ST: superfosfato triple). Son productividades promedio de todas las dosis.

### 2.5.2. Estratificación del fósforo en el suelo

La variabilidad de P extractable observada en el transcurso de los 4 años de evaluación de los ensayos y la estratificación de P extractable se presentan en los Cuadros 3 y 4, respectivamente.



Cuadro 3. Rangos de P extractable (mínimos y máximos) observados en los 4 años de estudios, para las dos profundidades de muestreo, los tres métodos de análisis, y las dos fuentes de P y el testigo sin fertilización.

Profundidad	Fuente de P	Bray		Resinas		Ac. Cítrico	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
0-7,5 cm	Testigo	1,2	23,8	1,0	19	1,3	47,8
	FN	1,1	33,3	1,5	157,2	1,1	137,1
	ST	1,2	50,6	1,8	86,2	1,2	126,6
7,5-15 cm	Testigo	0,8	12,9	1,1	23,9	1,0	23,3
	FN	1,1	24,9	1,2	115,5	1,0	61,0
	ST	1,2	28,4	1,2	40,9	1,1	47,4

FN: fosforita natural; ST: super triple

Cuadro 4. Relación del contenido de P extractable en suelo entre diferentes profundidades de muestreo, en función del método de análisis al cuarto año de evaluación, para el promedio de dosis de cada fuente.

Relación 0-7,5/7,5-15 cm			
	Bray I	Resinas catiónicas	Ácido cítrico
Testigo*	1,3 b A	1,2 b A	1,2 b A
FN	1,9 a B	4,1 a A	3,7 a A
ST	2,0 a A	1,7 b B	1,7 b B

\*Sin fertilización. Medias con letras minúsculas diferentes en una misma columna son diferentes estadísticamente ( $p < 0,05$ ). Medias con letras mayúsculas diferentes en una misma fila presentan diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ).

En todas las situaciones se estableció un menor contenido de P extractable en el suelo para la mayor profundidad de muestreo. El grado de estratificación observado luego de 4 años de fertilizaciones al voleo, depende del método de análisis y la fuente de P utilizada. Para ambas fuentes, la estratificación medida con el método Bray I fue mayor que el

testigo ( $p < 0,05$ ), pero no se observaron diferencias significativas entre FN y ST ( $p < 0,05$ ). Los métodos de resinas catiónicas y del ácido cítrico presentaron una mayor estratificación del P cuando se usó FN, no presentado diferencias con el testigo cuando la fuente utilizada fue ST ( $p < 0,05$ ).

Cuando se usa FN, los métodos de resinas catiónicas y del ácido cítrico logran detectar una mayor estratificación del P que el método Bray I ( $p < 0,05$ ). Opuestamente, para la fertilización con ST el método Bray I detecta una mayor estratificación, no habiendo diferencias entre los métodos resinas catiónicas y ácido cítrico ( $p < 0,05$ ). En las parcelas testigo, no hay diferencias significativas en la relación de estratificación entre los tres métodos utilizados.

### **2.5.3. Evolución del fósforo en los primeros 15 cm del perfil del suelo**

En la Figura 6, se presenta la diferencia de P extractable en suelo entre el cuarto año y el año de inicio, para los dos estratos de profundidad muestreados (0-7,5 cm y 7,5 -15 cm).

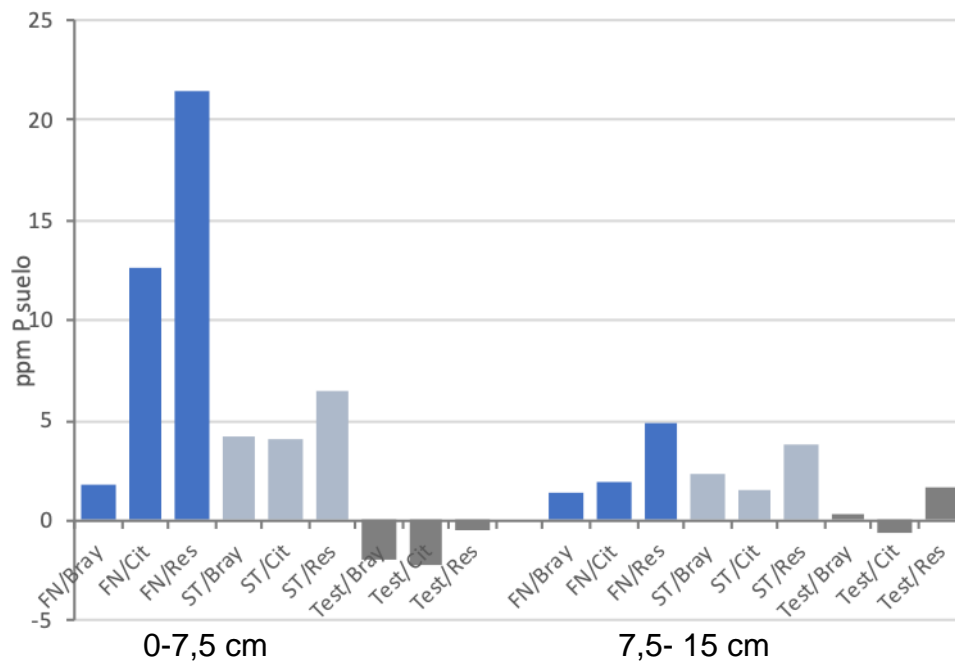


Figura 6. Diferencia en el contenido de P extractable en suelo entre el año 2012 y el año 2008 (promedio de todas las dosis), luego de aplicados los tratamientos de fertilización inicial y refertilización por tres años, en función de la profundidad de muestreo, método de análisis y fuente de P aplicado.

La fertilización produce un aumento diferencial del contenido de P en suelo. Luego de 4 años con fertilizaciones anuales, en ambos estratos de muestreo se observan aumentos de P extractable. Dicho incremento fue mayor en los primeros 7,5 cm de suelo con respecto al segundo estrato de profundidad (7,5- 15 cm). A su vez, dicho aumento fue mayor cuando se usó FN en comparación que ST. El método de resinas catiónicas es el que registra los mayores incrementos de P extractable en ambos estratos de profundidad y ambas fuentes. En las parcelas testigo (sin refertilización) se observó un leve descenso en los valores de P extractable en suelo para los primeros 7,5 cm. Para la segunda profundidad (7,5-15 cm) con Bray I y ácido cítrico, la diferencia fue cercana a cero, presentando para resinas catiónicas un leve aumento del P en ese estrato de suelo.

**2.5.4. Relaciones entre rendimiento relativo (RR) y análisis de suelo (Metodología ALCC)**

Aplicando la metodología del ALCC se generó una población inicial de 696 curvas de calibración (n=232 Bray I; n= 231 Ácido cítrico, n= 231 Resinas catiónicas), de las cuales se seleccionaron 497 que fueron estadísticamente significantes ( $p < 0,05$ ). En el Cuadro 5 se presenta una descripción de la estructura de la base de datos utilizada para los análisis.

Cuadro 5. Número de curvas de calibración generadas con la metodología ALCC, según método de análisis, profundidad de muestreo y fuente de P evaluada.

Base	Total	Método análisis			Profundidad de muestreo (cm)		Fuente P	
		Bray I	Ácido cítrico	Resinas catiónicas	0-7,5	0-15	ST	FN
Total	697	232	231	231	346	348	346	348
$p < 0,05$	497	166	167	164	247	250	247	250

*ST: superfosfato triple; FN: fosforita natural*

### **2.5.5. Análisis de varianza de los $r^2$**

Para el análisis de varianza utilizando como variable el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de las 497 curvas de calibración, se estudiaron primeramente los supuestos de distribución normal del error y de homogeneidad de varianzas. A partir del análisis de los residuos del modelo se obtuvo el Q-Q plot ( $r^2= 0,998$ ) y se realizó el test de Shapiro Wilks ( $p= 0,378$ ), resultando los errores con distribución normal. Se estudió la homogeneidad de varianzas mediante el test de Levene ( $p=0,067$ ) y mediante el método gráfico de la dispersión de los residuos versus los valores predichos, resultando dichas varianzas homogéneas (Anexo, Figura 2).

El rango de los  $r^2$  obtenidos estuvo entre 0,25 y 0,86. Estudios anteriores realizados por Dyson y Conyers, (2013), basados en la aplicación de esta metodología de análisis, reportaron que la mayoría de los  $r^2$  que surgen de la relación entre estas variables (P extractable en suelo vs RR) se ubican entre 0,25 y 0,7, y que perfectamente se podrían ajustar por esta metodología.

El ANOVA del  $r^2$  se presenta en el Cuadro 6. Si bien se presentan los resultados del modelo completo, en el presente trabajo se estudiará solamente el efecto de la profundidad de muestreo y sus interacciones con los demás factores.

Cuadro 6. Análisis de varianza (SC tipo III) para el coeficiente de determinación de las curvas de calibración entre P suelo y respuesta vegetal.

<b>F.V.</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>p-valor</b>
Modelo.	89	0,09	<0,0001
Sitio	13	0,13	<0,0001
Especie	1	0,08	0,044
Fuente	1	0,48	<0,0001
<b><u>Profundidad</u></b>	<b><u>1</u></b>	<b><u>0,00</u></b>	<b><u>0,694</u></b>
Método	2	0,28	<0,0001
Sitio*Especie	10	0,20	<0,0001
Sitio*Fuente	13	0,10	<0,0001
<b><u>Sitio*Profundidad</u></b>	<b><u>13</u></b>	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>0,767</u></b>
Sitio*Método	26	0,03	0,191
Especie*Fuente	1	0,01	0,543
<b><u>Especie*Profundidad</u></b>	<b><u>1</u></b>	<b><u>0,01</u></b>	<b><u>0,462</u></b>
Especie*Método	2	0,03	0,287
<b><u>Fuente*Profundidad</u></b>	<b><u>1</u></b>	<b><u>0,02</u></b>	<b><u>0,306</u></b>
Fuente*Método	2	0,29	<0,0001
<b><u>Profundidad*Método</u></b>	<b><u>2</u></b>	<b><u>0,00</u></b>	<b><u>0,958</u></b>
Error	407	0,02	
Total	496		

### **2.5.6. Efecto de la profundidad de muestreo**

La profundidad de muestreo no fue un efecto significativo sobre el coeficiente de determinación de las curvas de calibración entre el valor de P extractable en suelo y la producción de forraje de la pastura. Tampoco fueron significativas las interacciones con el sitio, la especie, tipo de fuente y el método de análisis.

El análisis de la raíz del cuadrado medio del error del P extractable a partir de las curvas de calibración mencionadas permite comparar la precisión del P extractable según profundidad de muestreo. Debido al tipo de variable utilizada, se efectuó un análisis no paramétrico (Kruskal Wallis) que se presenta en el Cuadro 7 y la separación de medias en el Cuadro 8.

Cuadro 7. Análisis de Kruskal Wallis para la variable cuadrado medio del error (RMSE) del análisis de suelo de P extractable.

Variable	Profundidad	N	D.E	Medianas	P
RMSE P extractable	0-7,5 cm	210	11,8	6,9	<0,0001
	0-15 cm	209	5,6	3,8	

Cuadro 8. Separación de medias para la variable raíz del cuadrado medio del error (RMSE en mg kg<sup>-1</sup> de P) del análisis de suelo, según profundidad de muestreo

Profundidad	RMSE	
<b>0- 7,5 cm</b>	11,3	A
<b>0-15 cm</b>	5,9	B

La profundidad de muestreo afectó significativamente la raíz del cuadrado medio del error. El análisis de P extractable en la mayor profundidad de muestreo (0-15 cm) presentó la menor varianza residual que con la menor profundidad de muestreo (0-7,5 cm).

Como otra medida para poder comparar la precisión de la estimación entre ambas variables cuándo se comparan las dos profundidades de muestreo, se analizó el ancho del intervalo de confianza (IC) para los valores de

umbrales de P en suelo (promedio de las dos pasturas) estimados con la metodología ALCC a un 90% de rendimiento relativo (Figura 7).

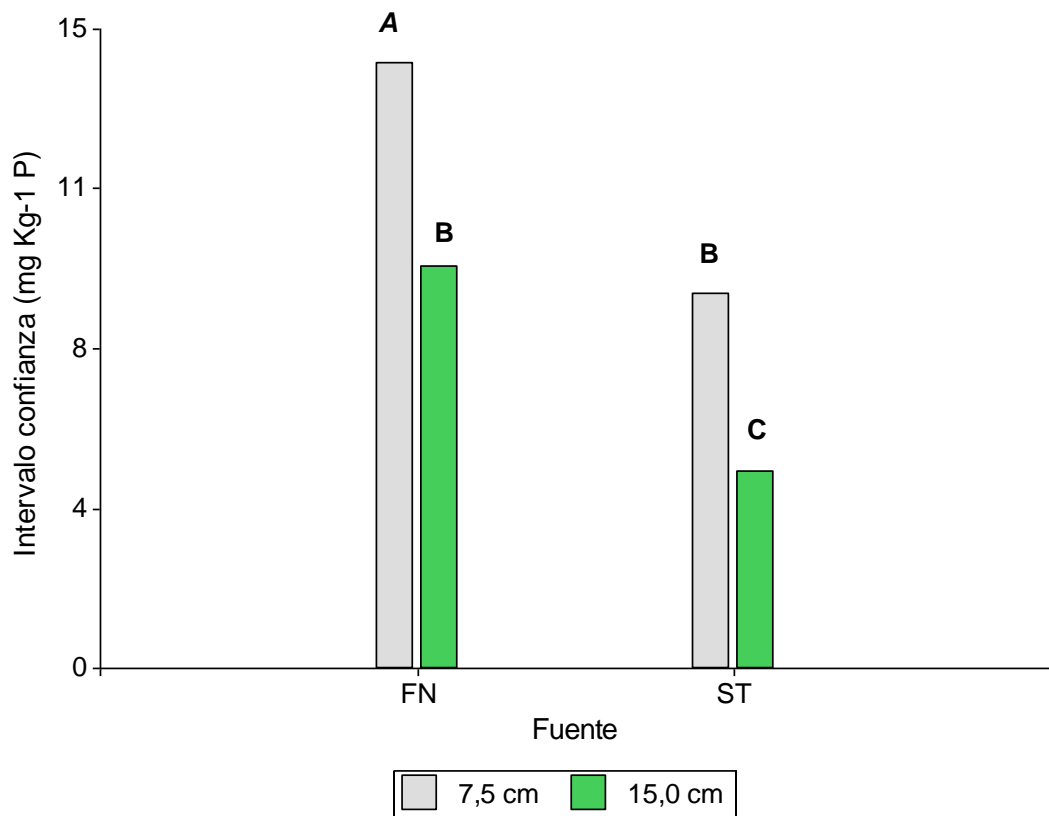


Figura 7. Ancho de los intervalos de confianza (mg kg<sup>-1</sup> de P), según la profundidad de muestreo y fuente de P. FN: Fosforita natural; ST: Superfosfato triple

La profundidad mayor de muestreo presentó el menor IC promedio ( $p < 0,05$ ) para las dos fuentes de P utilizadas. Cuando se usa FN y el muestreo se realiza a 7,5 cm el IC fue el más alto, mientras que el menor IC se obtiene cuando se muestrea a 15 cm utilizando ST ( $p < 0,05$ ).



## 2.6. DISCUSIÓN

De acuerdo con lo explicado en secciones anteriores, la hipótesis de una mayor correlación para el caso de muestras superficiales (0-7,5 cm) se sustenta básicamente en el fenómeno de la alta estratificación del P extractable, que resultaría en que el P absorbido por las plantas proviene esencialmente de dicho estrato únicamente.

Calviño *et. al.* (2000) y Robbins y Voss (1991) identificaron que el proceso de estratificación es llevado a cabo en forma relativamente rápida (4 años), concentrándose en los primeros centímetros de suelo, especialmente cuando se parte de suelos con bajo contenido inicial de este elemento. Es esperable que, a partir de los resultados encontrados en este trabajo, dicha estratificación se vea incrementada con el pasar de los años. Es posible observar luego de un periodo de 10 años de siembra directa valores 3,5 veces más altos en los primeros 5 cm de suelo con respecto a los encontrados entre los 5-15 cm, utilizando fuentes solubles (Robbins y Voss, 1991). En el presente trabajo se encontraron valores 7,5 veces más altos en los primeros 7,5 cm con respecto al segundo estrato (7,5-15 cm), cuando se aplicó fosforita natural en las dosis más altas (información no reportada en esta publicación).

Los resultados obtenidos en este trabajo (Cuadro 4) demuestran al igual que lo encontrado por Schlindwein *et. al.* (2013), que la estratificación del P en los primeros centímetros de suelos aumentó dependiendo de la fuente de P usada y de los métodos de extracción de P utilizados. Para el caso de suelos fertilizados con superfosfato triple, el factor de estratificación de P extractable no fue mayor que 2 con cualquiera de los 3 métodos de análisis estudiados.

A pesar de la estratificación encontrada, los muestreos más superficiales no mostraron un mayor poder predictivo de la respuesta vegetal de la pastura, con relación a los muestreos más profundos. Similares resultados,

trabajando en diferentes cultivos fueron encontrados por Barbagelata y Melchori, 2010; Bordoli *et al.*, 2004; Zamuner, *et al.*, 2003; Bordoli y Mallarino, 1998; Mallarino, 1996; del Pino y Ruiz, 1986. Esto en parte puede ser debido a que existe una fuerte influencia de la distribución del P en el perfil vertical del suelo sobre el crecimiento radicular. Dicha concentración de P en el subsuelo puede incidir en la respuesta a la aplicación de P si existe suficiente desarrollo de las raíces, lo que provoca que un mayor volumen de suelo sea explorado incrementando de esta manera la cantidad de P disponible (Zamuner *et al.*, 2004).

Por su parte, otros estudios han encontrado mayores valores del coeficiente de determinación para los muestreos más superficiales (0-10 cm) comparados con los análisis de 0-20 cm (Schlindwein *et al.*, 2013). Estos resultados confirman que pueden existir diferentes factores del suelo, así como también de la propia pastura o cultivo que influyen en la correlación con la respuesta vegetal según la profundidad de muestreo.

Otros factores que están más vinculados a la fisiología de las plantas, indican que, a pesar de que hubo una estratificación marcada debido a la fertilización, el estrato inferior de muestreo también tuvo un enriquecimiento de P (Figura 6). Los eventos de precipitación son otros de los factores que pueden incidir en el proceso de aumento de P en los estratos más profundos debido a la lixiviación acelerada de P a través del flujo preferencial (Sinaj *et al.*, 2002, Simard *et al.*, 2000 y Stamm *et al.*, 1998). A su vez, al tratarse de pasturas plurianuales, parte del enriquecimiento del estrato subsuperficial puede también deberse a P proveniente de la descomposición de raíces que lo habían absorbido en superficie (Jobbágy y Jackson, 2001).

La respuesta de las plantas ante este enriquecimiento, es la adaptación del crecimiento de su masa radicular, para de esa manera poder absorber fósforo a diferentes profundidades, si no hay suficiente P disponible en la

capa superior del suelo (Holanda *et al.*, 1998; Pothuluri, *et al.*, 1986; Barber y Stanley, 1995).

Es necesario considerar que las diferencias entre las profundidades que se están analizando son de 7,5 cm, con una profundidad máxima de 15 cm, por lo cual en cualquiera de las situaciones de suelos analizados estarían dentro de profundidades habituales de exploración radicular de ambas especies cuándo no hay limitaciones físicas por parte del suelo (Formoso, 2007; Evans, 1977).

Las relaciones entre el contenido de P del suelo y las concentraciones de P en el lixiviado hacia estratos más profundos van a depender del tipo de suelo, textura y método de análisis de P (Turner y Haygarth, 2001; Leinweber *et al.*, 2002).

Al igual que lo reportado por del Pino y Ruiz (1986); la variabilidad en los valores de P en suelo fue mayor en los muestreos más superficiales con respecto al más profundo. Los primeros centímetros de suelo están expuestos a lo largo del año a una mayor variación de humedad y temperatura, lo que provoca que procesos como la mineralización de la materia orgánica y la solubilización del P inorgánico proveniente de las diferentes fuentes utilizadas, acompañen dicha variabilidad (Stewart y Tiessen, 1987).

Otro aspecto a tomar en consideración es que, si se dan las condiciones para su mineralización, la mayor concentración de biomasa microbiana que se encuentra en los primeros centímetros del suelo (Salvo *et al.*, 2010; Sparling *et al.*, 1985) podría ser una fuente secundaria de P para la nutrición vegetal, teniendo implicancias en los test de suelo, que usualmente se emplean para estimar el P disponible sin considerar la fracción orgánica (Picone y Zamuner, 2002). Estos factores inciden directamente en las determinaciones de P extractable y se ven reflejados en la mayor variabilidad en los muestreos más superficiales.

## **2.7. CONCLUSIONES**

Este estudio se realizó con el fin de contribuir a través al uso de indicadores objetivos, que aportarían junto con otras medidas de manejo, al aumento de la eficiencia en el uso de la fertilización fosfatada en pasturas. Se concluye que a pesar de detectarse una estratificación del P en el suelo debido a las fertilizaciones realizadas al voleo sin incorporación; la profundidad de muestreo más superficial en comparación con el muestreo más profundo no mostró un mejor ajuste entre el rendimiento relativo de la pastura y los valores de P en suelo, teniendo esta última una menor variación en los valores de P en suelo. En consecuencia, la profundidad recomendada de muestreo de suelo para pasturas con siembras y fertilizaciones al voleo sería de 15 cm.

El rango de aplicabilidad de estos resultados se enmarca dentro de los niveles de estratificación reportados. Es esperable que, con más años de fertilización continua, dicha estratificación aumente, especialmente con las dosis más altas de P, por lo que para confirmar esta conclusión puedan necesitarse nuevos estudios.

## 2.8. BIBLIOGRAFÍA

- Barbagelata P, Melchori R.** 2010. Fertilización fosfatada para trigo en siembra directa en entre ríos: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. Actualización técnica N° 1. Cultivos de invierno. INTA Paraná. pp. 71-78.
- Barber J, Stanley A.** 1995. Nutrient Absorption by plant roots. En: Barber J, Stanley A. (Eds). *Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach.* Canada: Jhon Wiley & Sons. pp. 85-110.
- Bordoli M.** 2007. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. En: Manejo de la fertilidad en sistemas extensivos (Cultivos y Pasturas). Unidad de Educación Permanente y Postgrado. Montevideo. Facultad de Agronomía. pp. 71-79.
- Bordoli M, Quincke A, Marchesi A.** 2004. Fertilización fosfatada de trigo en siembra directa. [CD rom]. Actas del XIX Congreso de la AACS. Paraná, Entre Ríos. Argentina.
- Bordoli M.** 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. Siembra Directa en el Cono Sur. Montevideo: PROCISUR. pp. 289-297.
- Bordoli M, Mallarino A.** 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agronomy. Journal*, 90: 27–33.
- Bray H, Kurtz T.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59:39-45.
- Calviño P, Echeverría H, Redolatti M.** 2000. Estratificación de fósforo en el suelo y diagnóstico de la fertilización fosfatada en trigo en siembra

directa. En: XVII Congreso Argentino de producción animal. Mar del Plata. Argentina.

**Correndo A, Salvagiotti F. García F, Gutiérrez Boem H.** 2017a. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test 1 value-relative yield relationships. *Crop & Pasture Science*, 68: 297–304.

**Correndo A, Salvagiotti F. García, F, Gutiérrez Boem H.** 2017b. Modified ALCC Excel Tool – v3. [En línea] Consultado 4 junio 2017. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/317953836\\_Modified\\_ALCC\\_Excel\\_Tool](https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool)

**Del Pino A, Ruiz A.** 1986. Muestreo de suelo para recomendaciones de fertilización de pasturas convencionales. Tesis Ing. Agr. Uruguay. Facultad de Agronomía. 88 p.

**Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo C.** InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

**Dyer R.** 1894. On the analytical determination of probable available mineral plant food on soils. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 65: 115-167.

**Dyson C, Conyers M.** 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop & Pasture Science*, 64: 435–441.

**Evans P.** 1977. Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 20: 331-235.

**Ferraris G.** 2005. Muestreo y Análisis de Suelo: Punto de partida hacia un diagnóstico de fertilidad. Desarrollo Rural INTA.

- Formoso F.** 2007. Estudios de sistemas radicales de gramilla y especies forrajeras sembradas en directa y con preparación convencional de suelo. En: Avances en la siembra directa de pasturas. Montevideo. Uruguay. Serie Técnica 161. pp. 119-138.
- Galantini J, Suñer, L, Iglesias J.** 2007. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense: Efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. INTA, Argentina. RIA, 36 (1): 63-81.
- García F, Picone L.** 2004. Fósforo: Dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. *Informaciones Agronómicas* 55: 1-5.
- Guertal E, Eckert S, Traina T, Logan, T.** 1991. Differential Phosphorus Retention in Soil Profiles under No-Till Crop Production. *Soil Science Society of America Journal*, 55:410-413.
- Guppy C, Menzies N, Moody P, Blamey F.** 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Australian Journal Soil Research*, 43: 189-202.
- Holanda F, Mengel D, Paula A, Carvalho J, Bertoni, J.** 1998. Influence of crops rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29: 2383–2394.
- Jobbágy W, Jackson R.** 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1): 51-77.
- Kitchen NR, Havlin JL, Westfall DG.** 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 54:1661-1665.

- Leinweber P, Turber BL, Meissner R. 2002.** Phosphorus. Agriculture, hydrology and water quality. CABI Publishing, , Wallingford, Oxon, UK. CAB International. pp. 29–56.
- Mallarino A, Borges R. 2006.** Phosphorus and Potassium Distribution in Soil Following Long-Term Deep-Band Fertilization in Different Tillage Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 70:702–707.
- Mallarino AP. 1996.** Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*, 60:1473-1481.
- Morón A. 2007.** Avances hacia a una nueva guía de fertilización de pasturas. En: Seminario internacional de nutrición vegetal. Paysandú, Uruguay. Criterios para la Fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú: UDELAR. EEMAC, Facultad de Agronomía.
- Picone L, Zamuner E. 2002.** Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. En: Informaciones agronómicas del Cono Sur N° 16: 11-15.
- Posada, S, Noguera, R. 2007.** Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en evaluación de alimentos para animales. En: Revista colombiana de ciencias pecuarias, 20:141-148.
- Pothuluri J, Kissel D, Whitne D, Thien S. 1986.** Phosphorus Uptake from Soil Layers Having Different Soil Test Phosphorus Levels 1. *Agronomy Journal*, 78(6): 991-994.
- Robbins,S, Voss R.1991.** Phosphorus and potassium stratification in conservation tillage systems. *Journal Soil Water Conservation*, 46: 298–300.
- Roberts T, Henry L. 2001.** El muestreo de suelo: Los beneficios de un buen trabajo. [En línea]. Consultado 5 febrero 2017. Disponible en:



Informaciones agronómicas N° 42. Inpofos: 4-13.

[http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/1EE25C6ED2D143D0852579A300790532/\\$FILE/Inf-Agro42.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/1EE25C6ED2D143D0852579A300790532/$FILE/Inf-Agro42.pdf)

**Salvo L, Hernández J, Ernst O.** 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil & tillage Research*, 109: 116-122.

**Scheiner J, Lavado R.** 2008. The role of fertilization on phosphorus stratification in no-till soils. *Soil Science and Plant Analysis*, 29, (17-18): 2705-2711.

**Schindwein J, Bortolon L, Fioreli E, Oliverira E, Gianello C.** 2013. Phosphorus and potassium fertilization in no till southern Brazilian soils. En: *Agricultural Sciences* Vol.4, No.12<sup>a</sup>: 39-49.

**Simard R, Beauchemin S, Haygarth P.** 2000. Potential for preferential pathways for phosphorus transport. *Journal of Environmental Quality*, 29: 97–105.

**Sinaj S, Stamm C, Too S, Condon LM, Hendry T, Di HJ, Cameron KC, Frossard E.** 2002. Phosphorus exchangeability and leaching losses from two grassland soils. *Journal of Environmental Quality*, 31: 319–330.

**Sparling G, Whale K, Ramsay A.** 1985. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. *Australian Journal soil research*. Melbourne, 23: 613-621.

- Stamm C, Fluhler H, Gachter R, Leuenberger J, Wunderli H.** 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *Journal of Environmental Quality*, 27: 515–522.
- Stewart J, Tiessen H.** 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, Dordrecht, 4: 41-60.
- Turner B, Haygarth P.** 2001. Phosphorus solubilization in rewetted soils. *Nature*: 411, 258.
- Zamalvide J.** 1996. Análisis de suelo. Curso de actualización en fertilidad de suelos. Tomo 1: Temas generales de fertilidad de suelos. Instituto Clemente Estable. Montevideo. Facultad de Agronomía. pp. 41-45.
- Zamuner E, Picone L, Echeverría H.** 2004. Comparación de métodos de extracción de fósforo disponible Bray I sobre la respuesta de la fertilización fosfatada en trigo. *Ciencia del Suelo*, 22(2): 57-63.
- Zamuner E, Picone L, Echeverría H.** 2003. Profundidad de muestreo de suelo: Relación del rendimiento con el fósforo disponible. En. Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". INPOFOS Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Zamuz M, Castro J.** 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelos para determinar fósforo asimilable. Boletín Técnico 15. Montevideo. CIAAB. 15 p.

### **3. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS PARA PASTURAS DE LEGUMINOSAS**

Cuadro Robin<sup>1</sup>, Quincke Andrés<sup>2</sup>.

*<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Programa Pasturas y Forrajes. Estación Experimental INIA Tacuarembó. Ruta 5 km 386, Tacuarembó, Uruguay. Correo electrónico: [rcuadro@inia.org.uy](mailto:rcuadro@inia.org.uy)*

*<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Estación Experimental INIA La Estanzuela. Ruta 50 km 11, Colonia, Uruguay.*

*Artículo para ser presentado en Revista Agrociencia (Uruguay)*

### 3.1. RESUMEN

En Uruguay, se reconoce que las pautas y recomendaciones vigentes para la fertilización fosfatada de pasturas, presentan una limitante relacionada al ajuste de los métodos de P extractable para valorar la disponibilidad de P para las pasturas en distintos suelos o con distinta historia de fertilización. El objetivo de este trabajo es comparar tres métodos de extracción de P en suelo por su correlación con la respuesta vegetal. Se analizó la información generada desde el 2008 al 2012 en una red de ensayos, abarcando 14 sitios ubicados sobre diferentes suelos en Uruguay. Todos los ensayos tenían el mismo diseño experimental en bloques completamente aleatorizados. Se evaluaron dos pasturas (*Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*), combinados con dos tipos de fuentes de fósforo (P), fosforita natural (FN) y superfosfato triple (ST). Se efectuaron mediciones anuales de producción de forraje y P en suelo. Los muestreos se realizaron a dos profundidades de muestreo (0-7,5 y 7,5-15 cm). El contenido de P extractable fue analizado por tres métodos analíticos (Bray I, resinas catiónicas y ácido cítrico). Se aplicaron 4 dosis iniciales de  $P_2O_5/ha$  (0, 40, 120, 240), con refertilizaciones anuales de 0 y 40 kg  $P_2O_5/ha$ . Se ajustaron modelos de regresión lineal entre el rendimiento relativo de cada año y los valores de P en suelo, usando el modelo del Arcoseno-Logaritmo (ALCC). Para las fertilizaciones con FN, los métodos del ácido cítrico y de resinas catiónicas mostraron mayores correlaciones que el Bray I. En todos los suelos, para las fertilizaciones con ST, los métodos Bray I y del ácido cítrico mostraron mayores correlaciones que el método de resinas catiónicas. Para ambas fuentes de fósforo, el método del ácido cítrico presentó las mayores correlaciones.

**Palabras claves:** ácido cítrico, correlación, pasturas, análisis de suelo.

### 3.2 SUMMARY

A limitation of current guidelines and recommendations for P fertilization in Uruguay is related to the adjustment of soil P test methods for assessing P availability for pastures under different soil types or different fertilization history. The objective is to compare three soil P test methods by its correlation with plant response. The data source is a set of field trials performed between 2008 and 2012 on 14 soils in Uruguay, where each trial had a randomized complete block design, and was sown with *Trifolium repens* or *Lotus corniculatus*. Two P sources (rock phosphate or triple superphosphate) were used at seven P rate regimes. Annual forage yield was recorded and soil test P was measured for two sampling depths (0-7.5 and 7.5-15 cm) and three analytical methods (Bray I, cationic resins, and citric acid). Lineal regression models were adjusted between relative yield and soil P test using the arcsine-logarithm model (ALCC). When rock phosphate was used, cationic resins and citric acid had higher correlations than Bray I. When triple superphosphate was used, Bray I and citric acid had higher correlations than cationic resins. For both P sources, citric acid had higher correlations.

**Key words:** citric acid, correlation, pastures, soil P test.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

Los métodos de extracción química del P en los suelos extraen selectivamente los compuestos de P (compuestos generalmente solubles y débilmente adsorbidos de P) para estimar el P que está disponible para la absorción de las plantas durante una estación de crecimiento. El P extraído, se calibra empíricamente contra la captación real del cultivo o la probabilidad de respuesta a la fertilización (Simard; citado por Ziadi, *et al.*; 2013; Hernández, 2008, Heckman *et al.*, 2006; McKenzie *et al.*, 2003).

La energía con la que extraen depende de la composición del extractante, la que, a su vez, determina su pH y el tipo de interacción extractante-matriz de suelo (Bachmeier y Rollán, 1994). Algunos productos químicos, como el ácido cítrico, extraen cantidades de P que están muy estrechamente relacionadas con el P extractable (Holford y Mattingly, 1979).

En Uruguay, Zamuz y Castro (1974) realizaron las primeras calibraciones para pasturas utilizando el método de resinas catiónicas. Zamalvide *et al.*, (1975), posteriormente evaluaron 4 métodos: Bray I (Bray y Kurtz, 1945), Olsen, Mehlich 1 y Resinas catiónicas (Zamuz y Castro, 1974), desde el punto de vista de su capacidad predictiva de la disponibilidad de P. Los resultados indicaron que todos los métodos podían ser usados como indicadores de P, aunque mostraban diferencias en su capacidad predictiva (Hernández, 2008). Con respecto al método del ácido cítrico, un relevamiento sobre cultivos de trébol blanco en la zona Este (Morón, 2004), reveló que el método del ácido cítrico tendría una mejor asociación con el contenido de P en planta, en comparación con los métodos de resinas catiónicas y Bray I. Similares resultados fueron encontrados sobre suelos de basamento cristalino, con *Lotus subbiflorus* cv El Rincón usando distintas fuentes de P (Morón, 2007). Finalmente, para suelos limosos de la zona este del país bajo cultivo de arroz irrigado, Hernández *et al.* (2013) encontraron que la disponibilidad de P fue estimada adecuadamente por los métodos del

ácido cítrico, Mehlich 3, y Bray 1, proporcionando similares niveles críticos de P en el suelo.

Actualmente, el método más utilizado en Uruguay es el Bray 1. Dicho método se adapta a la mayoría de los suelos de texturas medias y pesadas del litoral del país. Sin embargo, para otras zonas (por ejemplo, suelos arenosos y suelos de Basalto) presenta algunas limitaciones para su uso (Bordoli, 1998; Hernández *et al.*, 2013).

El método más ampliamente utilizado para ajustar modelos de regresión, el de mínimos cuadrados ordinarios, supone que solo la variable dependiente (por ejemplo, el rendimiento relativo) es aleatoria, mientras que la variable independiente o regresora (por ejemplo, el P extractable) se considera fija y libre de error. Según Webster (1997), en el campo de la ciencia del suelo la regresión por mínimos cuadrados se encuentra sobre-utilizada, ya que la variable regresora no está controlada por el investigador

Cuando la relación subyacente es bivariada, debe describirse como tal y no como predictiva, por lo tanto, debería considerarse una distribución conjunta de ambas variables llamada "bivariante o bivariada" (Legendre y Legendre, citado por Correndo, 2018). Recientemente se ha propuesto una metodología innovadora (Dyson y Conyers, 2013) para la calibración de análisis de suelos. El método se denomina curva de calibración del arcoseno logaritmo, ALCC por sus siglas en inglés (Arcsine Logarithm Calibration Curve), y ha sido desarrollado para determinar niveles críticos de análisis de suelo (ASC) para nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) y potencial de respuesta en varios cultivos de grano en Australia (Anderson *et al.*, 2013; Bell *et al.*, 2013; Brennan y Bell, 2013).

En contraste con las metodologías de calibración más utilizadas, el método ALCC: (i) transforma ambas variables de interés, por ejemplo, rendimiento relativo (RR) y análisis suelo (AS), y (ii) invierte los ejes X e Y (i.e. AS vs. RR) para poder estimar no solo el ASC para un determinado nivel de RR,

sino también su respectivo intervalo de confianza (IC). En el estudio original, Dyson y Conyers (2013) resaltan que las estimaciones de los IC por esta metodología son a menudo muy amplias como para realizar recomendaciones prácticas y comparaciones entre set de datos. No obstante, Correndo, *et. al.* (2017a) sugieren que es posible obtener estimaciones más precisas de los ASC sin la necesidad de reducir el nivel de confianza, sino mediante la modificación de pasos específicos de la metodología. El ALCC modificado permite estimar con mayor precisión las correlaciones entre las dos variables estudiadas, tomando en cuenta sus aleatoriedades, así como también tener comparaciones más confiables entre conjuntos de datos a través del uso de los coeficientes de determinación ( $r^2$ ).

El ajuste de los métodos de análisis de P extractable en suelos permitirá hacer un uso más racional de dicho nutriente en la fertilización de pasturas, permitiendo una mayor eficiencia biológica, disminuyendo el posible riesgo ambiental producto de las refertilizaciones fosfatadas. El objetivo propuesto en el presente trabajo es comparar tres métodos de extracción de P en suelos a través de su correlación con la respuesta vegetal.



### 3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.4.1. Fuente de información

La información analizada consistió en el análisis de la base de datos de un conjunto de experimentos de campo instalados en 14 sitios ubicados en diferentes zonas del país (Red de Fertilización de Pasturas, Figura 1, Cuadro 1). Fueron experimentos de respuesta al agregado de fósforo desarrollados entre los años 2008 y 2012, y se describen detalladamente en 3.4.3.



Figura 1. Mapa de ubicación de los sitios experimentales de la red de ensayos de fertilización de pasturas.

Cuadro 1. Identificación y características edáficas de los sitios experimentales de la Red de Fertilización de Pasturas.

<b>Nombre sitio</b>	<b>Tipo de Suelos</b>	<b>Material generador</b>
La Carolina	Brunosol Éútrico Lúvico.	Sedimentos cuaternarios sobre Cristalino
Trinidad	Brunosol Subéútrico Típico	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino
Florida	Brunosol Dístrico Háptico	Cristalino
Pan de Azúcar	Inceptisol Melánico	Cristalino
Palo a Pique	Brunosol Subéútrico Lúvico	Sedimentos poco espesos y gravillosos sobre Cristalino
Isla Patrulla	Luvisol Melánico Típico	Sedimentos con gravillas sobre Cristalino alterado
Tres Puentes	Brunosol Subéútrico Típico	Sedimentos Pelíticos Grises
Rincón	Planosol Subéútrico	Sedimentos limo arcillosos
Sauce Cañote	Planosol Dístrico Ocrico	Sedimentos
Tambores	Brunosol Éútrico Vértico	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto
Glencoe	Vertisol Háptico	Sedimentos limo arcillosos sobre Basalto
Ombúes	Vertisol Rúptico Típico	Sedimentos cuaternarios
Young	Brunosol Éútrico Típico	Sedimentos cuaternarios sobre Fray Bentos
Palmitas	Brunosol Subéútrico Lúvico	Sedimentos arenosos sobre Cretáceo

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan diagramas de cajas (box plot) resumiendo las principales características fisicoquímicas de los 14 suelos estudiados.

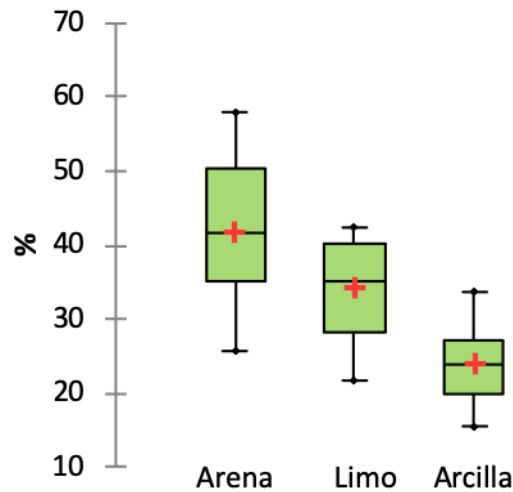


Figura 2. Valores promedio (+), mediana y cuantiles (0,05, 0,25, 0,75 y 0,95) del contenido de arena (%), limo (%) y arcilla (%) de los diferentes suelos estudiados, para una profundidad de muestreo de 15 cm.

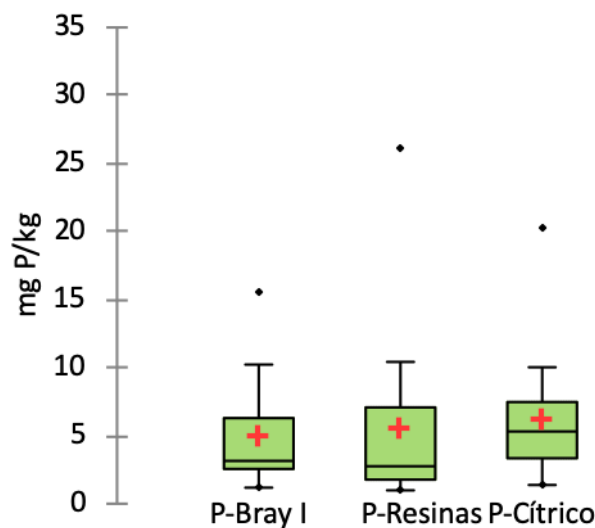
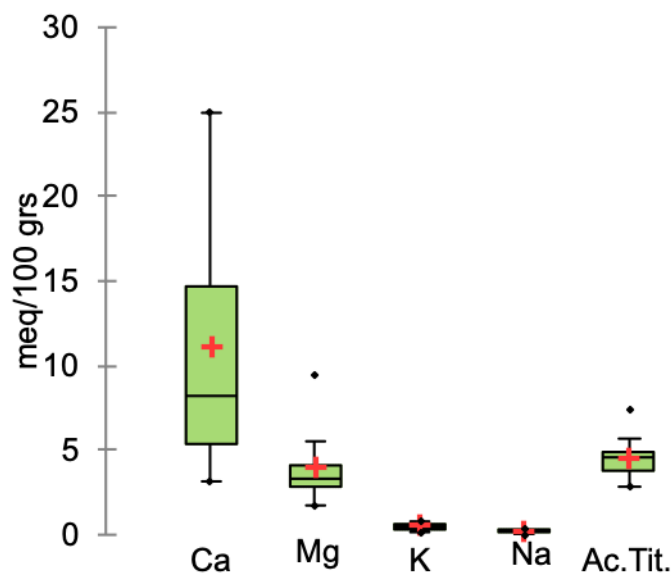


Figura 3. Contenido inicial de fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extractable del suelo promedio (+) y medianas, de los diferentes suelos estudiados, según método de análisis, para una profundidad de muestreo de 15 cm.



Ca: Calcio; Mg: magnesio; K: potasio; Na: sodio; Ac. Tit.: acidez titulable

Figura 4. Valores promedio (+) (meq 100 g<sup>-1</sup>) y medianas de algunas propiedades químicas de los diferentes suelos estudiados, para una profundidad de muestreo de 15 cm.

Si bien en todos los sitios se buscó que la pastura previa fuera campo natural sin historia de fertilización alguna y que presentaran niveles bajos de P extractable en suelo, en dos sitios (Ombúes y Palmitas) los mismos recibieron agregados previos de P de algún tipo, lo que se ve reflejado claramente en los valores iniciales de 12,6 y 10,2 ppm Bray, respectivamente. En el caso de Ombúes, posiblemente haya habido redistribución de P vía deyecciones animales. En el caso de Palmitas es posible que haya habido historia de fertilización asociado a un manejo de rotación agrícola-ganadera del predio.

### 3.4.2. Determinaciones realizadas

#### 3.4.2.1. Análisis de P extractable en suelo

Todos los años en marzo-abril se colectaron muestras de suelo a dos profundidades de muestreo (0-7,5 cm y 7,5-15,0 cm) para determinar el

contenido de P extractable del suelo por tres métodos analíticos: Bray I (Bray y Kurtz, 1945); resinas catiónicas (Zamuz y Castro, 1974) y ácido cítrico (Dyer, 1894). El contenido de P en suelo para la profundidad de 0-15 cm fue calculado como el promedio de P en extractable de 0-7,5 cm y 7,5-15 cm. En el Cuadro 2 se presentan las principales características metodológicas de cada método evaluado.

Cuadro 2. Principales aspectos metodológicos de las tres técnicas analíticas para determinar fósforo extractable en el presente estudio.

	Bray I	Resinas catiónicas	Ácido cítrico
Solución extractante	Fluoruro de amonio (NH <sub>4</sub> F) 0,03N, ácido clorhídrico (HCl) 0,025N	Resinas catiónicas saturadas en H <sup>+</sup> ; 4,7g /100mL	ácido cítrico 0,5%
Relación suelo: solución extractante	3,56 g de suelo: 25 mL de solución	5 g de suelo: 50 mL de mezcla	5 g de suelo: 50 mL de solución
Tiempo agitado de	5 minutos	3 horas	30 minutos
Concentración de ácido sulfúrico en reactivo colorimetría	5 N	5 N	2,5 N
Cita original*	Bray y Kurtz (1945)	Zamuz y Castro (1974)	Dyer, 1894,

*Nota: en todos los casos las técnicas tuvieron ligeras modificaciones respecto a la cita original.*

### **3.4.2.2. Determinaciones en la pastura**

La producción de forraje se calculó anualmente mediante la suma de las producciones estacionales. Los cortes de forraje se realizaban con cortadora a motor, dejando una altura del forraje remanente de 5 cm. Previo al corte en cada parcela se efectuaba determinación visual de la composición botánica, separando los siguientes componentes: % de la especie sembrada; % malezas; % suelo desnudo, % otras especies. La producción de forraje total estacional se corrigió por el porcentaje de cobertura de la especie sembrada para obtener la producción anual de forraje de la especie evaluada. Para cada año se calculó el rendimiento relativo (RR) anual de cada parcela, tomando como 100% la parcela de mayor rendimiento de cada bloque para cada fuente ( $RR = \text{Rendimiento observado} / \text{Rendimiento máximo} * 100$ ).

### **3.4.3. Descripción de la base de datos analizada**

Todos los experimentos instalados en cada sitio tenían un diseño experimental de bloques completos aleatorizadas (DBCA), con cuatro repeticiones. Sobre cada pastura se evaluaron dos fuentes de P: supertriple (ST 0-46/46-0) y fosforita natural de Argelia (FN 0-10/29-0), aplicados al voleo con diferentes niveles iniciales y de refertilización (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos evaluados

Fuente de P	Dosis inicial (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Dosis refertilización anual (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)
Testigo	0	0
ST	120	0
ST	240	0
ST	120	30
ST	240	60
FN	120	0
FN	240	0
FN	120	30
FN	240	60

*Nota: ST: Superfosfato triple (0-46/46-0); FN: Fosforita natural Argelia (0-10-29-0)*

En 12 de los sitios (Young, Palmitas, La Carolina, Flores, Florida, Pan de Azúcar, Palo a Pique, Cuchilla los Ladrones, Rincón de Ramírez, Minas de Corrales, Tambores, y Glencoe), la información de producción de forraje correspondió al segundo y tercer año de la pastura (2009 y 2010), mientras en los dos restantes (La Carolina y Sauce Cañote) correspondieron a los años 2010 y 2011.

Basado en la información recolectada en el campo se procedió al análisis de *outliers* y casos de no respuesta al factor dosis de P. De dicho análisis se excluyeron dos ensayos, uno debido a la baja implantación del ensayo (trébol blanco en el sitio de Cuchilla los Ladrones) y otro por baja respuesta debido a que se partía de niveles altos de P en suelo (trébol blanco en el sitio de Palmitas).

#### **3.4.4. Procedimiento del análisis estadístico**

El análisis estadístico se realizó esencialmente en dos etapas.

Etapa 1 de análisis: las mediciones de P extractable en suelo de cada año, para las combinaciones de sitio, especie, fuente, profundidad de muestreo y método de análisis de P extractable, fueron relacionadas con el RR de dicho año, ajustando modelos de regresión lineal.

El ajuste entre ambas variables fue realizado utilizando el método denominado curva de calibración del arcoseno-logartimo (ALCC) modificado por Correndo *et al.* (2017<sup>a</sup>). El ALCC modificado, permite estimar con mayor precisión las correlaciones entre las dos variables estudiadas, tomando en cuenta sus aleatoriedades, así como también tener comparaciones más confiables entre conjuntos de datos a través del uso de los coeficientes de determinación ( $r^2$ ). Se utilizó una hoja de cálculo de Microsoft Excel® desarrollada como herramienta de ajuste del modelo, denominada “Modified ALCC Tool” (Correndo *et al.*, 2017b).

Se retuvieron las regresiones donde la correlación fue significativa ( $p < 0,05$ ) y se obtuvo una matriz con los  $r^2$  y los cuadrados medios del error de cada curva de ajuste.

Etapa 2 de análisis: se realizó un análisis de varianza utilizando los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) de las regresiones como variable de respuesta, y las 5 variables clasificatorias mencionadas como los factores de variación.



El modelo completo ajustado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + L_k + Sp_j + F_i + Prof_l + M_s + (LSp)_{kj} + (LF)_{ki} + (LpProf)_{kl} + (LM)_{ks} + (SpF)_{ji} + (SpProf)_{jl} + (SpM)_{js} + (FProf)_{il} + (FM)_{is} + (ProfM)_{ls} + \varepsilon$$

$\mu$  = media

$L_k$  = efecto Sitio

$Sp_j$  = efecto especie

$F_i$  = efecto fuente de P

$Prof_l$  = efecto profundidad de muestreo

$M_s$  = efecto método analítico

$\varepsilon$  = error experimental

Como forma de poder evaluar la capacidad de ajuste de los modelos, se tomó como criterio el coeficiente de determinación y cuadrado medio del error de las regresiones. Los modelos seleccionados por su mayor capacidad de ajuste son aquellos que tienen un menor valor de este último criterio (Posada y Noguera, 2007). Para el análisis de toda la información, se utilizó el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et. al.*, 2018).

### 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.5.1. Productividad de pasturas

En general, las producciones de forraje correspondieron a los años 2 y 3 de la pastura. Para los sitios de Minas de Corrales y Pan de Azúcar también se analizó el año 4 de la pastura. En general, los promedios anuales de producción de forraje fueron similares para ambas fuentes y especies evaluadas. Los valores mínimos y máximos fueron, para trébol blanco entre 0- 8200 kg MS/ha y para lotus 0- 7500 kg MS/ha respectivamente (Figura 5).

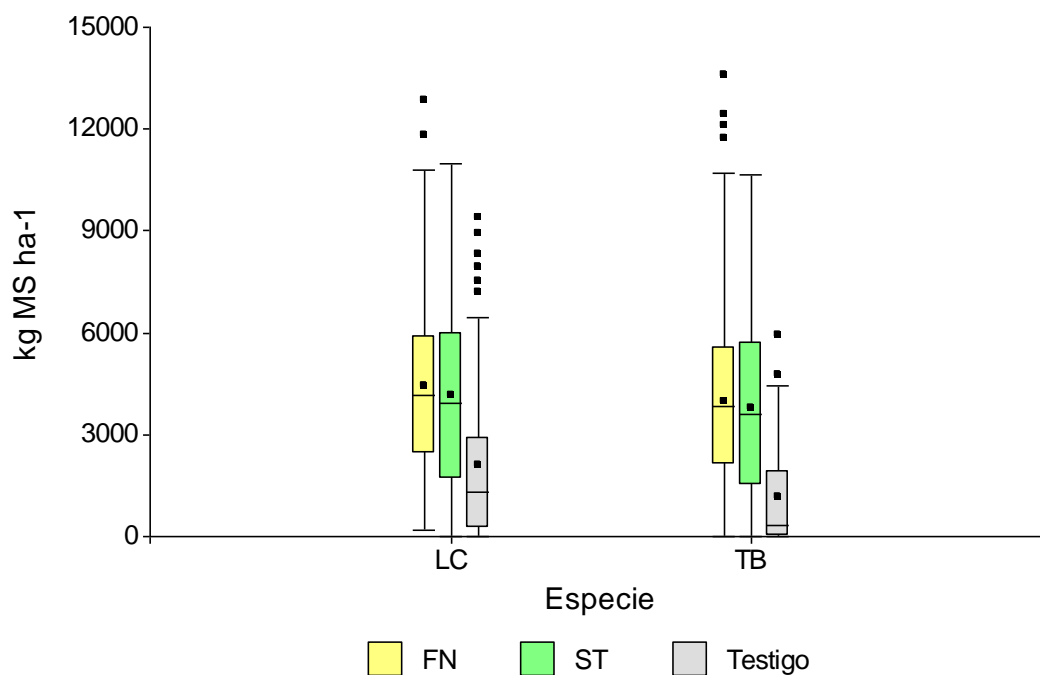


Figura 5. Distribución de las productividades anuales promedio de forraje (kg/ha/año) de lotus (*Lotus corniculatus*, LC) y trébol blanco (*Trifolium repens*, TB), según fuente de P utilizada (FN: fosforita natural; ST: superfosfato triple).

### **3.5.2. Relaciones entre rendimiento relativo (RR) y análisis de suelo**

Aplicando la metodología del ALCC se generó una población inicial de 696 curvas de calibración, de las cuales se seleccionaron 497 que fueron estadísticamente significantes ( $p < 0,05$ ). En el Cuadro 4 se presenta una descripción de la estructura de la base de datos utilizada para los análisis.

Cuadro 4. Número de curvas de calibración generadas con la metodología ALCC para tres métodos de análisis de P en suelo, y número de curvas retenidas ( $p < 0,05$ ) para posterior análisis.

<b>Método análisis</b>				
<b>Base</b>	<b>Total</b>	<b>Bray I</b>	<b>Ácido cítrico</b>	<b>Resinas catiónicas</b>
<b>Total</b>	697	232	231	231
<b>p&lt;0,05</b>	497	166	167	164

### **3.5.3. Análisis de los coeficientes de determinación ( $r^2$ )**

Para la variable coeficiente de determinación ( $r^2$ ), a partir del análisis de los residuos del modelo, se validaron los supuestos de normalidad mediante el Q-Q plot ( $r^2 = 0,998$ ) y el test de Shapiro Wilks ( $p = 0,378$ ), resultando los errores con distribución normal. Mediante el test de Levene ( $p = 0,067$ ) se confirmó que las varianzas son homogéneas.

En la Figura 6 se presenta un histograma mostrando la frecuencia relativa de distribución de los  $r^2$  obtenidos a partir de las regresiones generadas.

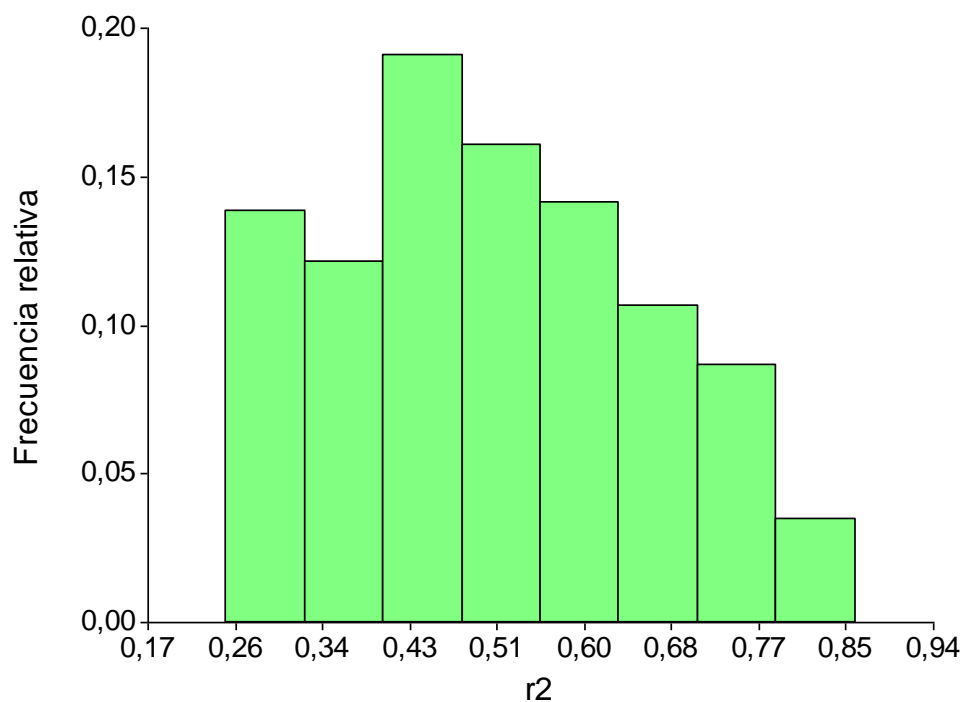


Figura 6. Frecuencia de distribución de los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) obtenidos.

Estudios anteriores basados en esta metodología (Dyson y Conyers, 2013) reportaron que para la mayoría de los coeficientes de correlación para este tipo de variables se ubican entre los 0,25 y 0,7. Los coeficientes de determinación obtenidos aquí estuvieron en un rango entre 0,25 y 0,86.

En el Cuadro 5 se presentan los resultados del ANOVA para el coeficiente de determinación como variable de respuesta. Como efectos principales se establecieron el sitio, la especie; la fuente de P aplicada; la profundidad de muestreo y el método de análisis de P extractable en suelo, así como las interacciones dobles entre los efectos principales mencionados. Si bien se presentan los resultados del modelo completo, en el presente trabajo se estudiará solamente el efecto del método de análisis y sus interacciones simples con los demás factores.

Cuadro 5. Análisis de varianza (SC tipo III) para el coeficiente de determinación de las curvas de calibración entre P suelo y respuesta vegetal.

<b>F.V.</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>p-valor</b>
Modelo	89	0,09	<0,0001
Sitio	13	0,13	<0,0001
Especie	1	0,08	0,044
Fuente	1	0,48	<0,0001
Profundidad	1	0,00	0,694
<b>Método</b>	<b>2</b>	<b>0,28</b>	<b>&lt;0,0001</b>
Sitio*Especie	10	0,20	<0,0001
Sitio*Fuente	13	0,10	<0,0001
Sitio*Profundidad	13	0,01	0,767
<b>Sitio*Método</b>	<b>26</b>	<b>0,03</b>	<b>0,191</b>
Especie*Fuente	1	0,01	0,543
Especie*Profundidad	1	0,01	0,462
<b>Especie*Método</b>	<b>2</b>	<b>0,03</b>	<b>0,287</b>
Fuente*Profundidad	1	0,02	0,306
<b><u>Fuente * Método</u></b>	<b><u>2</u></b>	<b><u>0,29</u></b>	<b><u>&lt;0,0001</u></b>
<b>Profundidad * Método</b>	<b>2</b>	<b>0,00</b>	<b>0,958</b>
Error	407	0,02	
Total	496		

El  $r^2$  fue diferente significativamente para los factores método de análisis de suelo y fuente de P utilizada ( $p < 0,05$ ), así como también la interacción entre ambos factores (Fuente\* Método) ( $p < 0,05$ ). Con el resto de los factores estudiados (sitio, especie y profundidad de muestreo, las interacciones no resultaron significativas.

### **3.5.4. Efecto de la interacción entre el método de análisis de P extractable en el suelo y la fuente de P utilizada**

En el Cuadro 6 se presenta la separación de medias por fuente de P para cada método de análisis.

Cuadro 6. Efecto de la fuente de P y el método de análisis sobre el coeficiente de determinación de las curvas de calibración entre P suelo y respuesta vegetal.

<b>Fuente</b>	<b>Método</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>n</b>	
ST	Bray I	0,43	84	A
	Resinas catiónicas	0,37	86	B
	Ácido cítrico	0,44	83	A
FN	Bray I	0,38	89	C
	Resinas catiónicas	0,50	77	B
	Ácido cítrico	0,53	78	A

*Dentro de cada fuente, medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ). DMS= 0,4341.*

Para la generalidad de los suelos, el método que mejor coeficiente de determinación presentó fue el método del ácido cítrico. En las fertilizaciones con superfosfato triple, los métodos del ácido cítrico y Bray I no presentaron diferencias significativas entre ellos, siendo resinas catiónicas el de menor  $r^2$  ( $p < 0,05$ ). Cuando se usa fosforita natural como fuente de P, el método del ácido cítrico fue el que tuvo significativamente el mayor  $r^2$ , seguido de resinas catiónicas, y siendo Bray I el de menor  $r^2$  ( $p < 0,05$ ).

En la Figura 7 se presentan las curvas de respuesta entre el rendimiento relativo y los valores de P en suelo para las combinaciones de tipo de fuente y método de análisis, aplicando el modelo del ALCC. En cada figura se

presentan en forma conjunta las respuestas para las dos especies y las dos profundidades de muestreo en los 14 sitios de evaluación, particionado por fuente de P usada y método de análisis.

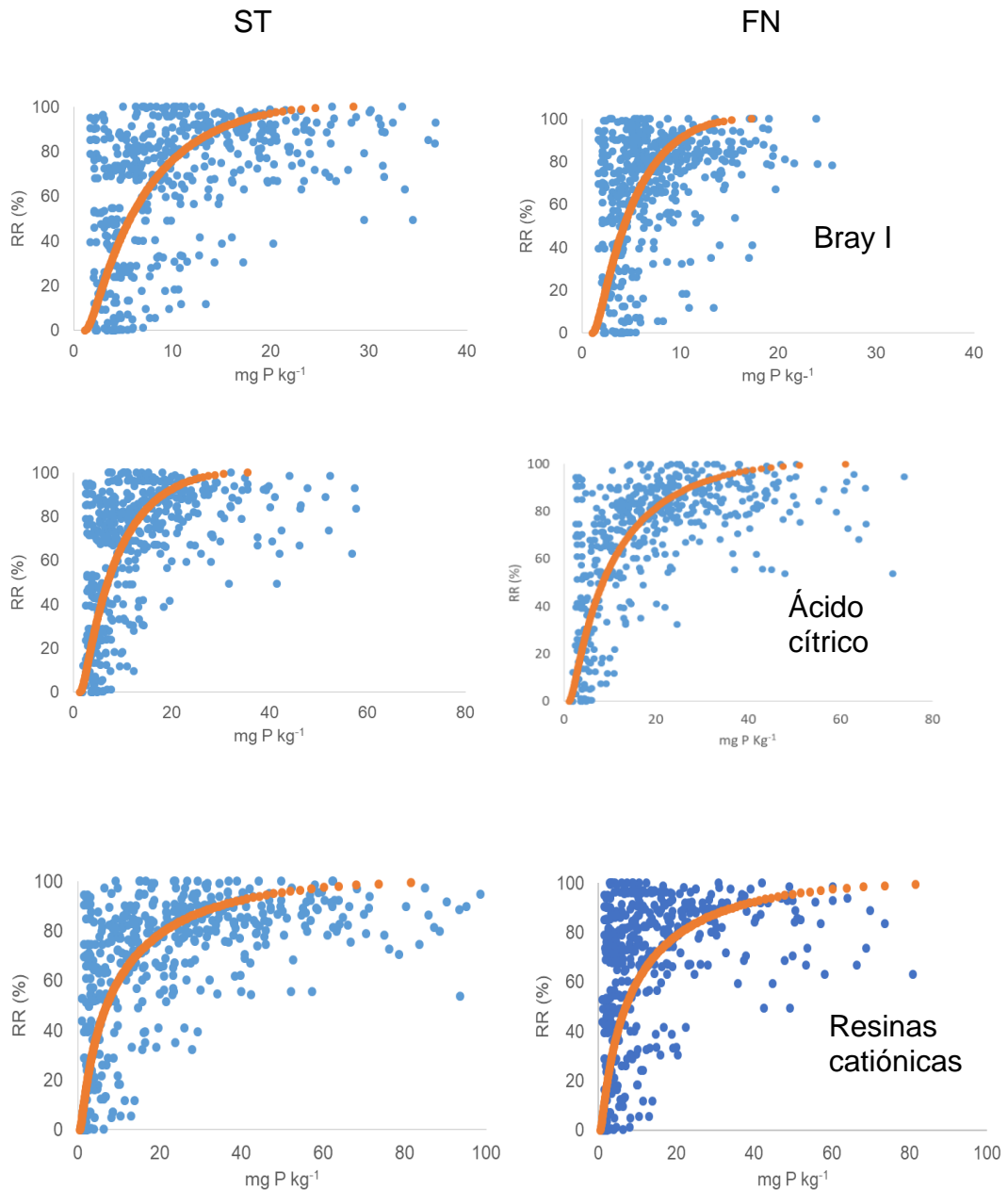


Figura 7. Curvas de respuesta entre el contenido de P extractable en suelo y el rendimiento relativo de materia seca (RR) según fuente de P utilizada y método de análisis de P en suelo ( $\text{mg P kg}^{-1}$ ), utilizando el método de ALCC.

En el Cuadro 7 se presentan los parámetros obtenidos en cada curva de calibración para la combinación del método de análisis \* fuente de P.

Cuadro 7. Coeficientes de determinación ( $r^2$ ) y descriptores de las curvas de calibración del modelo ALCC, según método de análisis y fuente de P.

Método	Fuente de P	n	$r^2$	a	b
Bray I	ST	488	0,21	2,293	0,71
Ácido cítrico	ST	488	0,31	2,63	1,10
Resinas catiónicas	ST	488	0,21	2,24	1,30
Bray I	FN	487	0,11	1,98	0,57
Ácido cítrico	FN	487	0,41	3,07	1,60
Resinas catiónicas	FN	487	0,59	3,53	3,43

ST: *superfosfato triple*; FN: *fosforita natural*. Coeficientes a y b para la función general de la curva de calibración:  $\ln(AS) = a + b \text{ aseno } (RR^{0.5})$ . Donde AS es el valor de análisis de suelo y RR es rendimiento relativo.

Los coeficientes de determinación obtenidos son en general más bajos que los obtenidos cuando se analiza mediante el modelo completo a través del ANAVA. En el ANAVA, cada  $r^2$  fue generado a través de regresiones donde se particionó por sitio, fuente de P, profundidad de muestro y especie. Al no tomar en cuenta la variabilidad debida a sitio, especie y profundidad de muestreo se generan mayores residuos entre los valores observados y los predichos y, en consecuencia, el ajuste de la regresión es menor. De igual manera, los resultados mantienen una tendencia similar a los obtenidos en el ANAVA. Con FN, ácido cítrico y resinas catiónicas son los que muestran mayores  $r^2$ , mientras que Bray I tiene menor ajuste. Cuando se usa ST, Bray I y resinas catiónicas presentan similares ajustes, pero el ácido cítrico muestra un ajuste levemente mayor que éstos.



Como forma de poder evaluar las diferencias entre las capacidades de ajuste entre métodos cuando se combina con el tipo de fertilizante utilizado, se realizaron análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis, utilizando como variables de respuesta la raíz cuadrada media del error para el rendimiento relativo (RMSE RR) y la raíz cuadrada media del valor para el análisis de suelo (RMSE AS), y como fuente de variación el método de análisis, según fuente de P.

Para las variables estudiadas se observó un efecto significativo de la fuente de P utilizada y el método de análisis utilizado, así como la interacción entre ambos factores ( $p < 0,05$ ). En el Cuadro 8 se presenta la separación de medias para el RMSE AS, RMSE RR y los intervalos de confianza del valor de P suelo para un RR del 90% (IC<sub>90</sub>), de los métodos de análisis según la fuente de P utilizada, complementada con los  $r^2$  presentados anteriormente en el ANAVA del modelo completo.

Cuadro 8. Coeficientes de determinación ( $r^2$ ), raíz cuadrada del cuadrado medio del error para el P extractable en suelos (RMSE STV), raíz cuadrada del cuadrado medio del error para el rendimiento relativo (RMSE RR) y ancho de los intervalos de confianza para el 90% del rendimiento relativo ( $IC_{90}$ ), para cada método de análisis, según fuente de P.

Fuente P	Método	$r^2$ *	RMSE STV (mg P kg <sup>-1</sup> )	$IC_{90}$ (mg P kg <sup>-1</sup> )	RMSE RR (%)
ST	Bray I	0,43 a	4,9 B c	6,3 b	24,2 b
	Resinas catiónicas	0,37 b	5,9 B a	7,3 a	25,8 a
	Ácido cítrico	0,44 a	5,2 B b	6,5 b	23,1 c
FN	Bray I	0,38 c	2,4 c	3,2 c	25,9 a
	Resinas catiónicas	0,50 b	19,6 a	17,4 a	22,3 b
	Ácido cítrico	0,53 a	12,6 b	14,1 b	20,5 c

- Corresponden a los resultados de la separación de medias del ANAVA, Cuadro 6. Medias con una letra común en una misma fuente y en una misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ ).

Cuando se usa ST, resinas catiónicas es el que presenta significativamente el mayor RMSE STV, seguido de ácido cítrico, siendo Bray I el que tiene significativamente el menor RMSE ( $p < 0,05$ ). Por su parte, los valores de RMSE RR fueron mayores significativamente para resinas catiónicas, seguido de Bray I, y siendo ácido cítrico el de menor valor ( $p < 0,05$ ).

Cuando se usa FN, el método Bray I fue el que tuvo significativamente el menor RMSE STV, seguido de ácido cítrico, siendo resinas catiónicas el que tuvo significativamente el mayor RMSE STV ( $p < 0,05$ ). El RMSE RR fue significativamente más alto para Bray I, seguido de resinas catiónicas, siendo ácido cítrico que el presentó el menor valor ( $p < 0,05$ ).

Como alternativa al uso del  $r^2$  de una ecuación de calibración, el ancho de los intervalos de confianza de los niveles críticos de P extractable ( $IC_{90}$ ) permite una mejor valoración de la precisión del método en cuanto a la ocurrencia de respuesta de la pastura (Moody *et. al.*, 2015; Speirs *et al.*, 2013). Los resultados se presentan en el Cuadro 8. Para el caso de las fertilizaciones con ST, resinas catiónicas fue el que tuvo significativamente los mayores IC, mientras que Bray I y ácido cítrico no presentaron diferencias significativas entre si ( $p < 0,05$ ). Para el caso de las fertilizaciones con FN, los resultados fueron similares a los registrados para la variable RMSE STV, donde resinas catiónicas fue el que significativamente tuvo el mayor IC, seguido de ácido cítrico, y siendo Bray I el que presentó significativamente los menores IC ( $p < 0,05$ ).

### **3.5.5. Correlaciones entre los diferentes métodos de análisis**

En el Cuadro 9 se presentan las correlaciones entre los métodos analíticos de P en suelo para el total de los 4 años, particionando según la fuente de P utilizada.

Cuadro 9. Correlaciones de Pearson entre los diferentes métodos analíticos según fuente de P utilizada.

<b>Fuente</b>	<b>Método</b>	<b>Bray</b>	<b>Resinas</b>
<b>FN</b>	Resinas	0,52	
	Cítrico	0,52	0,85
<b>ST</b>	Resinas	0,75	
	Cítrico	0,84	0,90

*n*= 3336

Las correlaciones obtenidas para FN entre los diferentes métodos fueron menores que las obtenidas para ST. Para FN, Bray I presentó igual correlación entre los métodos Resinas catiónicas y Ácido cítrico. Para esta misma fuente, la correlación entre resinas catiónicas y Ácido cítrico fue la más alta (0,85). Para ST, la correlación entre resinas catiónicas y ácido cítrico fue la más alta, seguida de la correlación entre Bray I y ácido cítrico. Resinas catiónicas con Bray I fue la combinación que presentó la menor correlación cuando el fertilizante utilizado fue ST.

### 3.6. DISCUSIÓN

Los tres métodos evaluados mostraron una respuesta positiva en la cantidad de P extractable al aumento en los niveles de P en el suelo (Neyroud y Lischer, 2003), a pesar de que la sensibilidad y el nivel de ajuste de cada método depende de la fuente de P utilizada en las fertilizaciones.

Los coeficientes de determinación que relacionan P suelo con RR encontrados en el presente trabajo, en general, son más bajos a los reportados por la bibliografía. Este resultado está explicado por los diferentes factores evaluados en el modelo, que analizados en su conjunto generan una mayor variabilidad en la respuesta. A pesar de dicha variabilidad, fue posible identificar diferencias en el ajuste entre los métodos de análisis de P estudiados. De igual manera, si tomáramos una submuestra de las regresiones obtenidas, reteniendo solamente aquellas con  $r^2$  mayor que 0,6 ( $n= 196$ ), y aplicáramos el mismo ANAVA, los resultados serían los mismos a los presentados en el Cuadro 6 (información no presentada).

Las diferencias entre métodos de análisis pueden ser relacionadas con la naturaleza del extractante en cada caso, y los respectivos mecanismos fisicoquímicos para remover o "solubilizar" el P de la matriz del suelo (Mallarino, 2003; Kamprath y Watson, 1980). Los mecanismos posibles son básicamente: la acción solvente de la acidez, la sustitución del anión fosfato por otros aniones, la formación de complejos con cationes polivalentes que se encuentran ligados al P (Ca-P, Al-P, y Fe-P), y la hidrólisis de estos cationes ligados al P.

#### 3.6.1. Diferencias entre métodos cuando se usa FN

El método Bray I fue desarrollado para no detectar P proveniente de las fosforitas que se utilizaban en Illinois (Zamuz y Castro, 1974), y tiene baja capacidad para extraer el P que está unido al Ca (Chang y Jackson, 1957) y que es el componente principal de fosfato que aporta la fosforita. La solución

extractante del método Bray I es un ácido fuerte diluido (HCl 0,025N) más fluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$  0,03N). En este método, la extracción de P se desarrolla por efecto del flúor ( $\text{F}^-$ ) que forma complejos con el hierro y el aluminio para dejar el P en forma soluble. Además, por efecto de la acidez, se disuelve una fracción reactiva de fosfato de calcio. Sin embargo, esto no impide que, durante el procedimiento analítico, el P sea adsorbido a carbonato de calcio u óxidos hidratados de Fe o Al. En suelos calcáreos (es decir con contenidos importantes de carbonatos de calcio) o en situaciones de fertilización con FN, también ocurre que el Ca solubilizado por el medio ácido pasa a reaccionar con el P para formar compuestos insolubles, retirando nuevamente al P de la solución, sumado a que parte del HCl del extractante se gasta reaccionando con los  $\text{CaCO}_3$  del suelo y queda menos HCl para reaccionar con P-Ca.

Por otra parte, las leguminosas poseen la capacidad de solubilizar compuestos complejos unidos al P a través de la liberación radicular de ácidos orgánicos (malato, citrato y oxalato), por lo que son muy eficientes en la utilización de roca fosfatada como fuente de P (Neumann y Römheld, 2007; Lambers *et. al.*, 2008). El P-Ca es un componente importante de las fosforitas, por lo que al no ser detectado por el método Bray I, pero sí ser utilizado por la planta en el mediano y largo plazo, presenta como resultado bajos ajustes entre P en suelo medido por Bray I y el rendimiento relativo.

El método del ácido cítrico (junto con otros métodos basados en ácidos débiles), también ejerce su efecto extractante a través de la formación de complejos con cationes polivalentes para liberar P, siendo en este caso por medio del anión orgánico citrato (Kamprath y Watson, 1980). Además, el citrato actúa por sustitución aniónica liberando el P adsorbido e impidiendo que ocurra readsorción de P. Esto lo hace más adecuado para el caso de situaciones de aportes significativos de P unidos al Ca como es el caso de las fertilizaciones con FN.

Las consideraciones hechas en estos párrafos permiten explicar el mejor ajuste para Ácido cítrico en comparación con Bray I, cuando se usa FN como fuente de P.

En el método de resinas catiónicas, el mecanismo de solubilización de P es por medio de la fijación de cationes (hierro, aluminio, calcio) por parte de las resinas catiónicas, con un resultado comparable al de la formación de complejos. Adicionalmente, tratándose de un proceso de intercambio, se liberan hidrogeniones ( $H^+$ ) que acidifican el medio y por tanto también opera el mecanismo de la acción solvente de la acidez sobre una fracción reactiva de fosfatos de calcio (Morón, 1992; Zamuz y Castro, 1974). Resinas catiónicas y el ácido cítrico tendrían similar capacidad para extraer P-Ca, y por esta razón mostraron una alta correlación entre sí (Cuadro 9) y escasa diferencia en su relación con respuesta vegetal (Cuadro 6).

### 3.6.2. Diferencias entre métodos cuando se usa ST

En situaciones donde el aporte de P se efectúa por medio de fuentes solubles como el superfosfato triple, Bray I tiene una mayor asociación lineal con ácido cítrico que con resinas catiónicas, lo que se ve reflejado en las correlaciones del Cuadro 9 ( $r= 0,84$  y  $0,75$ , respectivamente). Existe por parte de las resinas catiónicas una extracción más fuerte del P proveniente del suelo (Casanova, *et. al.*, 1975), especialmente en aquellos suelos más ricos en cationes y de P-Ca. Los cationes provenientes de la matriz del suelo pueden intercambiarse con hidrogeniones de la resina, los cuales a su vez pueden solubilizar P. Por esto, resinas catiónicas podría provocar una sobrestimación del P disponible para la pastura, lo que se refleja en un menor ajuste con el RR de la pastura (Cuadro 6).

El efecto de la fuente de P tiene una importancia muy significativa en el ajuste de los métodos de análisis. Las condiciones del suelo y climáticas varían en los diferentes sitios evaluados, teniendo un efecto importante en la eficacia relativa de los diferentes métodos de análisis y fuentes de P

utilizadas (Holford y Mattingly 1979). Es así que cuando usamos FN, el método Bray I, al tener tan baja capacidad para detectar el P proveniente de esta fuente, genera rangos de variación bajos que se expresan en los menores valores de RMSE ST e IC<sub>90</sub> encontrados. Además, la solubilidad de la FN es más dependiente de las condiciones climáticas y químicas del suelo, en comparación con el ST (Zapata, 2007; Khasawneh y Doll, 1978). Esto explica el mayor rango de variación de los valores de P extractable en FN, llevando a que se observen IC<sub>90</sub> más amplios que el ST.

Por último, es oportuno recordar que los métodos de P extractable pueden tener distintos niveles críticos según tipos de suelo o tipos de pasturas (Casanova *et. al.*, 1975). Especialmente para el caso de proponer el ácido cítrico como método para pautar recomendaciones de fertilización fosfatada de pasturas, será necesario desarrollar los niveles críticos respectivos.



### **3.7. CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos durante 4 años, a partir de ensayos de campo sobre fertilización con P en pasturas, que cubrieron 14 tipos de suelos, distribuidos en varias regiones de Uruguay, generaron aproximadamente 654 curvas de calibración entre los niveles de P suelo y el rendimiento relativo de la pastura. El método analítico del ácido cítrico ha mostrado en general un buen comportamiento para el total de los suelos y fuentes evaluadas. Se infiere que el método del ácido cítrico extrae una proporción de las formas de P disponible en suelo que se correlaciona de buena manera con lo que la planta absorbe para producir forraje. Para fuentes solubles, no habría diferencias entre los métodos Bray I y cítrico, teniendo Bray I una menor variabilidad en términos estadísticos en los valores de P en suelo.

En un próximo paso, los resultados se utilizarán para ajustar las recomendaciones actuales de fertilización con P. De esta manera se estaría contribuyendo a generar recomendaciones de fertilización fosfatadas más precisas, disminuyendo posibles impactos ambientales negativos producto de una sobre fertilización con P en pasturas.

### 3.8 BIBLIOGRAFÍA

- Anderson G, Peverill C, Brennan, R.** 2013. Soil sulfur–crop response calibration relationships and criteria for field crops grown in Australia. *Crop & Pasture Science*, 64: 523–530.
- Bachmeier A, Rollán A.** 1994. Fósforo extractable en un suelo Haplustol éntico del área semiárida central de Córdoba, Argentina. Comparación de dos métodos de evaluación. En: *Agriscientia*, Vol. XI. pp 23-28.
- Bell M, Moody P, Anderson G, Strong W.** 2013. Soil phosphorus–crop response calibration relationships and criteria for oilseeds, grain legumes and summer cereal crops grown in Australia. *Crop & Pasture Science*, 64: 499–513.
- Bordoli M.** 1998. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. En: *Manejo de la fertilidad en sistemas extensivos (Cultivos y Pasturas)*. Facultad de Agronomía. Unidad de Educación Permanente y Postgrado. 71-79.
- Bracco G, Hernández S.** 2018. Relaciones entre diferentes métodos de estimación de fósforo lábil en suelos de la cuenca del río Santa Lucía y su implicancia en las recomendaciones de fertilización. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 109 p.
- Bray R, Kurtz T.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59:39-45.
- Brennan R, Bell M.** 2013. Soil potassium–crop response calibration relationships and criteria for field crops grown in Australia. *Crop & Pasture Science*, 64: 514–522.
- Casanova O, Genta H, Mallarino A.** 1975. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo asimilable en suelos del

Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Uruguay. Facultad de Agronomía.  
55 p.

**Chang S, Jackson M.** 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*,  
84: 133-144.

**Correndo A.** 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con  
nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis Magister  
Facultad de Agronomía. Área Ciencias del Suelo. Universidad de  
Buenos Aires. 165 p.

**Correndo A, Salvagiotti F, García F, Gutiérrez Boem H.** 2017b. Modified  
ALCC Excel Tool – v3. [En línea]. Consultado el 4 junio 2017.  
Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/317953836\\_Modified\\_ALCC\\_Excel\\_Tool](https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool)

**Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo  
C.** InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de  
Córdoba, Argentina.

**Dyer R.** 1894. On the analytical determination of probable available mineral  
plant food on soils. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 65:  
115-167.

**Dyson C, Conyers M.** 2013. Methodology for online biometric analysis of  
soil test–crop response datasets. *Crop & Pasture Science*, 64: 435-441.

**Heckman J, Jokela W, Morris T, Beegle D, Sims J, Coale F, Herbert S,  
Griffin T, Hoskins, B, Jemison J, Sullivan W, Bhumbla D, Estes G,  
Reid W.** 2006. Soil test calibration for predicting corn response to  
phosphorus in the Northeast USA. *Agronomy Journal*, 98: 280–288.

- Hernández J.** 2008. Métodos para estimar la disponibilidad de fósforo en los suelos. En: Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Montevideo, Uruguay: INIA. Serie técnica N° 172. pp. 7-16.
- Holford I, Mattingly G.** 1979. The effects of phosphate buffering on the extraction of labile phosphate by plants and by soil tests. *Australian Journal of Soil Research*, 17: 511-14.
- Kamprath E, Watson M.** 1980. Conventional Soil and Tissue Tests for Assessing the Phosphorus Status of Soils. Soils and tissue tests for P in soils. ASA-CSSA-SSA Chapter 16: 434-469.
- Khasawneh F, Doll E.** 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Advances in agronomy*, Vol. 30: 159-206.
- Lambers H, Raven J, Shaver G, Smith S.** 2008. Plant nutrient acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology and Evolution*, 23: 95-103.
- Mallarino A.** 2003. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively-coupled plasma emission spectroscopy determination methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1928-1934.
- McKenzie R, Bremer, E, Kryzanowski L, Middleton A, Solberg E, Heaney D, Coy G, Harapiak J.** 2003. Yield benefit of phosphorus fertilizer for wheat, barley, and canola in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 83: 431–441.
- Moody P, Dyson C, Speirs S, Scott B, Bell R.** 2015. Reply to ‘Comments on papers relating to soil phosphorus testing in ‘Making better fertilizer decisions for cropping systems in Australia’ by I.C.R. Holford. *Crop and Pasture Science*, 66: 110-111.

- Morón A.** 2007. Avances hacia a una nueva guía de fertilización de pasturas. En: Seminario internacional de nutrición vegetal Paysandú, Uruguay, 2007. Criterios para la Fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú: UDELAR. EEMAC, Facultad de Agronomía.
- Morón A.** 2004. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En: Seminario de Actualización Técnica: Fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Treinta y Tres, Uruguay: INIA. Serie Actividades de Difusión, 356: 17-31.
- Morón A.** 1992. El fósforo en el sistema suelo-planta. Rev. INIA Inv. Agr, 1(1): 45 - 60.
- Neumann G, Römheld V.** 2007. The Release of Root Exudates as Affected by the Plant Physiological Status, The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface. *Soils, Plants, and the Environment*, CRC: 23-72.
- Neyroud J, Lischer P.** 2003. Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166: 422-431.
- Posada S, Noguera R.** 2007. Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en evaluación de alimentos para animales. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 20:141-148.
- Speirs S, Scott, B, Moody, P, Mason, S.** 2013. Soil phosphorus tests II: A comparison of soil test-crop response relationships for different soil tests and wheat. *Crop and Pasture Science*, 64: 469–479.
- Webster R.** 1997. Regression and functional relations. *European Journal of Soil Science*, 48: 557–566.

**Zamalvide J, Mallarino A, Casanova O, Genta H.** 1975. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 55 p.

**Zamuz M, Castro J.** 1976. Evaluación de seis fuentes de fosforo en nueve tipos de suelo. Boletín técnico N° 23. Centro de Investigaciones Alberto Boerger. Colonia, Uruguay, CIABB. 16 p.

**Zamuz M, Castro L.** 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelo para determinar fósforo asimilable. Colonia, Uruguay: CIABB. Boletín Técnico N° 15.

**Zapata F.** 2007. Utilización de roca fosfórica para una agricultura sostenible. Boletín FAO 13: Fertilizantes y Nutrición Vegetal. Roma. [En línea]. Consultado 20 febrero 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-y5053s.pdf>

**Ziadi N, Whalen J, Messiga A, Morel C.** 2013. Chapter Two - Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems, En: Donald L. Sparks, Editor(s), *Advances in Agronomy*, Academic Press, 2013, Volume 122: 85-126. [En línea]. Consultado 3 marzo 2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124171879000024>

4

#### 4. DISCUSIÓN FINAL

Las investigaciones realizadas tuvieron como finalidad ampliar la capacidad de diagnóstico de los niveles de P extractable en suelo explorando un método analítico con menos estudio a nivel de país como es el del ácido cítrico. Encontrar alternativas más precisas de diagnóstico de los niveles de P en suelo, principalmente en situaciones donde es sabido que el método Bray I no se ajusta, como por ejemplo determinados tipos de suelos (Basalto), o cuando se usa fosforita como fuente de P, es un gran desafío.

Los resultados encontrados confirman que el manejo de las fertilizaciones al voleo, independientemente del tipo de fuente de P utilizada, no establece la necesidad de un muestreo más superficial (7,5 cm) en comparación con una muestra más profunda de 15 cm. Esto nos permite seguir usando la profundidad de 15 cm para el muestreo, teniendo la posibilidad de que en la misma muestra se incluya el análisis de otros nutrientes, como por ejemplo el potasio.

A pesar de la variabilidad encontrada entre los ajustes de las diferentes curvas de calibración generadas a partir de los 14 tipos de suelos estudiados, fue posible encontrar diferencias entre los métodos de P extractable evaluados. El método del ácido cítrico fue el que presentó los mejores ajustes entre los valores de P extractable en suelo y el rendimiento de materia seca de las pasturas implantadas en los 14 sitios evaluados, independientemente de la fuente de P utilizada. El método Bray I, cuando utilizamos fuentes solubles, tienen similar ajuste que el cítrico. Por ello se supone que el método Bray I continúa siendo recomendable para suelos del uso agrícola de texturas medias y pesadas del sur y litoral del país, si se usan fuentes solubles (Bordoli, 1998).

A partir de la información generada, es necesario continuar con las etapas de calibración e interpretación de los resultados. Por ejemplo, se deberán desarrollar niveles críticos o clases de interpretación del análisis de suelo.

Junto con la generación de otros indicadores (tasa de descenso, equivalente de fertilizante) se deberá plasmar todo en un sistema de recomendación de fertilización fosfatada. Esto es el objetivo general del proyecto en el cual se ubica el presente trabajo.

En situaciones donde no se conoce la historia de fertilización, el método del ácido cítrico es el que mejor se adecua para valorar la disponibilidad de P. Luego, usando las calibraciones específicas para dicho método, fuente de P a utilizar y tipo de pastura, se procedería a realizar las recomendaciones de fertilización correspondientes.

Es preciso aplicar cautela en cuanto al alcance de la información presentada. La información generada es válida dentro de los rangos de suelos y pasturas que fueron analizadas. La posibilidad de inferencia en cuanto al comportamiento de los factores analizados sobre otro tipo de situaciones, es un tema de estudio e investigación a futuro.

Los resultados obtenidos hasta el momento pueden ser aún más refinados, aplicando la misma metodología de análisis (ALCC), pero restringiendo nuestro universo de suelos a situaciones más puntuales donde pueda diferenciarse alguna característica de suelo importante, como, por ejemplo, suelos con pH extremos, diferenciados según contenidos de Ca o % de arcilla. Esto nos permitiría aumentar el grado de ajuste entre los resultados de los análisis de suelo y el rendimiento de la pastura. De todos modos, si el objetivo fuera evaluar el comportamiento de los métodos para suelos con cierto material parental, la base de datos de este estudio ofrecería limitantes importantes en razón del escaso número de sitios para cada material parental.

Es bien conocida la necesidad del P como base para sostener las productividades de nuestras pasturas, por lo cual es necesario seguir generando información a nivel de país, que permita un uso cada vez más eficiente y racional del fósforo enfocado a la nutrición vegetal. En la actualidad, existe una creciente preocupación por el cuidado del medio



ambiente ante cualquier tipo de manejo agrícola, y el fósforo como nutriente es uno de los principales focos de la discusión. A esto se suma la necesidad de aumentar la cantidad de producto (leche, carne, granos, lana) de la forma más eficiente posible por unidad de superficie, como forma de seguir manteniendo la sustentabilidad económica de nuestros sistemas.

Es así, que la integración de todos los conocimientos nos va a permitir mitigar en parte los posibles efectos adversos que desde el punto de vista ambiental se puede estar generando. De cualquier manera, referido a este punto, el manejo de la fertilización fosfatada (dosis, tipo de fuente, momento, forma de aplicación) es sólo un componente del complejo sistema, donde la utilización del forraje juega un papel muy importante.

El estudio de la respuesta individual de las pasturas a un nutriente, así como la generación de indicadores objetivos de manejo y medición a nivel del suelo es una primera etapa de generación del conocimiento muy necesaria. Es cada vez más imperiosa la necesidad de seguir generando información donde estén integrados otros nutrientes (nitrógeno, potasio, azufre) para desarrollar un sistema de recomendación y manejo integral de la nutrición vegetal en pasturas.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson G, Peverill C, Brennan R.** 2013. Soil sulfur–crop response calibration relationships and criteria for field crops grown in Australia. *Crop & Pasture Science*, 64: 523–530.
- Bachmeier A, Rollán A.** 1994. Fósforo extractable en un suelo Haplustol éntico del área semiárida central de Córdoba, Argentina. Comparación de dos métodos de evaluación. *Agriscientia*, Vol. XI: pp 23-28.
- Barbagelata P, Melchori R.** 2010. Fertilización fosfatada para trigo en siembra directa en entre ríos: diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. Actualización técnica N° 1. Cultivos de invierno. Paraná: INTA Paraná. pp. 71-78.
- Barbazán M, Ferrando M, Zamalvide J.** 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia*, 11(1): 22-34.
- Barber J, Stanley A.** 1995. Nutrient Absorption by plant roots. En: Barber J, Stanley A. (Eds). *Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach*. Canada: Jhon Wiley and Sons. pp. 85-110
- Bell M, Moody P, Anderson G, Strong W.** 2013. Soil phosphorus–crop response calibration relationships and criteria for oilseeds, grain legumes and summer cereal crops grown in Australia. *Crop & Pasture Science*, 64: 499–513.
- Bermúdez R, Ayala W, Carámbula M.** 2008. Estrategias de fertilización fosfatada para mejoramientos de trébol blanco y lotus en suelos con B textural. En: Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Serie técnica N° 172. Montevideo: INIA. pp. 81-89.
- Bordoli M.** 2007. Fertilización de pasturas de leguminosas y mezclas de gramíneas y leguminosas. En: Manejo de la fertilidad en sistemas

extensivos (Cultivos y Pasturas). Unidad de Educación Permanente y Postgrado. Montevideo: Facultad de Agronomía. pp. 71-79.

**Bordoli M, Quincke A, Marchesi A.** 2004. Fertilización fosfatada de trigo en siembra directa. [CD rom]. Actas del XIX Congreso de la AACS. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

**Bordoli M.** 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. *Siembra Directa en el Cono Sur*. Serie Documentos. Montevideo. PROCISUR. pp. 289-297.

**Bordoli M, Mallarino A.** 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agronomy Journal*, 90:27–33.

**Bracco G, Hernández S.** 2018. Relaciones entre diferentes métodos de estimación de fósforo lábil en suelos de la cuenca del río santa lucía y su implicancia en las recomendaciones de fertilización. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 109 p.

**Bray H, Kurtz T.** 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59:39-45.

**Brennan R, Bell M.** 2013. Soil potassium–crop response calibration relationships and criteria for field crops grown in Australia. *Crop & Pasture Science*, 64: 514–522.

**Calviño P, Echeverría H, Redolatti M.** 2000. Estratificación de fósforo en el suelo y diagnóstico de la fertilización fosfatada en trigo en siembra directa. En: XVII Congreso Argentino de producción animal. Mar del Plata. Argentina.

**Casanova O, Genta H, Mallarino A.** 1975. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fosforo asimilable en suelos del

Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo. Uruguay: Facultad de Agronomía.  
55 p.

**Chang S, Jackson M.** 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 84: 133-144.

**Correndo A.** 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis Magister Buenos Aires. Argentina. Facultad de Agronomía. Área Ciencias del Suelo. Universidad de Buenos Aires. 165 p.

**Correndo A, Salvagiotti F. García F, Gutiérrez Boem H.** 2017a. A modification of the arcsine-log calibration curve for analyzing soil test 1 value-relative yield relationships. *Crop and Pasture Science*, 68: 297–304.

**Correndo A, Salvagiotti F. García F, Gutiérrez Boem H.** 2017b. Modified ALCC Excel Tool – v3. [En línea]. Consultado 4 junio 2017. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/317953836\\_Modified\\_ALCC\\_Excel\\_Tool](https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool)

**Correndo A, García F.** 2016. Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos extensivos en argentina. En: XXIV Congreso AAPRESID. Argentina.

**Correndo A, García F.** 2012. Alternativas de diagnóstico para el manejo nutricional en cultivos extensivos. En: VI Congreso Boliviano de la Ciencia del suelo (Vol. 8).

**Delgado A, Scalenghe R.** 2008. Aspects of phosphorus transfer in Europe. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 171: 552–575.

- Del Pino A, Ruiz A.** 1986. Muestreo de suelos para recomendaciones de refertilización de pasturas convencionales. Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay. 88 p.
- Di Rienzo J, Casanoves F, Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Robledo C.** InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
- Doberman A, Cassman K.** 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 247: 153–175.
- Dyer R.** 1894. On the analytical determination of probable available mineral plant food on soils. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 65: 115-167.
- Dyson B, Conyers M.** 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. *Crop and Pasture Science*, 64: 435–441.
- Evans P.** 1977. Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 20: 331-235.
- Ferraris G.** 2005. Muestreo y Análisis de Suelo: Punto de partida hacia un diagnóstico de fertilidad. Desarrollo Rural INTA.
- Fixen P.** 2005. Decision support systems in integrated crop nutrient management. Proceedings 569. The International Fertilizer Society. YORK, UNITED KINGDOM. 32pp.
- Formoso F.** 2007. Estudios de sistemas radicales de gramilla y especies forrajeras sembradas en directa y con preparación convencional de suelo. En: Avances en la siembra directa de pasturas. Montevideo, Uruguay: INIA Serie Técnica 161. pp. 119-138.

- Galantini J, Suñer L, Iglesias J.** 2007. Sistemas de labranza en el sudoeste bonaerense: Efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. En: RIA, INTA, Argentina. 36 (1): 63-81
- García F, Ciampitti I, Rubio G, Picone L.** 2009. La Fertilización Fosfatada en la Argentina: Actualidad, Manejo y Perspectivas. Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, Nitrógeno y Cultivos de Cobertura”, AACCS. Bahía Blanca.
- García F, Picone L.** 2004. Fósforo: Dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. En: *Informaciones Agronómicas*, 55: 1-5.
- Godfray H, Beddington J, Crute I, Haddad L, Lawrence D, Muir J, Pretty J, Robinson S, Thomas S, Toulmin C.** 2010. Food security: The challenges of feeding 9 billion people. *Science*, 327: 812–818.
- Guertal E, Eckert S, Traina T, Logan T.** 1991. Differential Phosphorus Retention in Soil Profiles under No-Till Crop Production. *Soil Science Society of America Journal*, 55:410-413.
- Guppy C, Menzies N, Moody P, Blamey F.** 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Research*, 43: 189-202.
- Havlin J, Beaton S, Tisdale S, Nelson W.** 2005. Soil Fertility and Fertilizers. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EE.UU. 7a. edición. 515p.
- Haygarth P, Sharpley A.** 2000. Terminology for phosphorus transfer. *Journal of Environmental Quality*, 29: 10–15.
- Heckman J, Jokela W, Morris T, Beegle D, Sims J, Coale F, Herbert S, Griffin T, Hoskins B, Jemison J, Sullivan W, Bhumbla D, Estes G, Reid W.** 2006. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the Northeast USA. *Agronomy Journal*, 98: 280–288.

- Hernández J, Berger A, Deambrosi E, Lavecchia A.** 2013. Phosphorus Soil Tests for Flooded Rice Grown in Contrasting Soils and Cropping. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44:1193-1210.
- Hernández J.** 2008a. Respuesta al agregado de fósforo en pasturas con leguminosas en las planicies del Este. En: Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Montevideo, Uruguay: INIA. Serie técnica N° 172: pp. 121-130.
- Hernández J.** 2008b. Métodos para estimar la disponibilidad de fósforo en los suelos. En: Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Montevideo, Uruguay: INIA. Serie técnica N° 172. pp. 7-16.
- Hernández J, Otegui O, Zamalvide JP.** 1995. Formas y contenido de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Montevideo. Facultad de Agronomía. Boletín de Investigación N° 43. 27 p.
- Hochmuth G, Hanlon E.** 2010. Principles of Sound Fertilizer recommendations. SL315. Department of Soil and Water Sciences, extension. UF/IFAS. University of Florida. [En línea]. Consultado 23 enero 2017. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu>
- Holanda F, Mengel D, Paula A, Carvalho J, Bertoni J.** 1998. Influence of crops rotations and tillage systems on phosphorus and potassium stratification and root distribution in the soil profile. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29: 2383–2394.
- Holford I.** 1980. Effects of phosphate buffer capacity on critical levels and relationships between soil tests and labile phosphate in wheat growing soils. *Soil Research*, 18(4): 405-414.
- Holford I, Mattingly, G.** 1979. The effects of phosphate buffering on the extraction of labile phosphate by plants and by soil tests. *Soil Research*, 17(3): 511-14.

- Jobbágy W, Jackson R.** 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1): 51-77.
- Johnston E, Poulton P, Fixen P, Curtin C.** 2014. Phosphorus: Its Efficient use in agriculture. En: Sparks D. (Eds). *Advances in Agronomy*. Academic Press. Volume 123. pp. 177-228.
- Kamprath E, Watson M.** 1980. Conventional Soil and Tissue Tests for Assessing the Phosphorus Status of Soils. Soils and tissue tests for P in soils. ASA-CSSA-SSA Chapter 16: 434-469.
- Kashchandra G.** 2005. Phosphorus and Plant Nutrition: An Overview. En: J. T. Sims, A. N. Sharpley (Eds) *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. Madison, WI, USA: *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*.
- Khasawneh F, Dol, E.** 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Advances in agronomy*. Academic Press. Vol. 30: 159-206.
- Kitchen R, Havlin J, Westfall D.** 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 54:1661-1665.
- Kovar L, Pierzynski G.** 2009. Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters. Southern Cooperative Series Bulletin No. 408. USDA-ARS National Soil Tilth Laboratory. Virginia Tech University. ISBN: 1-58161-408-x. [En línea]. Consultado en: 30 enero 2017. Disponible en: [http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/P\\_Methods2ndEdition2009.pdf](http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/P_Methods2ndEdition2009.pdf)
- Lambers H, Raven J, Shaver G, Smith S.** 2008. Plant nutrient acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology and Evolution*, 23: 95-103.



- Legendre P, Legendre L.** 1998. Interpretation of ecological structures. Numerical ecology. Vol. 20. 2nd English: 497–545.
- Leinweber P, Turber B, Meissner R.** 2002. Phosphorus. Agriculture, hydrology and water quality. Oxon, UK. CABI Publishing, CAB International. pp. 29–56.
- Mallarino A, Borges R.** 2006. Phosphorus and Potassium Distribution in Soil Following Long-Term Deep-Band Fertilization in Different Tillage Systems. En: Nutrient Management & Soil & Plant Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 70:702–707.
- Mallarino A.** 2003. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively-coupled plasma emission spectroscopy determination methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67:1928-1934.
- Mallarino A.** 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*, 60:1473-1481.
- McKenzie R, Bremer E, Kryzanowski L, Middleton A, Solberg E, Heaney D, Coy G, Harapiak J.** 2003. Yield benefit of phosphorus fertilizer for wheat, barley, and canola in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 83: 431–441.
- Moody P, Dyson C, Speirs S, Scott B, Bell R.** 2015. Reply to ‘Comments on papers relating to soil phosphorus testing in ‘Making better fertilizer decisions for cropping systems in Australia’ by I.C.R. Holford. *Crop and Pasture Science*, 66: 110-111.

- Morgan R.** 2005. Processes and mechanics of erosion. En: Morgan, R. (Eds). Soil Erosion and Conservation, third ed, Oxford: Blackwell. pp. 11-42.
- Morón A.** 2008. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En: Bermúdez, R, Ayala, W. (eds.). Seminario de actualización técnica: fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Montevideo, Uruguay: INIA. Serie Técnica 172. pp. 17-29.
- Morón A.** 2007. Avances hacia a una nueva guía de fertilización de pasturas. En: Seminario internacional de nutrición vegetal. Paysandú, Uruguay. Criterios para la Fertilización de cultivos y pasturas. Paysandú: UDELAR. EEMAC, Facultad de Agronomía.
- Morón A.** 2004. Relevamiento del estado nutricional y la fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona Este de Uruguay. En. Seminario de Actualización Técnica: Fertilización fosfatada de pasturas en la región este. Treinta y Tres, Uruguay: INIA. Serie Actividades de Difusión 356. pp. 17-31.
- Morón A.** 2002. Posibles usos de fosforitas para mejoramientos de pasturas en zonas ganadera tradicionales en Uruguay. En: Mejoramientos de campo en la región de Cristalino. Montevideo, Uruguay: INIA Uruguay. Serie técnica 129. pp. 97-114.
- Morón A.** 1992. El fósforo en el sistema suelo-planta. Rev. INIA Inv. Agr, 1(1): 45 - 60.
- Neumann G, Römheld V.** 2007. The Release of Root Exudates as Affected by the Plant Physiological Status. *The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface.* p 23.

- Neyroud J, Lischer P.** 2003. Do different methods used to estimate soil phosphorus availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166: 422-431
- Picone L, Zamuner E.** 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. *Informaciones agronómicas del Cono Sur* N° 16: 11-15.
- Pierzynski G, Logan T.** 1993. Crop, soil, and management effects of phosphorus test levels. *Journal of Production Agriculture*, 6: 513–520.
- Posada S, Noguera R.** 2007. Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en evaluación de alimentos para animales. *Revista colombiana de ciencias pecuarias*, 20:141-148.
- Pothuluri J, Kissel D, Whitney D, Thien S.** 1986. Phosphorus Uptake from Soil Layers Having Different Soil Test Phosphorus Levels 1. *Agronomy Journal*, 78(6): 991-994.
- Risso D, Cuadro R, Morón A.** 2014. Respuesta de un mejoramiento de campo a estrategias de fertilización fosfatada sobre un suelo de basalto. En: *Alternativas tecnológicas para los sistemas ganaderos del basalto*. Montevideo: INIA. Serie Técnica, 217: 35-53.
- Robbins SG, Voss R.** 1991. Phosphorus and potassium stratification in conservation tillage systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46: 298–300.
- Roberts T, Henry L.** 2001. El muestreo de suelo: Los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones agronómicas* N° 42. Inpofos, 4-13. [En línea]. Consultado 5 febrero 2018. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/1EE25C6ED2D143D0852579A300790532/\\$FILE/Inf-Agro42.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/1EE25C6ED2D143D0852579A300790532/$FILE/Inf-Agro42.pdf)

- Roy R, Finck A, Blair G, Tandon J.** 2006. Plant Nutrition for Food Security: A Guide to Integrated Nutrient Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin. No. 16.
- Salvo L, Hernández J, Ernst O.** 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil & tillage Research*, 109: 116-122.
- Schachtman D, Reid R, Ayling S.** 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, 116: 447-453.
- Scheiner J, Lavado R.** 1998. The role of fertilization on phosphorus stratification in no-till soils. *Soil Science and Plant Analysis*, 29:17-18: 2705-2711.
- Schlindwein J, Bortolon L, Fioreli E, Oliverira E, Gianello C.** 2013. Phosphorus and potassium fertilization in no till southern Brazilian soils. *Agricultural Sciences*, Vol.4, No.12<sup>a</sup>: 39-49.
- Sharpley A, Foy B, Withers P.** 2000. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: an overview. *Journal of Environmental Quality*, 29: 1–9.
- Sharpley A, Rekolainen S.** 1997. Phosphorus in agriculture and its environmental implications. In: Tuney, H, Carton, O.T, Brookes, P.C, Johnston, A.E. (Eds, Phosphorus Loss from Soil to Water. Wallingford, UK: CAB International. pp. 1–54.
- Sharpley A, Chapra S, Wedepohl R, Sims, J, Daniel, T, Reddy, K.** 1994. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *Journal of Environmental Quality*, 23, 437–451.

- Simard R, Beauchemin S, Haygarth P.** 2000. Potential for preferential pathways for phosphorus transport. *Journal of Environmental Quality*, 29: 97–105.
- Simpson J, Pinkerton A.** 1989. Fluctuations in soil moisture, and plant uptake of surface applied phosphate. *Fertilizer Research*, 20: 101–108.
- Sims, T.** 2000. Soil fertility evaluation. En M.E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. Boca Raton, Florida: CRC Press. pp. 113-153.
- Sinaj S, Stamm C, Toor G, Condrón L, Hendry T, Di H. Cameron K, Frossard E.** 2002. Phosphorus exchangeability and leaching losses from two grassland soils. *Journal of Environmental Quality*, 31: 319–330.
- Sparling G, Whale K, Ramsay A.** 1985. Quantifying the contribution from the soil microbial biomass to the extractable P levels of fresh and air-dried soils. *Australian Journal soil research*, 23: 613-621.
- Speirs S, Scot B, Moody P, Mason S.** 2013. Soil phosphorus tests II: A comparison of soil test-crop response relationships for different soil tests and wheat. *Crop & Pasture Science*, 64: 469–479.
- Stamm C, Fluhler H, Gächter R, Leuenberger J, Wunderli H.** 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *Journal of Environmental Quality*, 27: 515–522.
- Steve J, Kauwenbergh V, Stewart M, Mikkelsen R.** 2013. World Reserves of Phosphate Rock...a Dynamic and Unfolding Story. *Better Crops*. Vol 97. N° 13.
- Stewart J, Tiessen H.** 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*. Dordrecht, 4: 41-60.

- Stewart W, Hammond L, Kauwenbergh S.** 2005. Phosphorus as a natural resource. En: J. T. Sims, A. N. Sharpley (Eds.). Phosphorus: Agriculture and the Environment. Madison, WI, USA: *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*. (Agronomy Monograph, 46) pp. 3–22.
- Turner B, Haygarth P.** 2001. Phosphorus solubilization in rewetted soils. *Nature*: 411, 258.
- Walsh L, Beaton J.** 1973. Soil Testing and Plant Analysis. Revised edition. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. 491p.
- Watmuff G, Reuter D, Speirs S.** 2013. Methodologies for assembling and interrogating N, P, K, and soil test calibrations for Australian cereals, oilseed and pulse crops. *Crop & Pasture Science*, 64: 424–434.
- Webster R.** 1997. Regression and functional relations. *European Journal of Soil Science*, 48: 557–566.
- Weil R, Benedetto P, Sikora L, Bandel V.** 1988. Influence of tillage practices on phosphorus distribution and forms in three ultisols. *Agronomy Journal*, 80: 503–509.
- Zamalvide J.** 1996. Análisis de suelo. Curso de actualización en fertilidad de suelos. Tomo 1: Temas generales de fertilidad de suelos. Montevideo: Facultad de Agronomía. Instituto Clemente Estable: 41-45.
- Zamalvide J, Mallarino A, Casanova O, Genta H.** 1975. Evaluación del comportamiento de cinco métodos para estimar fósforo disponible en suelos del Uruguay. Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 55 p.
- Zamuner E, L. Picone, Echeverria H.** 2004. Comparación de métodos de extracción de fosforo disponible Bray I sobre la respuesta de la fertilización fosfatada en trigo. *Ciencia del Suelo*, 22(2): 57-63.

- Zamuner E, Picone L, Echeverría H.** 2003. Profundidad de muestreo de suelo: Relación del rendimiento con el fósforo disponible. En: Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". INPOFOS Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Zamuz M, Castro J.** 1976. Evaluación de seis fuentes de fosforo en nueve tipos de suelo. Boletín técnico N° 23. Centro de Investigaciones Alberto Boerger. Colonia, Uruguay: CIABB. 16 p
- Zamuz M, Castro J.** 1974. Evaluación de métodos de análisis de suelos para determinar fósforo asimilable. Montevideo: CIAAB. Boletín Técnico15. 15 p.
- Zapata F.** 2007. Utilización de roca fosfórica para una agricultura sostenible. Boletín FAO 13: Fertilizantes y Nutrición Vegetal. Roma. <http://www.fao.org/3/a-y5053s.pdf>
- Ziadi N, Whalen J, Messiga A, Morel C.** 2013. Chapter Two - Assessment and Modeling of Soil Available Phosphorus in Sustainable Cropping Systems. Donald L. Sparks, Editor(s), Advances in Agronomy, Academic Press, 2013, Volume 122: 85-126. [En línea]. Consultado 3 marzo 2017. Disponible en:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012417187900024>

## 6. ANEXOS

Cuadro 1. Propiedades físico- químicas de los suelos en muestras tomadas a 0-7,5 cm de profundidad en cada sitio de la red de fertilización de pasturas.

Sitio	pH	COS	N	Arena	Limo	Arcilla	P- Bray I	P- Resinas catiónicas	P- Cítrico
				----- % -----			----- mg P/ kg -----		
La Carolina	5,7	3,2	0,3	41,1	35,3	23,6	2,4	2,6	3,4
Trinidad	6,1	2,2	0,2	50,9	28,3	20,7	3,4	1,7	3,8
Florida	5,7	1,6	0,2	58,0	25,7	16,3	1,6	1,1	2,3
Pan de Azúcar	5,6	2,7	0,3	44,2	40,2	15,6	1,4	2,0	2,6
Palo a Pique	5,4	2,4	0,3	41,6	41,0	17,4	3,1	2,8	5,6
Isla Patrulla	5,4	2,3	0,2	25,6	42,4	32,0	1,2	1,1	1,3
Tres Puentes	5,4	2,5	0,2	35,0	40,6	24,4	2,7	1,0	3,4
Rincón	5,5	2,1	0,2	38,8	40,5	20,6	9,7	7,4	10,0
Sauce Cañote	5,7	1,5	0,1	52,5	27,9	19,6	2,9	6,0	4,9
Tambores	5,6	4,4	0,4	35,5	37,3	27,2	6,6	8,1	7,7
Glencoe	5,9	5,6	0,5	31,1	35,1	33,8	3,0	2,8	5,9
Ombúes	6,4	3,0	0,3	29,2	37,9	32,9	<u>15,6</u>	<u>26,1</u>	<u>20,2</u>
Young	6,0	3,0	0,3	50,3	25,7	24,0	5,4	5,6	6,6
Palmitas	5,7	1,8	0,2	50,8	21,9	27,4	10,2	10,4	9,3
Sitio	Bases intercambiables				Ac.Tit.	CIC pH7	BT	Al int.	% Sat. bases
	Ca	Mg	K	Na					
La Carolina	15,5	4,1	0,7	0,2	5,2	25,7	20,5		79,7
Trinidad	8,3	3,9	0,3	0,3	4,6	17,4	12,8		73,5
Florida	3,2	2,3	0,5	0,2	3,5	9,7	6,2		64,0
Pan de Azúcar	5,4	3,6	0,8	0,3	4,8	15,0	10,2		67,7
Palo a Pique	5,3	2,9	0,3	0,2	4,9	13,7	8,8		63,6
Isla Patrulla	4,5	3,1	0,8	0,2	5,7	14,2	8,5	0,1	59,8
Tres Puentes	6,9	2,6	0,7	0,3	4,8	15,3	10,5		68,8
Rincón	6,3	2,9	0,3	0,2	4,0	13,8	9,8		70,8
Sauce Cañote	5,3	1,7	0,1 9	0,1	4,6	11,9	7,3		61,3



<b>Tambores</b>	14,0	8,7	0,5	0,4	7,4	31,1	23,7	76,1
<b>Glencoe</b>	24,1	9,5	0,7	0,4	3,3	38,4	35,1	91,2
<b>Ombúes</b>	25,0	5,5	0,5	0,4	2,8	34,5	31,8	91,8
<b>Young</b>	18,9	3,4	0,6	0,2	4,4	27,6	23,2	83,8
<b>Palmitas</b>	13,7	3,3	0,5	0,1	3,5	21,1	17,6	83,2

Cuadro 2. Propiedades físico- químicas de los suelos en muestras tomadas a 7,5- 15 cm de profundidad en cada sitio de la red de fertilización de pasturas.

Sitio	pH	COS	N	Arena	Limo	Arcilla	P-Bray I	P-Resinas	P-Cítrico
<b>La Carolina</b>	5,8	2,8	0,3	39	36	25	1,7	1,7	3,0
<b>Trinidad</b>	6,2	2,0	0,2	51	27	22	3,2	1,4	3,0
<b>Florida</b>	5,8	1,4	0,2	59	25	16	1,5	1,1	2,0
<b>Pan de Azúcar</b>	5,6	2,0	0,2	44	38	18	1,0	1,5	2,0
<b>Palo a Pique</b>	5,4	1,9	0,2	42	40	19	2,1	1,9	4,0
<b>Isla Patrulla</b>	5,4	2,3	0,2	26	42	33	1,2	1,3	1,0
<b>Tres Puentes</b>	5,5	1,9	0,2	34	40	25	1,9	0,8	3,0
<b>Rincón</b>	5,6	1,8	0,2	39	40	21	6,7	6,5	7,0
<b>Sauce Cañote</b>	5,8	1,1	0,1	52	29	21	3,5	3,7	5,0
<b>Tambores</b>	5,7	3,6	0,3	33	37	30	4,9	5,4	6,0
<b>Glencoe</b>	6,1	4,5	0,4	29	36	35	2,1	1,6	4,0
<b>Ombúes</b>	6,7	2,4	0,2	29	37	34	9,7	20,8	16,0
<b>Young</b>	6,0	2,6	0,3	50	25	25	4,0	3,7	5,0
<b>Palmitas</b>	5,8	1,8	0,2	51	22	28	10,1	10,6	10,0
Sitio	Bases intercambiables				Ac.Ti t.	CIC	BT	Al	% Sat. bases
	Ca	Mg	K	Na					
	-----				meq / 100 g		-----		
<b>La Carolina</b>	16,8	4,0	0,6	0,3	4,9	26,4	21,5		81,5
<b>Trinidad</b>	8,6	3,8	0,3	0,3	4,4	17,3	12,9		74,6
<b>Florida</b>	3,2	2,3	0,5	0,2	3,3	9,5	6,1		64,6
<b>Pan de Azúcar</b>	5,3	3,8	0,7	0,3	4,0	14,1	10,1		71,5
<b>Palo a Pique</b>	5,0	2,6	0,2	0,3	4,3	12,5	8,1		65,1

<b>Isla Patrulla</b>	4,3	3,0	0,7	0,2	5,7	13,9	8,2	0,7	58,5
<b>Tres Puentes Rincón</b>	7,0	2,4	0,5	0,4	4,2	14,4	10,3		71,3
<b>Sauce Cañote</b>	6,1	2,6	0,3	0,2	3,8	12,9	9,2		70,9
<b>Tambores</b>	5,6	1,7	0,2	0,3	4,5	12,2	7,8		63,6
<b>Glencoe</b>	14,4	8,7	0,4	0,4	6,8	30,7	23,9		77,8
<b>Ombúes</b>	24,6	9,5	0,5	0,4	3,1	38,3	35,2		91,9
<b>Young</b>	24,3	5,4	0,5	0,4	2,0	33,0	31,0		94,0
<b>Palmitas</b>	18,9	3,2	0,5	0,3	4,5	27,4	22,9		83,7
	13,9	3,3	0,4	0,1	3,5	21,3	17,8		83,6

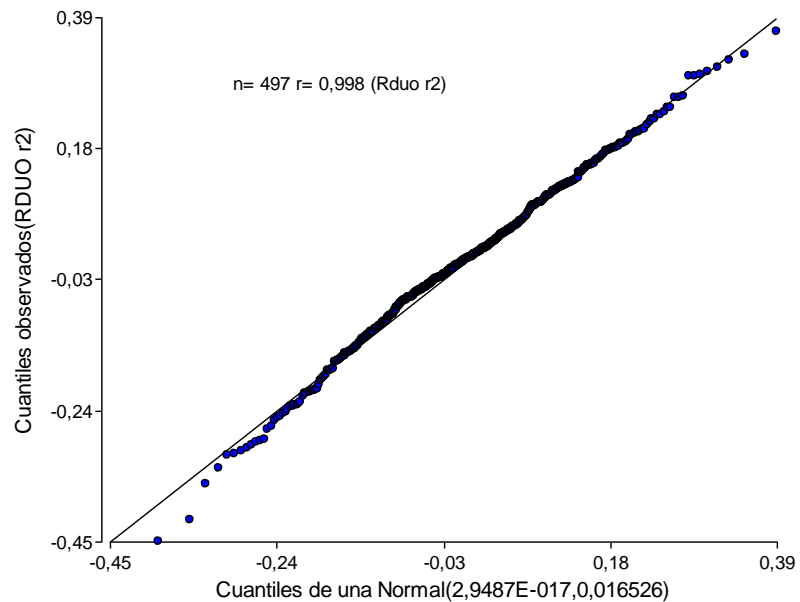


Figura 1. Q-Q plot de los residuos obtenidos versus los cuantiles teóricos de una distribución normal.

Cuadro 3. Prueba formal de Shapiro- Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E	W	P(Unilateral D)
RDUO $r^2$	497	0,0001	0,13	0,99	0,3787

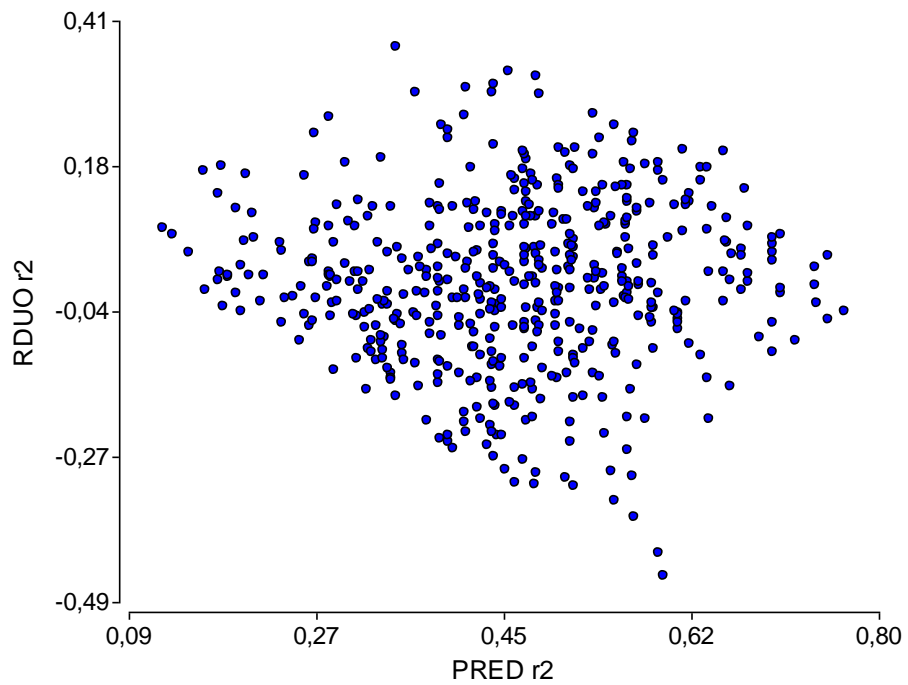


Figura 2. Valores predichos versus residuos del coeficiente de determinación ( $r^2$ ).