



**Trabajo Final para alcanzar el grado de Ingeniero  
Agrónomo**

**Respuesta a la fertilización fosforada en maíces  
tempranos y tardíos en el Noreste de la provincia de La  
Pampa.**

**Tesistas: María Ingracia Adema Bernal y Santiago Paternessi**

**Director: Elke Noellemeyer**

**2015**

## **RESUMEN:**

El fósforo (P) es un nutriente vegetal esencial y es el segundo en importancia para la producción de cultivos. En la región semiárida central (RSC) los contenidos de P disponible han disminuido debido a las pérdidas causadas por extracción de los cultivos y los procesos de erosión. Frente a esta situación la fertilización con fuentes externas de P es la única solución para mejorar los rendimientos de los cultivos. La disponibilidad de P para los cultivos y la respuesta a la fertilización fosfatada son afectadas principalmente por factores del suelo, ya que cuando un fertilizante fosfatado es aplicado al suelo, el P reacciona con los constituyentes del suelo, de manera que comienza a desaparecer el P de la solución al ser retenido por la fase sólida. Los fertilizantes sólidos generalmente poseen una solubilidad limitada, sobre todo en suelos alcalinos o calcáreos, por lo que se han desarrollado fuentes líquidas de este elemento que podrían mejorar la disponibilidad de P sobre todo en suelos con presencia de carbonatos de calcio, tales como son frecuentes en los bajos con influencia de capas freáticas carbonatadas de la planicie medanosa de la RSC. El ensayo tuvo como objetivos evaluar la eficacia de dos métodos para la determinación de P disponible y el efecto de la fertilización fosforada con fuentes sólida y líquida de P sobre un cultivo de maíz en suelos de la RSC con presencia de carbonatos de calcio. Para ello se utilizó un ensayo de manejo por ambientes (loma, media loma y bajo) en las cercanías de General Pico (La Pampa) y durante dos campañas se fertilizó maíces de siembra temprana y tardía y en una campaña dos cultivares de soja con superfosfato triple (SPT) y polifosfato de amonio (APP). Se realizaron muestreos de suelo para determinar P disponible por los métodos Bray-Kurtz I y Olsen, y se determinaron los rendimientos de los tratamientos testigo, SPT y APP para maíces y sojas respectivamente. Los resultados mostraron que no hubo respuesta al agregado de P con excepción de un cultivo de maíz tardío en la campaña que tuvo mayor estrés hídrico y un cultivo de soja, en ambos casos en los tratamientos SPT. En ningún caso APP mostró respuesta significativa en rendimiento, en cambio los valores de P extractable fueron mayores en estos tratamientos, sobre todo el P Olsen. Estos resultados indicarían que los suelos

movilizarían suficientes cantidades de P para satisfacer los requerimientos de maíces y soja. En condiciones de escasez hídrica se encontró respuesta a SPT en maíz, la cual se puede relacionar con la capacidad del P para protegerlos cultivos de la sequía. La diferencia en el comportamiento de las dos fuentes de P no se manifestaron, lo cual podría explicarse con la falta de datos obtenidos del bajo, el cual se encontraba anegado, ya que se esperaba hallar mayor disponibilidad de P aplicado con APP en este ambiente con aportes de carbonato de calcio freático. Se concluye que es necesario profundizar los estudios de las condiciones de disponibilidad de fósforo en la región semiárida central.

**Palabras clave:** Región semiárida central, P Bray-Kurtz I, P Olsen, APP, SPT

## **CONTENIDO:**

INTRODUCCIÓN.....	5
HIPOTESIS.....	8
OBJETIVOS.....	8
MATERIALES Y METODOS .....	8
ZONA DE ESTUDIO .....	8
TRATAMIENTOS.....	9
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	9
MANEJO DEL CULTIVO.....	11
METODOLOGIA DE ANALISIS QUÍMICO.....	12
METODO DE BRAY-KURTZ I.....	13
METODO DE OLSEN .....	14
ANALISIS ESTADÍSTICOS .....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
FÓSFORO EXTRACTABLE POR LOS MÉTODOS DE BRAY Y OLSEN.....	14
RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN FOSFORADA.....	21
CONCLUSIONES.....	24
BIBLIOGRAFIA .....	24

## INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es uno de los 16 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. El fósforo forma parte de enzimas, ácidos nucleicos y proteínas y está involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía (Rubio et al., 2012). Los suelos de la región pampeana argentina en estado prístino presentan niveles de P extractable bajos ( $<10 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) hacia el sudeste de Buenos Aires y en la provincia de Entre Ríos, niveles medios ( $10\text{-}20 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) a adecuados ( $> 20 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) hacia el oeste y el noroeste de la región (Vázquez et al., 1987). Los niveles de P extractable han disminuido progresivamente debido a la continua remoción de P en los granos y forrajes y la baja reposición del nutriente vía fertilización. Las aplicaciones de P a los cultivos anuales representan en promedio un 40- 50% del P extraído por los granos con una reposición muy variable según la zona. En la actualidad, numerosos suelos presentan contenidos de P Bray- Kurtz I menores de  $10 \text{ mg P kg}^{-1}$  en las provincias de La Pampa y Buenos Aires debido al uso agrícola y los procesos de pérdida asociados a la erosión eólica (Buschiazzo et al., 2001).

Con el transcurso de los años se ha detectado una importante disminución en el contenido de P Bray- Kurtz I1 (Pe) en suelos de la región pampeana (Urioste et al., 2006). Los bajos niveles de P encontrados y su progresivo deterioro limitan la producción de granos en el país. Para solucionar este problema y aumentar los tenores de P en suelo, la fertilización aparece como la opción más rentable y técnicamente viable y ha demostrado tener efectos positivos en el rendimiento de maíz y otros cultivos (Alamgir y Marschner, 2013; Mason et al., 2010).

La aplicación de los fertilizantes fosfatados debe hacerse a la siembra o antes de la siembra de manera tal que el P esté disponible para el cultivo desde la implantación. La reducida movilidad del ión ortofosfato y la retención (fijación, adsorción e inmovilización) del fertilizante fosfatado en el suelo requiere de la aplicación localizada del mismo, especialmente en suelos de bajo contenido de P disponible y en siembras tempranas (McBeath et al., 2007).

El cultivo de maíz requiere 4,5 kg de P para producir una tonelada de grano. El índice de cosecha de este nutriente es 0.75, indicando la proporción del P absorbido que se localiza en los granos. El suministro de P provendría de la difusión en un 80%, siendo absorbido desde la solución del suelo como ión ortofosfato o fosfato mono o diácido, contra un gradiente electroquímico, implicando gasto de energía por parte del cultivo. El P absorbido no necesita ser reducido para su asimilación integrándose rápidamente a compuestos orgánicos. La variable de respuesta comúnmente utilizada es el nivel de fósforo extractable del suelo en superficie. En general, el incremento del rendimiento es mayor cuando el suelo tiene un nivel de fósforo disponible inferior a 15 ppm. Por debajo de ese umbral son esperables respuestas mayores a 300 kg grano  $\text{ha}^{-1}$ . Se estima una respuesta máxima de 1300 kg grano  $\text{ha}^{-1}$  para muy bajos niveles de fósforo extractable en el suelo, disminuyendo ésta por cada 1 ppm que se incrementa el fósforo haciéndose nula alrededor de 30 ppm.

La disponibilidad de P para los cultivos y la respuesta a la fertilización fosfatada son afectadas principalmente por factores del suelo y de la planta, variables que intervienen en el ciclo biogeoquímico de este nutriente. Los factores del suelo se subdividen, a su vez, en químicos (mineralogía, pH, materia orgánica, capacidad de adsorción e interacción con otros nutrientes), físicos (textura, aireación, compactación, temperatura y humedad) y biológicos (residuos, raíces, bacterias y micorrizas). Del P total del suelo, sólo las fracciones solubles y lábiles (inorgánicas y orgánicas), están disponibles para las plantas durante el ciclo del cultivo (Lombi et al., 2004).

La distribución de las especies de P en solución depende principalmente del pH del suelo. Los iones fosfato provienen de la disociación del ácido orto fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) que se caracteriza por tres valores de pK. Dentro del rango de pH que generalmente se encuentra en la mayoría de los suelos, los principales iones orto fosfato son  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ , siendo este último la especie predominante a pH superior a 7,2. Estos iones tienen una fuerte tendencia a formar pares de iones o complejos solubles con varios cationes, principalmente con Ca y Mg en suelos neutros y alcalinos, y con Fe y Al en suelos ácidos (McLaughlin et al., 2011). El fósforo es el macronutriente de menor movilidad y baja disponibilidad para las plantas en la mayoría de los suelos. La baja movilidad de los iones fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) se debe a su interacción con los constituyentes

coloidales del suelo que determina que sólo una pequeña proporción del fósforo esté presente como iones en la solución de suelo (Lombi et al., 2005).

Cuando un fertilizante fosfatado es aplicado al suelo, el P reacciona con los constituyentes del suelo, de manera que comienza a desaparecer el P de la solución al ser retenido por la fase sólida. Este fenómeno, conocido como retención o fijación de P, es continuo y comprende desde la adsorción en superficie (bidimensional) hasta la precipitación (tridimensional) del P con los iones del mineral. Los procesos de adsorción de P por los minerales del suelo y desorción a partir de ellos, generalmente describen el control de la disponibilidad de P en suelos mejor que las reacciones de precipitación/disolución (Shuai et al., 2013).

Cuando un fertilizante fosfatado soluble es agregado al suelo, se produce un aumento de P soluble pero, rápidamente, las fracciones orgánicas e inorgánicas amortiguan este aumento a través de procesos de fijación, inmovilización y adsorción. Cuando la planta absorbe P disminuyendo la concentración de P soluble, el P inorgánico es desorbido, liberado y el orgánico mineralizado para reabastecer la solución del suelo. Los fertilizantes sólidos generalmente poseen una solubilidad limitada, sobre todo en suelos alcalinos o calcáreos, por lo que frecuentemente se observa una cubierta de calcio que se forma en los granos del fertilizante en estos suelos, disminuyendo aún más la disponibilidad del P (McBeath et al., 2006). Es por este motivo que se han desarrollado fuentes líquidas de este elemento cuya solubilidad sería mayor y por ende la eficiencia de uso de fósforo por parte del cultivo aumentaría respecto a las fuentes sólidas tradicionales (Lombi et al., 2005).

En los ambientes de la región de la planicie medanosa de la provincia de La Pampa predominan suelos con presencia de carbonatos de calcio, sobre todo en los bajos, donde las capas freáticas cercanas a la superficie aportan esta sal. En estos suelos se presume que la disponibilidad de P sea condicionada por la baja solubilidad del elemento y que la aplicación de fuentes líquidas de P podría mejorar la nutrición fosforada de los cultivos.

## **HIPOTESIS**

Debido a que el fósforo es un nutriente esencial para el cultivo de maíz se espera obtener un mayor rendimiento en los tratamientos fertilizados comparados con el testigo sin fertilizar.

Las distintas formulaciones de fertilizantes, como son las sólidas y las líquidas, generan diferentes respuestas de rendimiento en el cultivo de maíz. Siendo el fertilizante líquido la mejor opción en este caso, especialmente en los suelos con altos contenidos de sales calcáreas.

La fecha de siembra determinaría la disponibilidad hídrica para el cultivo de maíz y afectaría la respuesta de este a los fertilizantes fosforados.

## **OBJETIVOS**

- Evaluar el efecto de la fertilización fosforada sobre un cultivo de maíz en siembra temprana y tardía; y en dos cultivares diferentes de soja.
- Evaluar la diferencia en la eficiencia entre una fuente sólida y líquida de P.
- Evaluar la predicción del método de diagnóstico de P extractable o disponible para la fertilización fosforada.

## **MATERIALES Y METODOS**

### **ZONA DE ESTUDIO**

El estudio se realizó en el establecimiento El Maijú, ubicado en Trebolares, perteneciente al Departamento Maracó en el Noreste de la provincia de La Pampa. Las coordenadas geográficas de dicho establecimiento son: 35°34'30.95" de latitud Sur y 63°31'23.34" de Longitud Oeste y la altitud es de 117 m.s.n.m. Las precipitaciones anuales de la zona oscilan entre los 600 y 800 mm. Los suelos son Haplustoles énticos, característicos de la región semiárida-subhúmeda pampeana.

Dentro del establecimiento se seleccionó un lote que presenta unamarcaada diferencia de relieve que permita diferenciar dos ambientes: la loma, de textura



franco arenosa y con capa freática profunda, y el bajo de textura más fina (franco) y con la capa freática cercana a la superficie. Sin embargo, en el momento del muestreo del suelo el ambiente bajo del lote se encontraba anegado por lo que solo se incluirán datos correspondientes a loma. El lote de producción tiene una historia de varios años de uso agrícola sobre todo con cultivos de soja y muestra signos de degradación del suelo.

## **TRATAMIENTOS**

Se contemplaron cuatro factores en el diseño de los ensayos:

- Fertilizante: SPT (Superfosfato triple); APP (Polifosfato de amonio, fósforo líquido); y T (Testigo, sin fertilizar)
- Cultivo: maíz y soja
- Fechas de siembra en maíz: temprana (14/10) y tardía (30/12)
- Grupo de madurez en soja: ciclo 3 largo y ciclo 4 corto.

## **DISEÑO EXPERIMENTAL**

Se utilizó un diseño de franjas apareadas con 12 tratamientos, realizado durante las campañas 2012/2013 y 2013/2014. La rotación del lote fue soja/maíz. En el caso del cultivo de maíz se sembró un mismo híbrido y densidad, pero distinta fecha de siembra: temprana y tardía. En el caso de la soja se realizó la misma fecha de siembra y densidad pero se utilizaron variedades de diferente grupo de madurez (un ciclo 3 largo y un ciclo 4 corto).

Los tratamientos fueron los siguientes:

T0: Maíz Temprano. Fertilizado con superfosfato triple (SPT).

T1: Maíz temprano. Fertilizado con polifosfato de amonio (APP).

T2: Maíz temprano. Testigo: sin fertilizar.

T3: Maíz tardío. Fertilizado con superfosfato triple (SPT).

T4: Maíz tardío. Fertilizado con polifosfato de amonio (APP).

T5: Maíz tardío. Testigo: sin fertilizar

T6: Soja 1. Fertilizado con superfosfato triple (SPT).

T7: Soja 1. Fertilizado con polifosfato de amonio (APP).

T8: Soja 1 Testigo: sin fertilizar.

T9: Soja 2. Fertilizado con superfosfato triple (SPT).

T10: Soja 2. Fertilizado con polifosfato de amonio (APP).

T11: Soja 2. Testigo: sin fertilizar

Estos tratamientos fueron dispuestos espacialmente de la siguiente manera en las dos campañas:

Campaña 2012/2013

NORTE

T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma

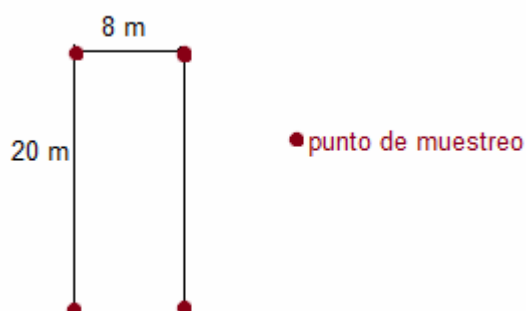
Campaña 2013/2014

NORTE

T6	T7	T8	T9	T10	T11	T0	T1	T2	T3	T4	T5
loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma	loma

## ESQUEMA DE MUESTREO

Se estableció una grilla de muestreo con puntos ubicados a una distancia de 20 y a 8 metros entre sí (20×8), según como se muestra en la figura 1:



**Figura 1:** Esquema de los puntos de muestreo de suelo y cultivos.

En cada tratamiento se hizo el seguimiento de humedad hasta 1,20 m de profundidad muestreando en intervalos de 20 cm. En estado de madurez

fisiológica se cosecharon las plantas enteras de 1,92 m lineales del cultivo de maíz y se trilló en una máquina estacionaria. En los cultivos de soja se cosechó un m<sup>2</sup> y se procedió de la misma manera que para el maíz. A la cosecha de los cultivos se muestreó nuevamente el suelo para la determinación de la disponibilidad de P en los distintos tratamientos.

## **MANEJO DEL CULTIVO**

### **BARBECHO:**

A las parcelas experimentales el día 8/10 se les realizó una aplicación de herbicidas con el objetivo de llegar con el lote limpio a la siembra, se utilizó:

1,5 L de glifosato/ha, 2-4D éster 1 L/ha, Dicamba 0,400L/ha, y aceite 0,120 L/ha. Esta formulación de dosis fue hecha luego de muestrear en el lugar y encontrar malezas como lo eran Ortiga mansa (*Lamiun amplexicaule*), Rama negra (*Conyza bonaeriensis*), Alfilerillo (*Erodium cicutarium*) y Ortiga (*Urtica urens*).

### **SIEMBRA:**

El maíz temprano se sembró el 14/10 se utilizó el híbrido DK 190 TRIPLE PRO de ciclo completo, con una densidad de 60.000 semillas ha<sup>-1</sup> y a un distanciamiento entre surcos de 52,5 cm. Se fertilizó con una dosis de 140 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triple.

La siembra de soja se realizó el 12/11 y se utilizaron las variedades DM 3810 (Soja 1) y DM 4670 (soja 2) con una densidad de 372.700 semillas ha<sup>-1</sup> y un distanciamiento entre surcos de 35 cm. Se fertilizó con una dosis de 70 Kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triple.

La siembra de maíz tardío fue el día 30/12 con el híbrido DK 190 triple PRO, de ciclo completo, con una densidad de siembra de 60.000 semillas ha<sup>-1</sup>. La distancia entre surcos fue de 52,5 cm y la fertilización fue con superfosfato triple una dosis de 140 kg ha<sup>-1</sup>.

### **PULVERIZACIONES:**

Pulverización en maíz y barbecho de soja:

El día 7/11 se realizó una aplicación de glifosato 4 L ha<sup>-1</sup>.

Malezas presentes: Rama negra (*Coniza bonaerenses*), Gramón (*Cynodon dactylon*), Pasto cuaresma (*Digitaria sanguinalis*), Pata de gallo (*Eleusine indica*).

El día 4/12 se aplicó glifosato 2 Lha<sup>-1</sup>.

El día 26/11 se realizó una aplicación en soja y maíz tardío, los productos fueron propaquizafop 0,700 Lha<sup>-1</sup>, aceite mineral 1,200 Lha<sup>-1</sup> y el insecticida clorpirifos 0,580 Lha<sup>-1</sup>.

El día 27/11 se pulverizó el maíz temprano, los productos fueron glifosato y atrazina con dosis de 2,0 Lha<sup>-1</sup> y 1,5 Kgha<sup>-1</sup> respectivamente, en la misma aplicación se utilizó clorpirifos a razón de 0,580 Lha<sup>-1</sup>.

El día 4/12 se aplicó una dosis de 2 Lha<sup>-1</sup> de glifosato en las parcelas de soja.

El día 2/1 se aplicó para el maíz tardío glifosato, atrazina, acefato y acetoclor. Las dosis utilizadas fueron las siguientes 1,5 kgha<sup>-1</sup> glifosato, 2kgha<sup>-1</sup> atrazina, 150 gha<sup>-1</sup> acefato y 1,5 Lha<sup>-1</sup> acetoclor. El 29/01 se aplicó glifosato y atrazina, las dosis utilizadas fueron de 1,5 Kgha<sup>-1</sup> y 2 kgha<sup>-1</sup> respectivamente.

#### FERTILIZACION:

La fertilización en maíz temprano fue realizada el día 27/11. Los fertilizantes aplicados y sus dosis fueron: UAN + Sulfato de Zn, (236 Lha<sup>-1</sup>) UAN lo que representa 100 kg Nha<sup>-1</sup>, la dosis de Sulfato de Zn fue de 4,7 Lha<sup>-1</sup> lo que representa 0,470 kg Znha<sup>-1</sup>. El día 21/01 se fertilizó el maíz tardío, se aplicó UAN, la dosis empleada fue de 237 Lha<sup>-1</sup>, el equivalente a 100 Kg Nha<sup>-1</sup>. En las mismas fechas de aplicación de fertilizantes N y S en los cultivos de maíz se aplicó APP a una dosis equivalente a 30 kg ha<sup>-1</sup> P (67 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), mientras que el SPT se aplicó a la siembra. En los cultivos de soja se aplicaron las mismas dosis que en maíz, a la siembra.

#### **METODOLOGIA DE ANALISIS QUÍMICO**

Se utilizaron los dos métodos de análisis de fósforo disponibles.

La determinación de fosfatos se realiza utilizando soluciones extractivas del elemento. Existen varias técnicas de extracción del P disponible que incluyen parte del P inorgánico lábil que se diferencian principalmente por el pH de la

solución extractora. El pH de la solución extractora debe reflejar y asemejarse al pH del suelo en el cual se quiere determinar el P disponible.

En suelos neutros y ligeramente ácidos se utiliza una solución de fluoruro de amonio en ácido clorhídrico a pH 2,5 (método de Bray y Kurtz nº 1, cita). Este extractante disuelve formas de P que son fácilmente solubles en ácidos como fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de hierro y aluminio. En suelos muy ácidos se utiliza una solución extractora de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, que disuelve más fosfatos de hierro que la anterior.

En suelos calcáreos, neutros o alcalinos se prefiere una solución de bicarbonato de sodio a pH 8,5 (método de Olsen). En estos suelos el bicarbonato de sodio disminuye la concentración de calcio en la solución por precipitación como carbonato de calcio y como resultado la concentración de fosfato en solución aumenta (Cátedra de Edafología, 2011).

#### **METODO DE BRAY-KURTZ I.**

La solución extractora de este método está constituida por fluoruro de amonio 0,03 N en HCl 0,025 N. Se diferencia de la solución extractora empleada con el método de Bray y Kurtz II ( $\text{FNH}_4$  0,03 N y HCl 0,1 N) porque es menos ácida y por lo tanto disuelve menos fósforo unido al calcio de los compuestos insolubles presentes en el suelo (por ej. apatita).

El fluoruro tiene la propiedad de formar compuestos con los iones de aluminio y de hierro, con la consecuente liberación del fósforo retenido en los suelos por estos cationes trivalentes. La presencia del HCl 0,025 N conduce a la disolución de los fosfatos de calcio más activos y se impide la refijación durante la extracción del fósforo liberado por la acción del fluoruro.

La cuantificación se hace por colorimetría, usando la reacción del fosfato con molibdato de amonio, con el agregado de tartrato de amonio y potasio como catalizador y ácido ascórbico como agente reductor.

Este método mide una parte del fósforo total presente en el suelo correspondiente a la fracción más activa y de significación más inmediata para el crecimiento de las plantas.

## **METODO DE OLSEN**

La técnica de determinación de fósforo disponible según Olsen utiliza bicarbonato de sodio 0,5 M a pH 8,5 (cita). Esta solución tiene el efecto de disminuir la concentración de Ca libre en suelos calcáreos, neutros y alcalinos, ya que causa su precipitación como  $\text{CaCO}_3$ . Como resultado, la concentración de P en solución aumenta.

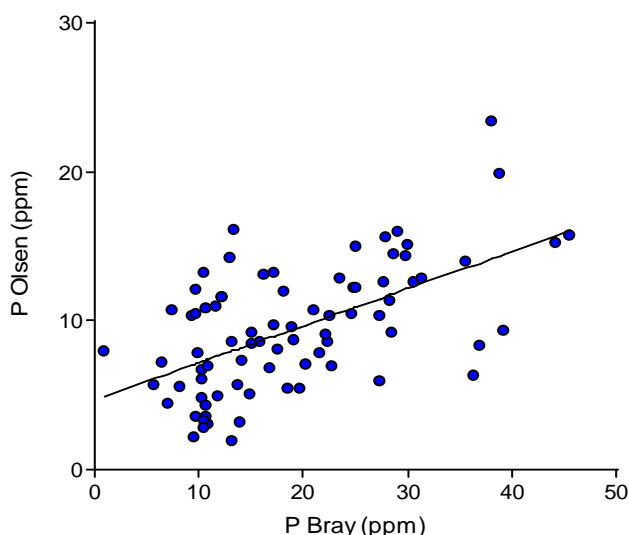
## **ANALISIS ESTADÍSTICOS**

El análisis estadístico se realizó con el paquete estadístico Infostat para determinar si existen diferencias significativas en el contenido de P Bray-Kurtz I y Olsen en el suelo entre los tratamientos fertilizados con fósforo líquido (APP), superfosfato triple (SPT) y el testigo sin fertilizar. También se analizó estadísticamente la respuesta a la fertilización en los cultivos de maíz y soja. Se realizó el ANAVA utilizando el Test comparativo Tukey con un nivel de significancia del 10 %, debido a la alta variabilidad espacial de los datos. Las medias con una letra común no son significativamente diferentes.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **FÓSFORO EXTRACTABLE POR LOS MÉTODOS DE BRAY Y OLSEN**

Los niveles de fósforo disponible determinados por los métodos de Bray Kurtz I y de Olsen mostraron una relación positiva y lineal para todos los datos de los dos años del ensayo (Fig. 2). Sin embargo, el valor bajo de  $R^2$  indicaría que la relación entre los valores estaría afectada por otros factores, por lo que no sería aconsejable utilizar ambas técnicas en forma equivalente.



**Figura 2:** Relación entre valores de P Bray I y P Olsen para todas las muestras de suelo del ensayo. ( $R^2=0,34$ ;  $N = 80$ ).

Cuando se analizó el contenido de P extractable por ambos métodos en las parcelas fertilizadas con Superfosfato triple y con Fósforo líquido (Tabla 1) se observó que ambos métodos distinguen los aportes de P por parte de los fertilizantes, las cuales se diferenciaron entre sí y a su vez del testigo sin fertilizar. En las parcelas fertilizadas con APP en forma líquida los valores de P extractable fueron significativamente más altos que en aquellas que recibieron Superfosfato triple. Esta observación coincide con los resultados de estudios en suelos calcáreos de Australia (Lombi et al., 2004).

Los valores de P extraídos con el método de Olsen fueron más bajos que los valores obtenidos por Bray-Kurtz I, representando aproximadamente el 50% del valor de estos últimos. Al respecto, Fernández López y Mendoza (2008) ya señalaron que tanto los valores obtenidos por Bray-Kurtz I y Olsen, se relacionaron entre sí y con la absorción de P de parte del cultivo, pero que fueron menos estables que los obtenidos por el método STRIP de adsorción, el cual elimina la interferencia de cationes en la solubilización del fosfato.

A su vez, se observa que los datos de ambos métodos tuvieron altos coeficientes de variación, lo cual estaría asociado a la alta variabilidad espacial de los contenidos de P de los suelos (Kumhálová et al., 2011)

**Tabla 1:** Contenidos de fósforo extractable por Bray-Kurtz I y Olsen (ppm) en los suelos de los diferentes tratamientos. (Test Tukey  $p > 0.10$ )

Tratamiento	Bray ppm de P	Olsen	n
Testigo	13,2 c	6,5 c	26
Superfosfato triple	19,2 b	9,2 b	27
Fósforo líquido (APP)	24,8 a	12,5 a	27
CV	45,5	37,0	

Los valores de las medias de P Bray de los tratamientos fertilizados (19,2 ppm para el superfosfato simple y 24,8 ppm para el fósforo líquido) se encuentran por encima del umbral crítico de 15 ppm, siendo este el valor de disponibilidad que separa el nivel de deficiencia del nivel de suficiencia para el cultivo de maíz en esta zona. En cuanto al valor de P Bray del testigo (13,2 ppm) se encuentra por debajo de dicho umbral.

Los valores medios de P Olsen del tratamiento fertilizado con SPT (9,2 ppm) y del Testigo sin fertilizar (6,5 ppm) se encuentran por debajo del umbral crítico para P Olsen de 10 ppm. En cambio, la media del contenido de P en el suelo del tratamiento fertilizado con APP (12,5ppm)se encuentra por encima de dicho umbral.

Para ambos métodos el testigo arrojó valores de P disponible por debajo del umbral, y el tratamiento fertilizado con APP valores de suficiencia. En el caso de tratamiento fertilizado con SPT se produjo una diferencia entre los dos métodos de extracción de P, resultando los valores de P disponible deficientes en el caso de Olsen y suficientes para los valores de Bray-Kurtz I. Esta diferenciación puede ser debido a una sobreestimación de P soluble de parte del método de Bray-Kurtz I, ya que es esperable que solubilice más P en condiciones de alta presencia de fosfatos de Ca que el método de Olsen. Similares observaciones fueron reportados por González et al. ( 2007) en comparaciones de los métodos de Mehlich y Bray-Kurtz I en suelos más ácidos, dónde encontraron que el extractante más ácido (Mehlich) tendía a sobreestimar los contenidos de P disponible.



**Tabla 2:** Contenidos de fósforo extractable por Bray y Olsen (ppm) en los suelos de los diferentes tratamientos para Maíz temprano de la campaña 2012-2013. (Test Tukey  $p > 0.10$ ).

Tratamiento	Bray Olsen		n
	ppm de P		
Testigo	10,9 b	3,0 c	5
Superfosfato triple	18,3 b	8,3 b	5
Fósforo líquido (APP)	29,6 a	13,1 a	5
CV	37,4	26,9	

Según los resultados obtenidos, el tratamiento fertilizado con APP presentó diferencia significativa en su contenido de P Bray-Kurtz I comparado con el de SPT y el testigo. Si bien no hay diferencias significativas entre la fertilización con SPT y el testigo, si se analizan los valores de las medias el nivel de P del testigo (10,9 ppm) está muy por debajo del umbral de 15 ppm mientras que el correspondiente al SPT (18,3 ppm) se encuentra por encima de dicho umbral.

En el caso de los valores de P Olsen hay diferencias significativas entre las medias de los 3 tratamientos. Analizando el valor de las medias y comparándolo con el umbral crítico de P Olsen de 10 ppm, tanto el tratamiento sin fertilizar (Testigo: 3,0 ppm) y el fertilizado con SPT (8,3 ppm) se encuentran por debajo de dicho umbral, mientras que el tratamiento fertilizado con fósforo líquido presentó un contenido de P (13,1 ppm) por encima del mismo.

En esta campaña, aparentemente el método de Olsen fue más sensible para detectar diferencias en los contenidos de P disponible que el método de Bray-Kurtz I, similar a lo hallado por Wang et al (2015), quienes encontraron que P-Olsen fue un método adecuado para detectar las adiciones de P mediante la fertilización.

**Tabla 3:** Contenidos de fósforo extractable por Bray y Olsen (ppm) en los suelos de los diferentes tratamientos para Maíz temprano de la campaña 2013-2014. (Test Tukey  $p > 0.10$ ).

Tratamiento	Bray	Olsen	n
	ppm de P		
Testigo	8,2 b	7,7 b	5
Superfosfato triple	15,1 a b	9,1 a b	5
Fósforo líquido (APP)	24,8 a	12,2 a	5
CV	56,2	28,8	

Los datos de P Bray-Kurtz I para el cultivo de maíz temprano de la campaña 2013/14 (Tabla 3) mostraron diferencias significativas entre el testigo y el tratamiento con P Líquido, sin embargo, no hubo diferencias entre el testigo y el tratamiento con SPT así como tampoco entre los tratamientos de SPT Y APP.

El umbral crítico para maíz es de 14-19 ppm (Rubio et al., 2007). En cuanto a los valores de las medias, el testigo (8,2 ppm) se encuentra muy por debajo del umbral mientras el tratamiento de SPT (15,1 ppm) coincide con el mismo, en cambio el contenido de P Bray-Kurtz I en el suelo para el tratamiento de APP se encuentra muy por encima de dicho umbral.

También para los valores de P Olsen se hallaron diferencias significativas entre el tratamiento fertilizado con el fósforo líquido y el tratamiento sin fertilizar, mientras que el tratamiento fertilizado con SPT no presentó diferencia significativa comparada con el testigo y con el tratamiento fertilizado con APP (Tabla 3). En cuanto a los valores de las medias, los tratamientos sin fertilizar (7,7 ppm) y fertilizado con SPT (9,1 ppm) se encontraron por debajo del umbral crítico de 10 ppm. En cambio el tratamiento fertilizado con APP (12,2 ppm) esta por encima de dicho umbral.

**Tabla 4:** Contenidos de fósforo extractable por Bray y Olsen (ppm) en los suelos de los diferentes tratamientos para Maíz tardío de la campaña 2013-2014. (Test Tukey  $p > 0.10$ ).

Tratamiento	Bray	Olsen	n
	ppm de P		
Testigo	11,7 a	9,1 a	6
Superfosfato triple	20,2 a	9,1 a	6
Fósforo líquido (APP)	22,2 a	7,1 a	6
CV	45,6	39,1	

Los datos de contenido de P Bray Y P Olsen de maíz tardío de la campaña 2013/2014 no muestran diferencias significativas entre los tratamientos sin fertilizar (Testigo), y fertilizados SPT y APP.

Sin embargo, analizando los valores de las medias se puede ver que el contenido de P Bray de los tratamientos fertilizados con SPT y APP (20,2 y 22,2 respectivamente) están por encima del umbral de P Bray-Kurtz I, mientras que la media del Testigo se encuentra por debajo del mismo (11,8ppm).

En cuanto al contenido de P Olsen el valor de las medias de los 3 tratamientos (T:9,0 ppm,SPT:7,0 ppm y APP: 9.0 ppm) todas se encuentran por debajo del umbral crítico de 10 ppm.

**Tabla 5:** Contenidos de fósforo extractable por Bray y Olsen (ppm) en los suelos de los diferentes tratamientos para Soja 1 de la campaña 2013-2014. (Test Tukey  $p > 0.10$ ).

Tratamiento	Bray	Olsen	n
	ppm de P		
Testigo	15,1 a	5,4 b	6
Superfosfato triple	17,5 a	10,7 a	7
Fósforo líquido (APP)	25,0 a	14,7 a	7
CV	43,1	39,4	

Los datos de contenido de P Bray-Kurtz I para Soja 1 de la campaña 2013/2014 no mostraron diferencias significativas entre los distintos tratamientos.

Los datos de P Olsen presentaron diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados y el tratamiento testigo sin fertilizar. Sin embargo no existe diferencia significativa en los tratamientos fertilizados entre sí, es decir SPT vs APP.

**Tabla 6:** Contenidos de fósforo extractable por Bray y Olsen (ppm) en los suelos de los diferentes tratamientos para Soja 2 de la campaña 2013-2014. (Test Tukey  $p > 0.10$ ).

Tratamiento	Bray	Olsen	n
	ppm de P		
Testigo	21,7 a	7,2 b	4
Superfosfato triple	26,5 a	10,8 ab	4
Fósforo líquido (APP)	22,6 a	13,2 a	4
CV	45,6	21,7	

Los datos del contenido de P Bray de soja de la campaña 2013/2014 no arrojaron diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados con SPT y APP y el testigo sin fertilizar. Mientras que el contenido de P Olsen mostró diferencias significativas entre el tratamiento fertilizado con fósforo líquido y el testigo sin fertilizar.

En términos generales, las diferencias de los contenidos de P detectados por ambos métodos entre los tratamientos se evidenciaron en mayor medida en los cultivos de maíz de siembra temprana, y en menor medida en los maíces tardíos o en los cultivos de soja. Sin embargo, en todos los casos los datos de Olsen-P mostraron menor coeficiente de variación y por ende más sensibilidad para diferenciar entre tratamientos que los datos obtenidos por Bray-Kurtz I.

## RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN FOSFORADA

Los datos de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para maíz temprano de las campañas 2012/13 y 2013/14 no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos sin fertilizar y los fertilizados con SPT y APP (Tabla 7).

**Tabla 7:** Diferencias de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) entre fuentes de P en Maíz temprano y Maíz tardío de las campañas 2012/2013 y 2013/2014.

Tratamiento	2012/2013		2013/2014		n
	Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				
	Temprano	Tardío	Temprano	Tardío	
Testigo	8815 a	7063 a	3666 a	3430 b	4
Superfosfato triple	8529 a	7635 a	2550 a	5790 a	4
Fósforo líquido (APP)	8084 a	6987 a	2800 a	4850 ab	4
CV	20,3	36,0	57,0	31,0	

Los datos de rendimiento de maíz tardío para la campaña 2012/13 tampoco mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. En cuanto a la campaña 2013/14, existieron diferencias significativas en el rendimiento entre el testigo sin fertilizar y el tratamiento fertilizado con SPT para el maíz tardío (Tabla 7). En cambio, el tratamiento fertilizado con fósforo líquido no difirió significativamente del testigo ni del tratamiento fertilizado con SPT. El tratamiento fertilizado con SPT fue el que presentó el mayor rendimiento.

**Tabla 8:** Diferencias de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) entre fuentes en los dos cultivares de Soja de la campaña 2013/2014.

Tratamiento	Rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	
	Soja 1	Soja 2
Testigo	4028 a	3430 b
Superfosfato triple	4574 a	4621 a
Fósforo líquido (APP)	4567 a	3985 ab
CV	19,1	13,1

Los datos de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para Soja 1 de la campaña 2013/14 no presentaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos sin fertilizar, SPT y APP. En cambio, los rendimientos de Soja 2 mostraron diferencias significativas entre el tratamiento sin fertilizar (testigo) y el tratamiento fertilizado con Superfosfato triple. Este último fue el que presentó el mayor rendimiento mientras que el tratamiento fertilizado con fósforo líquido mostró un rendimiento intermedio.

Luego de analizar los datos de contenido de P extractable en el suelo se observaron diferencias entre los distintos tratamientos sin fertilizar, fertilizado con SPT y con APP. Las diferencias, en algunos casos, fueron más acentuadas para el contenido de Olsen-P, lo que se podría explicar por el menor coeficiente de variación comparado con el que presenta el P Bray-Kurtz I. Fernández López y Mendoza (2008) encontraron que en diferentes órdenes de suelos de la Argentina, los métodos de Bray-Kurtz I y Olsen reproducían bien la disponibilidad de fósforo para el cultivo de maíz, pero con menor precisión que el método de intercambio iónico. Sin embargo, en la región semiárida pampeana se cuenta con muy escasa información sobre los factores que inciden en la disponibilidad de fósforo (Suñer y Galantini, 2013).

Las diferencias encontradas en el contenido de P extractable no se trasladaron en una respuesta del cultivo a la fertilización ya que en la mayoría de los casos

analizados no hubo diferencias significativas en el rendimiento entre los distintos tratamientos. En el caso de los cultivos de maíz únicamente el de siembra tardía de la campaña 2013/14 respondió a la aplicación de SPT con un aumento de  $2360 \text{ kg ha}^{-1}$ , mientras que la respuesta a APP de  $1420 \text{ kg ha}^{-1}$  no fue significativa. Los rendimientos de los testigos en la campaña 2012/13 fueron muy altos y superaron los de la campaña siguiente en un 45%. En esta situación, no se observaron respuestas a la fertilización fosforada, independientemente de la fuente utilizada.

Aparentemente, en condiciones de abundante disponibilidad hídrica, estos suelos movilizarían suficientes cantidades de P, a pesar de los bajos niveles de P extractable en esta campaña (Tabla 1). En situaciones de restricciones hídricas tales como en la campaña 2013/14, el aporte de P podría mejorar la disponibilidad del elemento y favorecer el desarrollo del cultivo resultando en respuestas significativas en el rendimiento de maíz (Tabla 7). Esto se condice con lo hallado por estudios anteriores que señalaron que el P juega un rol importante en proteger los cultivos de la sequía (Zheng et al., 2015). En cuanto a la respuesta de soja al agregado de P se pudo observar un aumento significativo solamente en soja 2 para la fuente SPT y no para APP. De acuerdo a Rubio et al. (2007) los umbrales críticos para este cultivo están entre 9 y 13 ppm de P Bray-Kurtz I y los valores de P extractable con Bray-Kurtz I en estas parcelas estaban por encima de estos valores.

La hipótesis de que la fuente líquida de fósforo tuviera una solubilidad mayor y por lo tanto una mejor eficiencia de uso del fósforo por parte del cultivo comparado con la fuente sólida no se reflejó en los datos de rendimiento obtenidos. Las únicas respuestas positivas al agregado de P resultaron en parcelas fertilizadas con SPT, mientras en los tratamientos con APP no se encontraron respuestas de rendimiento ni en maíz o en soja. En cambio, APP dejó, en general, mayores contenidos de P en el suelo, y estos se detectaron mejor cuando se utilizó el método de Olsen. Esto en parte puede deberse a que los datos obtenidos pertenecieron exclusivamente al ambiente loma, donde las condiciones del suelo no conducirían a la precipitación de fosfatos de calcio de la misma magnitud como esto ocurriría en el ambiente bajo. La importancia de los procesos de precipitación de las sales poco solubles de P para la

determinación de la disponibilidad de este elemento para la nutrición vegetal ha sido resaltado recientemente (Daly et al., 2015). Las experiencias que han mostrado la ventaja de los fertilizantes líquidos por sobre los sólidos fueron realizadas en suelos con altos contenidos de calcio libre (Bertrand et al., 2006; McBeath et al., 2007).

## **CONCLUSIONES**

Se puede concluir que el método de Olsen es más sensible para la detección de fracciones lábiles de P ya que respondió más al agregado de la fuente líquida del elemento (APP). Sin embargo, se encontró una relación lineal positiva y muysignificativa entre los datos obtenidos por el método de Bray - Kurtz I y el de Olsen. Los cultivos no mostraron respuestas al agregado de P, con la excepción de maíz tardío de la campaña 2013/14 y la soja 2, y en ambos casos la respuesta fue significativa solamente para SPT. Estos resultados indicarían que los suelos movilizarían P en cantidades suficientes para satisfacer las demandas de los cultivos, a pesar de acusar valores bajos de P extractable, y que la fuente de P no incide en la disponibilidad del elemento en estas condiciones de suelo. Las diferencias entre una fuente líquida y sólida en ambientes con presencia de Ca libre no se pudo constatar ya que el ambiente de estas características (Bajo) no se pudo utilizar. Sin embargo, estos resultados son muy preliminares, y es necesario profundizar los estudios de las condiciones de disponibilidad de fósforo en la región semiárida central.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Alamgir, M., Marschner, P., 2013. Short-term effects of application of different rates of inorganic P and residue P on soil P pools and wheat growth. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176, 696–702. doi:10.1002/jpln.201200290
- Bertrand, I., McLaughlin, M.J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., McBeath, T., 2006. Changes in P Bioavailability Induced by the Application of Liquid and Powder Sources of P, N and Zn Fertilizers in Alkaline Soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 74, 27–40. doi:10.1007/s10705-005-4404-3
- Buschiazzo, D.E., Hevia, G.G., Hepper, E.N., Urioste, A., Bono, A.A., Babinec, F., 2001. Organic C, N and P in size fractions of virgin and cultivated soils



- of the semi-arid pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 48, 501–508.  
doi:10.1006/jare.2000.0775
- Daly, K., Styles, D., Lalor, S., Wall, D.P., 2015. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 792–801. doi:10.1111/ejss.12260
- Fernández López, C., Mendoza, R., 2008. Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos y manejos productivos. *Cienc. del suelo* 26, 13–27.
- González, M., López, M.V., Moreno, G., Comese, R., Madero, M., 2007. Comparación De Los Métodos De Bray & Kurtz N<sup>o</sup> I Y Mehlich Iii Con Fertilizaciones Continuas. *Cienc. del Suelo* 25, 23–29.
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., Matějková, Š., 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precis. Agric.* 12, 813–830. doi:10.1007/s11119-011-9221-x
- Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R., Holloway, R., 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 682–689.
- Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D., Holloway, R.E., 2005. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant Soil* 269, 25–34. doi:10.1007/s11104-004-0558-z
- Mason, S., McNeill, A., McLaughlin, M.J., Zhang, H., 2010. Prediction of wheat response to an application of phosphorus under field conditions using diffusive gradients in thin-films (DGT) and extraction methods. *Plant Soil* 337, 243–258. doi:10.1007/s11104-010-0521-0
- McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Armstrong, R.D., Bell, M., Bolland, M.D. a., Conyers, M.K., Holloway, R.E., Mason, S.D., 2007. Predicting the response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils. *Aust. J. Soil Res.* 45, 448. doi:10.1071/SR07044
- McBeath, T.M., Smernik, R.J., Lombi, E., McLaughlin, M.J., 2006. Hydrolysis of Pyrophosphate in a Highly Calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 856. doi:10.2136/sssaj2005.0184
- McLaughlin, M.J., McBeath, T.M., Smernik, R., Stacey, S.P., Ajiboye, B., Guppy, C., 2011. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils—implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. *Plant Soil* 349, 69–87. doi:10.1007/s11104-011-0907-7
- Rubio, G., Cabello, M.C., Gutiérrez Boehm, F., 2007. ¿Cuanto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II.

Cálculos para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana. *Inf. Agronómicas Hisp.* 35.

- Rubio, G., Faggioli, V., Scheiner, J.D., Gutiérrez-Boem, F.H., 2012. Rhizosphere phosphorus depletion by three crops differing in their phosphorus critical levels. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 810–871. doi:10.1002/jpln.201200307
- Shuai, X., Yost, R.S., Wendroth, O., 2013. State-space estimation of the intrinsic soil phosphorus pools from soil phosphorus tests. *Geoderma* 214–215, 239–245.
- Suñer, L.G., Galantini, J.A., 2013. Dinámica de las formas del P en suelos de la Región Sudoeste Pampeana. *Cienc. del Suelo, Arg.* 31, 33–44.
- Urioste, a. M., Hevia, G.G., Hepper, E.N., Anton, L.E., Bono, a. a., Buschiazzi, D.E., 2006. Cultivation effects on the distribution of organic carbon, total nitrogen and phosphorus in soils of the semiarid region of Argentinian Pampas. *Geoderma* 136, 621–630. doi:10.1016/j.geoderma.2006.02.004
- Vázquez, M., Noellemeyer, E., Struffolino, A., López-Camelo, L., Barberis, L., 1987. Metodos de medición del fósforo extractable en suelos del norte y oeste de la Pradera Pampeana - su evaluación biológica. *Cienc. del Suelo* 5, 19–30.
- Wang, B., Li, J., Ren, Y., Xin, J., Hao, X., Ma, Y., Ma, X., 2015. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat–maize rotation production areas of China. *F. Crop. Res.* 178, 42–48. doi:10.1016/j.fcr.2015.03.007
- Zheng, H.F., Chen, L.D., Yu, X.Y., Zhao, X.F., Ma, Y., Ren, Z.B., 2015. Phosphorus control as an effective strategy to adapt soybean to drought at the reproductive stage: evidence from field experiments across northeast China. *Soil Use Manag.* 31, 19–28. doi:10.1111/sum.12166