

MÉTODOS AGRONÓMICOS Y AMBIENTALES DE DETERMINACIÓN DE FÓSFORO EN ARGIUDDOLES DEL SUDESTE BONAERENSE

ESTER CRISTINA ZAMUNER^{1*}; JAUME LLOVERAS² & HERNÁN ECHEVERRÍA¹

Recibido: 09-12-14

Recibido con revisiones: 05-03-15

Aceptado: 25-03-15

RESUMEN

Los análisis de suelo son herramientas útiles para evaluar la fertilidad edáfica y efectuar recomendaciones de fertilización (métodos agronómicos). Otros métodos, denominados ambientales, estiman el fósforo (P) que puede causar eutrofización de cuerpos de agua. Es muy escasa la información que establezca la relación entre los métodos agronómicos y ambientales de análisis de suelo, para los Argiudoles del sudeste bonaerense. Se plantearon como objetivos de la investigación determinar la relación entre los métodos agronómicos de extracción de P (Bray1, Olsen, Mehlich3) y el método ambiental (CaCl₂) y determinar el riesgo de contaminación con P en cultivos de papa fertilizados con P en el sudeste bonaerense. El estudio se desarrolló en lotes de producción de papa entre los años 2005 y 2014. Para los análisis de suelo se utilizaron muestras superficiales de parcelas fertilizadas y sin fertilizar con P (0, 25, 50, 100, 150 y 200 kg P ha⁻¹). Se determinó P extractable con los métodos Bray1, Mehlich3, Olsen y CaCl₂ 0,01M. Bray1 extrajo la mayor cantidad de P mientras que Mehlich3, Olsen y CaCl₂ extrajeron respectivamente 10, 25 and 87% menos P que el Bray1. Se determinó una asociación lineal y significativa entre los métodos agronómicos entre sí (Mehlich3 = 0,80 Bray1 + 3,45; Olsen = 0,36 Bray1 + 13,57; Olsen = 0,44 Mehlich3 + 12,36). A partir de la relación entre los métodos agronómicos y el ambiental se estimaron valores límite de P en el suelo (39, 34 y 27 mg kg⁻¹ para Bray1, Mehlich3 y Olsen, respectivamente) a partir de los cuales puede existir riesgo de pérdida de P desde el suelo a los sistemas acuáticos. Se determinaron concentraciones de P Bray1 que se asocian con riesgo de pérdida de P en solución (mayor a 39 mg kg⁻¹) en suelos cultivados con papa, lo que alerta respecto al potencial impacto ambiental por fertilización con P.

Palabras clave. Bray, Mehlich, Olsen, CaCl₂, contaminación, papa.

AGRONOMIC AND ENVIRONMENTAL PHOSPHORUS DETERMINATIONS IN ARGIUDDOLLS OF SOUTHEAST OF BUENOS AIRES

ABSTRACT

Soil testing is a useful tool for evaluating soil fertility and for making fertilizer recommendations (agronomic tests). Other methods may be used for estimating P that may cause eutrophication of water bodies (environmental tests). Little information is available regarding the relationship between agronomic and environmental soil test methods, for Argiudolls of southeast of Buenos Aires. The objectives of this study were to determine the relationship between agronomic (Bray1, Olsen, Mehlich3) and environmental (CaCl₂) P extraction methods and to determine the risk of contamination with P in potato crops in the southeast of Buenos Aires. The research was conducted in commercial potato fields from 2005 to 2014. Soil samples of unfertilized and fertilized plots with phosphorus (P) were (0, 25, 50, 100, 150 and 200 kg P ha⁻¹). Extractable P by Bray1, Mehlich3, Olsen and 0.01M CaCl₂ methods was determined. Bray1 method extracted the greatest amount of P while Mehlich3 P, Olsen and CaCl₂ removed respectively 10, 25 and 87% less P than Bray1. Linear and significant association was found between agronomic methods (Mehlich3 - Bray1 = 0.80 + 3.45; Olsen - Bray1 + 0.36 = 13.57; Olsen - Mehlich3 + 0.44 = 12.36). Soil P thresholds (39, 34 and 27 mg kg⁻¹ for Bray1, Mehlich3 and Olsen, respectively) from which P loss from soil to aquatic systems may occur were determined. Bray1 P concentration greater than 39 mg kg⁻¹ t was associated with risk of P loss in soils cultivated with potatoes, thus warning about the potential environmental impact of P fertilization.

Key words. Bray, Mehlich, Olsen, CaCl₂, pollution, potato.

1 Unidad Integrada FCA UNMdP-INTA Balcarce, Balcarce, Argentina.

2 Agrotecnio Center, University of Lleida (UdL), Av. Rovira Roure, 191, 25198, Lleida, Spain.

* Autor de contacto: zamuner.ester@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de agua dulce, el fósforo (P) es a menudo el nutriente más limitante para el crecimiento de algas y la adición de P a estos sistemas puede causar la degradación del recurso hídrico. La eutrofización de las aguas en muchas regiones del mundo ha renovado el interés por identificar los efectos de la concentración de P en el suelo en las pérdidas de P de los sistemas agrícolas hacia aguas superficiales y sub-superficiales (Sharpley *et al.*, 2003). Las grandes superficies dedicadas a la producción de papa generan preocupación con respecto a la pérdida de P (Ruark *et al.*, 2014) ya que el cultivo de papa que tiene una demanda relativamente alta de nutrientes (Westermann, 2005; Hopkins *et al.*, 2014), y un sistema radicular poco profundo (Muñoz *et al.*, 2005; Pack *et al.*, 2006) por lo que, en general se aplican altas dosis de fertilizante (Rosen *et al.*, 2013). Por ejemplo, la Universidad de Wisconsin (Laliboski & Peters, 2012), considera que en suelos francos la concentración de P-Bray es óptima para la producción de papa cuando se encuentra en el rango de 161 a 200 mg kg⁻¹, mientras que para los demás cultivos oscila entre 16 y 45 mg kg⁻¹. Contrastes similares existen en el noroeste USA, de donde procede la mayor parte de la producción de papa de ese país (Hopkins *et al.*, 2014). Por consiguiente, la producción de papa requiere mantener los niveles de P en el suelo a una concentración más alta en comparación con otros cultivos (Ruark *et al.*, 2014).

El sudeste de la provincia de Buenos Aires representa una de las zonas clave del cultivo de papa en la Argentina (González & Rodríguez, 2011). Los suelos de la región son Argiudoles que presentan un nivel promedio de P extractable (Bray1) de 12,9 mg kg⁻¹ en el horizonte superficial (Sainz Rozas *et al.*, 2012). Si se considera que los umbrales críticos de Bray1 para soja y/o girasol, maíz y trigo son de 12-13, 15-16 y 18-20 mg kg⁻¹, respectivamente (García *et al.*, 2007), queda en evidencia que la disponibilidad de P es generalmente limitante para la producción agrícola, por lo que la fertilización con P es esencial para obtener altos rendimientos. La amplia adopción de la práctica de fertilización y el uso de dosis de P más elevadas respecto a las necesidades de los cultivos, habrían sido las causas del mantenimiento o incremento del P en los suelos en los últimos 25 años en esta región (Sainz Rozas *et al.*, 2012).

Existen numerosos análisis de suelo para estimar la disponibilidad de P, que se adaptan a suelos con diferentes características fisicoquímicas. Bray1 y Olsen son los extractantes específicos más ampliamente utilizados en

muchas partes del mundo (Atia & Mallarino, 2002; Zamuner *et al.*, 2006; Giconyo *et al.*, 2010; Jordan-Meille *et al.*, 2012; Ratto & Marban, 2012; Johnston *et al.*, 2013). La necesidad de cuantificar otros nutrientes, además de P, ha promovido el uso de extractantes múltiples como Mehlich3 (Mehlich, 1984) que permite además la extracción simultánea de K, Ca y micronutrientes (Schroder *et al.*, 2009; Jordan-Meille *et al.*, 2012; Kulhánek *et al.*, 2014). Estos métodos de análisis de suelo (Bray1, Olsen y Mehlich3) son denominados "métodos agronómicos" ya que son una herramienta empleada en el diagnóstico de los requerimientos de fertilización (Atia & Mallarino, 2002; Echeverría & García, 2005). Por otro lado, se han desarrollado métodos que no ponen énfasis en estimar la disponibilidad de P para las plantas sino que están pensados para realizar una mejor estimación del P en la solución del suelo que promueve el crecimiento de algas si es transportado hacia cuerpos de agua superficiales, denominados métodos ambientales (Bai *et al.*, 2014; Pöthig *et al.*, 2010; Torrent & Delgado, 2001). Entre ellos se destaca la extracción con CaCl₂ que se basa en reacciones de desorción débiles. Los aspectos teóricos de este método fueron desarrollados desde hace muchos años, pero el interés por las pérdidas de P desde el suelo a las fuentes de agua ha renovado el interés de este método (Pote *et al.*, 1996; Paulter & Sims, 2000). La relación entre la cantidad de P extraída con agua o CaCl₂ y la obtenida con diversos métodos agronómicos dependen de las propiedades del suelo (Indiati, 2000; Atia & Mallarino, 2002; Ige *et al.*, 2005). Por lo tanto, conocer dichas relaciones permitiría emplearlas tanto en la evaluación de los requerimientos de fertilización como del posible impacto ambiental del P.

Una vez que el P del fertilizante soluble es agregado al suelo, se incrementa la concentración de P en la solución del suelo y luego decrece en magnitud variable según las propiedades químicas del suelo (Havlin *et al.*, 2005). La magnitud del incremento del P extractable (Bray) después de 45 días de realizada la fertilización fue estimada por Rubio *et al.* (2008) para Molisoles de la Región Pampeana en condiciones de laboratorio. Sin embargo, no hay información en situaciones de campo que permita determinar si la fertilización incrementa la concentración de P en el suelo por encima de valores ambientalmente seguros, en algún momento del ciclo del cultivo. Disponer de esta información permitiría ajustar las recomendaciones de fertilización a un equilibrio entre la protección del medio ambiente y la producción agrícola sostenible (Pierzinski *et al.*, 2005).

En el presente estudio, en Argiudoles del sudeste de la provincia de Buenos Aires, se plantearon dos objetivos principales: 1.- determinar la relación entre los métodos agronómicos (Bray1, Olsen, Mehlich3) y el principal método ambiental (CaCl_2) de extracción de P y, 2.- determinar el riesgo de pérdida de P en cultivos de papa fertilizados con P.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se desarrolló en 13 lotes de producción localizados en los partidos de General Balcarce ($37^{\circ}75' \text{S}$, $58^{\circ}25' \text{O}$), General Pueyrredón ($38^{\circ}00' \text{S}$, $57^{\circ}33' \text{O}$) y General Alvarado ($38^{\circ}17' \text{S}$, $58^{\circ}08' \text{O}$), provincia de Buenos Aires, entre 2005 y 2014. Los suelos que predominan en la zona pertenecen al subgrupo Argiudol típico (USDA Soil Taxonomy Classification, 2008), sin limitaciones para el uso agrícola caracterizados por presentar un horizonte A de aproximadamente 20 cm, de textura franca, pH (Relación suelo: agua 1:2.5) entre 5,8- 6,2 y materia orgánica entre 38-65 g kg^{-1} (Tabla 1). La temperatura media anual es de 13,8 °C y la precipitación media anual de 870 mm (promedio 1984-2014).

En cada lote de producción se había establecido un ensayo destinado a evaluar el efecto de la dosis de fertilización fosfataada sobre el rendimiento del cultivo de papa según un diseño en bloques completos aleatorizados con cuatro tratamientos de P (0, 25, 50 y 100 kg ha^{-1}) y tres repeticiones. En cada parcela experimental (12 surcos de 10 m de largo separados a 0,85 m) se aplicó urea al voleo a la siembra (100 kg N ha^{-1}) y en inicio de tuberización (150 kg N ha^{-1}) para asegurar que la disponibilidad de nitrógeno no sea limitante para el desarrollo. Se regó con aproximadamente 20 mm cada 5-7 días a partir de inicio de tuberización para asegurar la disponibilidad hídrica durante el ciclo de crecimiento. La conducción del cultivo se realizó de acuerdo a las prácticas recomendadas para la zona (Caldiz, 2006).

Cada año, se recolectaron muestras de suelo (0-20 cm de profundidad) previo a la siembra y fertilización del cultivo de papa. Adicionalmente, en 2009/10 y 2010/11 se recolectaron muestras de suelo durante la estación de crecimiento (40, 60, 85 y 104 días después de la plantación del cultivo) en parcelas fertilizadas y sin fertilizar. Todas las muestras (tomadas previo a la siembra y durante el ciclo de crecimiento del cultivo) se secaron al aire, se tamizaron por 0.5 mm, y se conservaron a temperatura ambiente hasta el momento de analizarlas. El P extractable fue cuantificado en 159 muestras, con los métodos Bray1, Mehlich3, Olsen y CaCl_2 0,01 M (Sims, 2009). La concentración de P inorgánico en los extractos fue determinada colorimétricamente (Murphy & Riley, 1962).

Durante las estaciones de crecimiento 2009/10 y 2010/11 se determinó la producción de biomasa y la extracción de P por parte del cultivo, a los 40, 60, 90 y 104 días después de la plantación. Las muestras de planta se obtuvieron cosechando 2 m de cada uno de los 2 surcos centrales de las 3 repeticiones de todos los tratamientos de fertilización (0, 25, 50 y 100 kg P ha^{-1}). Se separaron los tubérculos de la parte aérea y se pesaron. Se tomaron submuestras de cada fracción de aproximadamente 500 g que se secaron (a 40 °C en una cámara con ventilación forzada durante 7 días) y se pesaron para determinar la acumulación de biomasa en cada fracción. Las submuestras se molieron ($1\mu\text{m}$) y se conservaron a temperatura ambiente hasta su análisis. Se determinó la concentración de P total en tubérculos y parte aérea por digestión ácida con HNO_3 - HClO_4 (Saunders & Williams (1955) y cuantificación colorimétrica (Murphy y Riley, 1962). La cantidad de P extraído por el cultivo en cada fecha de muestreo se calculó como la suma del contenido de P (concentración de P x biomasa) de tubérculo y parte aérea de cada parcela.

Análisis estadístico

La media, mediana, valores máximos y mínimos fueron utilizados para la descripción estadística de los métodos de extracción. La comparación de medias entre pares de métodos se realizó utilizando la prueba *t* de muestras apareadas. Se realizaron análisis de correlación (PROC CORR) y regresión lineal simple (PROC REG), utilizando el paquete estadístico SAS (SAS 9.1, 2002).

En los ensayos destinados a evaluar los cambios en Bray1 y P extraído por el cultivo durante el ciclo del cultivo, se utilizó el procedimiento MIXED del SAS. El año y los bloques se consideraron variables aleatorias y la dosis y días después de plantación las variables fijas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación entre métodos de extracción de P del suelo

La evaluación de los métodos de extracción de P se realizó en un amplio rango de concentraciones de este elemento (Tabla 1). Con Bray1 y Mehlich3 se observó el mayor rango de concentración (3,8-363,4 mg kg^{-1} y 6,0-320,8 mg kg^{-1} , respectivamente), seguidos por Olsen (3,0-153,2 mg kg^{-1}) y la menor amplitud se registró en P- CaCl_2 (0,06-57,9 mg P kg^{-1}). El test de medias apareadas mostró que Bray1 es el método que extrajo mayor cantidad de P seguido por Mehlich3, Olsen y P- CaCl_2 que extrajeron respectivamente 10, 25 and 87% menos P que Bray1 (Tabla 2). La diferencia de P extractable promedio de 3 mg kg^{-1} entre Bray1 y Mhlich3 fue significativa (Tabla 2); sin embargo,

Tabla 1. Características edáficas previas a la siembra del cultivo de papa y prácticas de manejo de los sitios experimentales.
Table 1. Soil characteristics before planting and crop management information for the different experimental sites.

Sitio	Estación de crecimiento	P-Bray1†	pH ^(†,‡)	Materia orgánica ^(†)	N-NO ₃ ^{-(§)}	Cultivo previo
		mg kg ⁻¹		g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	
1	2005/06	19,3	6,2	52	39,2	Pastura
2	2006/07	27,8	6,0	42	36,5	Soja
3	2008/09	33,1	6,1	52	48,2	Papa
4	«	15,4	5,8	52	114,8	Pastura
5	«	14,5	5,8	52	110,4	Papa
6	2009/10	29,1	6,1	54	38,5	Trigo/soja
7	2010/11	7,1	6,2	54	11,7	Pastura
8	«	27,0	5,9	58	14,7	Soja
9	2012/13	11,1	6,6	38	55,0	Papa
10	2013/14	45,0	5,9	61	26,7	Trigo/soja
11	«	20,0	5,9	65	28,5	Soja
12	«	19,0	6,0	50	18,3	Trigo/soja
13	«	19,1	6,0	56	13,4	Girasol

†Profundidad: 0-20 cm, ^(‡) Relación suelo: agua 1:2.5; ^(§)Profundidad 0-60 cm.

Tabla 2. Estadística descriptiva de métodos de extracción de fósforo del suelo.
Table 2. Descriptive statistics of soil phosphorus extraction methods.

Parámetros estadísticos	Método de extracción			
	Bray1	Mehlich3	Olsen	P-CaCl ₂
Media	36,27	32,69	26,87	4,77
Mínimo	3,76	5,96	3,03	0,06
25% percentil	16,25	15,47	20,54	1,93
50% percentil	23,81	21,52	22,69	2,76
75% percentil	37,78	33,46	26,87	4,41
Máximo	363,35	320,78	153,23	57,86

la misma carece de relevancia desde el punto de vista agronómico. Las diferencias entre métodos están asociadas a los mecanismos de extracción de P de cada solución (Sims, 2009). En Bray1 y Mehlich3 el principio de extracción de P es similar ya que contienen una solución diluida de ácido fuerte (HCl) y el ion fluoruro como acomplexante. La naturaleza ácida de estas soluciones extractoras (pH= 2,6) contribuye a la disolución de las formas de P disponibles asociadas Al, Ca, Fe y los iones F⁻ forman complejos que disminuyen la re-adsorción del P solubilizado. En el método de Olsen se utiliza una solución alcalina de NaHCO₃ 0,5 M tamponada a pH=8,5 que solubiliza P por disminución de la concentración de Ca⁺², Al³⁺ y Fe⁺³ solu-

bles (precipitación como CaCO₃ y formación de oxihidróxidos de Al y Fe). El método Olsen extrae menos P en la mayoría de los suelos que los extractantes ácidos (Sims, 2009) y es el más adecuado para los suelos calcáreos, en particular aquellos con más de 2% de carbonato de calcio. El empleo de CaCl₂ (con un potencial iónico similar a la solución del suelo) permite la cuantificación del P presente en la solución del suelo, por lo que puede utilizarse en cualquier tipo de suelo (Pote *et al.*, 1996).

Si bien el test *t* para medias apareadas demostró que hay diferencias significativas en la cantidad de P extraída por cada técnica analítica, las mismas estuvieron altamente correlacionadas (Tabla 3). Estos resultados ratifican la

Tabla 3. Coeficientes de correlación y test de comparación de medias para pares de métodos de extracción de fósforo del suelo.

Table 3. Correlation coefficients and mean comparison test for paired extraction methods.

Método 1	Método 2	t-test para medias apareadas		Coeficiente de correlación
		T†	P < F	
Bray1	Mehlich3	3,81	0,0002	0,98
Bray1	Olsen	3,94	<0,0001	0,96
Bray1	P-CaCl ₂	9,52	<0,0001	0,97
Mehlich3	Olsen	11,13	<0,0001	0,96
Mehlich3	P-CaCl ₂	10,77	<0,0001	0,97
Olsen	P-CaCl ₂	24,82	<0,0001	0,98

† Para $\alpha = 0,05$; el intervalo de aceptación es $t = 1,977$, $-t = -1,977$

habilidad de las metodologías evaluadas para extraer P en suelos con pH neutro a ligeramente ácido, que es característica de la mayoría de los suelos agrícolas del sudeste bonaerense (Echeverría & Ferrari, 1993). La asociación lineal y significativa entre los métodos agronómicos entre sí (Fig. 1) está en concordancia con lo publicado por otros investigadores (Mallarino & Blackmer, 1992; Wendt, 1995; Eckert & Watson, 1997; Atia & Mallarino, 2002; Mallarino & Atia, 2005; Maguire *et al.*, 2005; Marban & Ratto, 2005). La relación entre Bray1 y Mehlich3 obtenida en esta investigación (Fig. 1) y las correlaciones consiguientes (Tabla 3) validan los resultados obtenidos por Zamuner *et al.* (2006) en muestras de suelo del sudeste bonaerense cultivado con trigo. Por lo tanto, el modelo de regresión lineal ($\text{Mehlich3} = 0,80 \text{ Bray1} + 3,45$) tiene buena capacidad de generalización y se puede usar para predecir la cantidad de P extraído por un método teniendo el valor del otro. Es importante tener en cuenta que la correlación entre ambos métodos de extracción es menor en suelos con pH mayor a 7,3 y cuando la concentración de CaCO_3 es mayor a 5 mg kg^{-1} (Mallarino & Blackmer, 1997; Zamuner *et al.*, 2006), por lo que no debería utilizarse la ecuación de regresión en muestras de suelo con esas características.

Las relaciones entre los métodos agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen) y el ambiental (CaCl_2) fueron lineales y significativas (Fig. 2). Pöthig *et al.* (2010) proponen una ecuación que relaciona el grado de saturación de P y el P soluble en agua, relación que sería independiente del tipo de suelo, y a que partir de ella concluyen que valores de P en el suelo mayores a 5 mg P kg^{-1} implican riesgo de pérdida de P. Utilizando dicho umbral de P-CaCl₂ en las ecuaciones de la Figura 2, se calcularon los valores de P extractable con cada método agronómico. Por consiguiente, cuando se

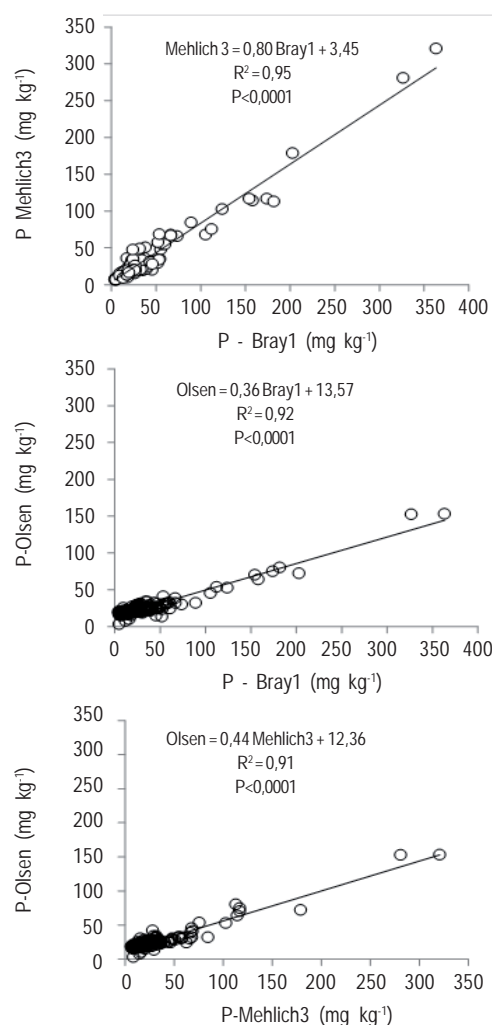


Figura 1. Relación entre concentración de fósforo (P) en el suelo extraído con tres test agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen). $n = 163$

Figure 1. Relationship between soil phosphorus (P) concentrations extracted with three agronomic tests (Bray1, Mehlich3 and Olsen).

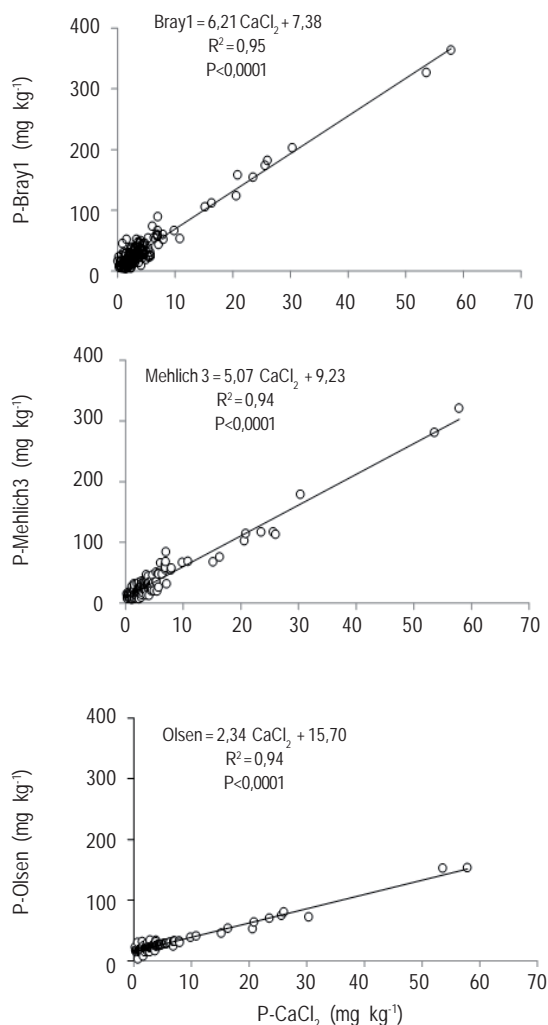


Figura 2. Relación entre la concentración de P en el suelo extractable con CaCl_2 (P- CaCl_2) y tres métodos de extracción agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen). $n = 150$.

Figure 2. Relationship between soil phosphorus concentrations extracted with CaCl_2 (P- CaCl_2) and three agronomic tests (Bray1, Mehlich3 and Olsen).

determinen valores mayores a 39, 34 y 27 mg kg⁻¹ para Bray1, Mehlich3 y Olsen, respectivamente, existirá la probabilidad de impacto negativo del contenido de P en el suelo sobre la calidad del agua. Si bien Pöthig *et al.* (2010) concluyeron que el umbral de P- CaCl_2 es independiente del tipo de suelo (ya que la investigación incluye suelos con un amplio rango de propiedades fisicoquímicas, uso del suelo y fertilización) este valor deberá ser validado con evaluaciones directas de riesgo de pérdida de P en condiciones locales.

Riesgo de pérdida de P en el cultivo de papa

Desde el punto de vista agronómico, el valor crítico es la concentración de P en el suelo a partir de la cual no se espera respuesta del cultivo la fertilización fosfatada. El valor crítico depende del cultivo, tipo de suelo y el método analítico utilizado (Atia & Mallarino, 2002; Sims & Sharpley, 2005; Marban & Ratto, 2005; Beegle, 2005; Zamuner *et al.*, 2006; Paz-Ferreiro *et al.*, 2012). Para el cultivo de papa, Zamuner *et al.* (2015 *en revisión*), determinaron que los valores críticos agronómicos fueron de 31, 27 y 10 mg kg⁻¹ para Bray1, Mehlich3 y Olsen, respectivamente. Dado que estos valores críticos agronómicos son menores a los valores críticos ambientales (Fig. 2), se puede inferir que no habría antagonismo entre productividad del cultivo de papa y la sostenibilidad ambiental del sistema de producción.

Sin embargo, los resultados obtenidos de los análisis de suelo durante el ciclo de crecimiento plantean algunos interrogantes. La fertilización incrementó la concentración de P en el suelo (Bray1) en magnitud diferente según la interacción entre el año, la dosis de P y el tiempo transcurrido desde la fertilización (Tabla 4). A los 41 días después de la plantación, el aumento respecto al tratamiento testigo de Bray1 para las dosis de 25, 50 y 100 kg ha⁻¹ fue de 7, 31 y 49 mg kg⁻¹, respectivamente en 2009/10 y de 9, 18 y 30 mg kg⁻¹, respectivamente en 2010/11 (Fig. 3). Estos resultados coinciden con los estimados a partir de la ecuación propuesta por Rubio *et al.* (2008) para suelos del sudeste bonaerense (Incremento de P disponible por unidad de P agregado = $0,3628 + 0,0036 \text{ Bray1 inicial}$). Con el avance del ciclo del cultivo, la disponibilidad de P en el suelo disminuyó, con un patrón diferente según el año y la dosis aplicada (Fig. 3). Este comportamiento es consistente con la cinética del P en el suelo y la demanda del cultivo (Havlin *et al.*, 2005; Shen *et al.*, 2011; Rosen *et al.* 2014). Inicialmente, los fertilizantes solubles incrementan el P en la solución del suelo, siendo el destino del P aplicado las formas orgánicas adsorbidas sobre la superficie del suelo y las inorgánicas relativamente insolubles unidas al Ca (Ciampitti *et al.*, 2011). Posteriormente, los procesos de adsorción sobre las superficies minerales, la precipitación como minerales secundarios y la inmovilización microbiana producen la disminución del P en solución (Stevenson & Cole, 1999; Havlin *et al.*, 2005). La absorción radical produce la disminución en la concentración de iones H_2PO_4^- / HPO_4^{2-} en la solución suelo aún en etapas avanzadas del crecimiento

Tabla 4. Resumen del efecto de la estación de crecimiento (año), dosis de fósforo y tiempo transcurrido desde la fertilización (ddp) sobre Bray1 y el fósforo extraído por el cultivo de papa.

Table 4. Summary of the effect of the growing season (year), phosphorus fertilizer rate and time since fertilization (ddp) on Bray1 and phosphorus extracted by the potato crop.

Factor	Bray1	Fósforo extraído
	Pr>F	
Bloque (año)	0,5560	0,9878
Año	< 0,0001	< 0,0001
Dosis	< 0,0001	0,0154
ddp	< 0,0001	< 0,0001
Año * dosis	0,0103	0,5268
Año * ddp	0,0164	0,0203
Dosis * ddp	0,0320	0,2764
Año * dosis * ddp	0,0094	0,8787

(Stevenson & Cole, 1999; Havlin *et al.*, 2005; Shen *et al.*, 2011; Rosen *et al.* 2014). La cantidad de P extraído por el cultivo dependió del año, dosis de P y fecha de muestreo (Tabla 4). En el primer año el cultivo absorbió hasta 46 kg ha⁻¹ mientras que el segundo año, la cantidad máxima de P absorbida fue 31 kg ha⁻¹ (Fig. 4).

En 2009/10 la disponibilidad inicial de P en el suelo era relativamente alta (29,1 mg kg⁻¹ Bray1) y la fertilización con 50 y 100 kg P ha⁻¹, elevó la concentración de P en el suelo por encima de los 39 mg kg⁻¹, que es el valor límite ambiental para Bray1, durante 90 días después de plantación (Fig. 3). Por el contrario, en 2010/11 cuando la disponibilidad inicial de P era baja (7,1 mg kg⁻¹ Bray1), la fertilización no incrementó el valor de Bray1 por sobre el valor límite ambiental en ningún

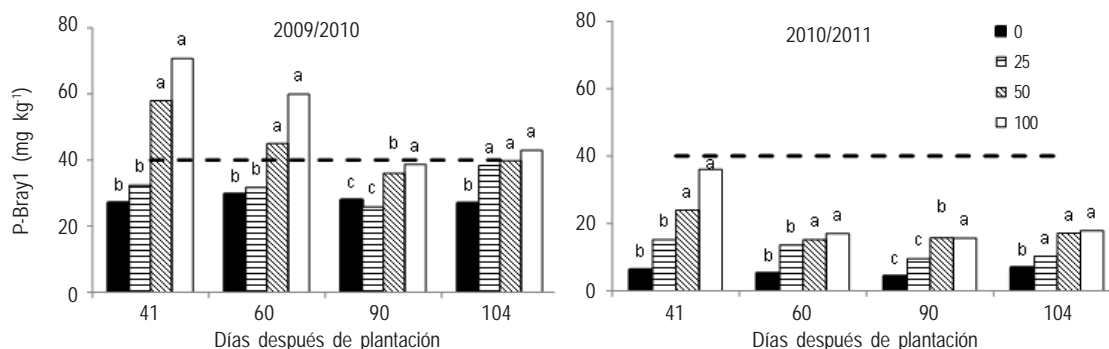


Figura 3. Fósforo extractable (Bray1) en muestras de suelo (0-20 cm) cultivado con papa y fertilizado con 0, 25, 50 o 100 kg P ha⁻¹, durante dos estaciones de crecimiento (2009/10 y 2010/11). La línea representa el valor límite de riesgo ambiental de pérdida de P. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) dentro de cada fecha de muestreo.

Figure 3. Bray1 extractable phosphorus in soil samples (0-20 cm) cultivated with potato and fertilized with 0, 25, 50 or 100 kg P ha⁻¹, during two growing seasons (2009/10 and 2010/11). The line represents the P limit value of environmental risk. Different letters indicate significant differences ($p \leq 0,05$) within each sampling date.

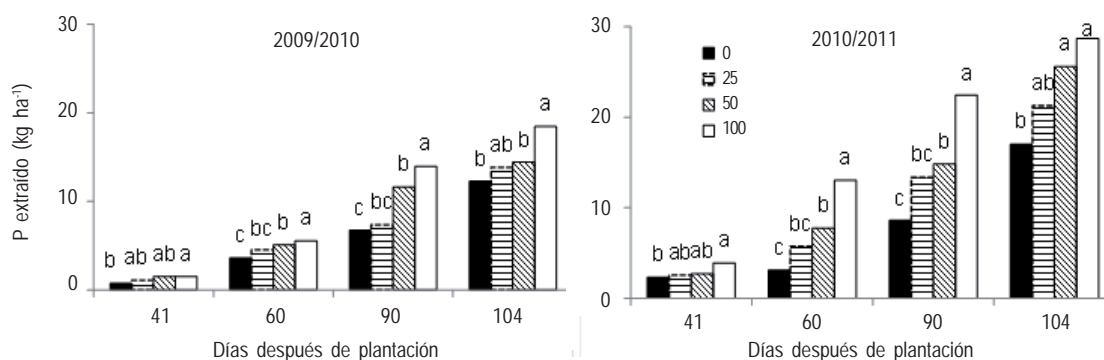


Figura 4. Evolución de la cantidad de fósforo (P) extraído por el cultivo de papa, en dos estaciones de crecimiento (2009/10 y 2010/11). Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) dentro de cada fecha de muestreo.

Figure 4. Evolution of the amount of phosphorus (P) extracted by potato in two growing seasons (2009/10 and 2010/11). Different letters indicate significant differences ($p \leq 0,05$) within each sampling date.

momento del ciclo del cultivo (Fig. 3). Estos resultados sugieren la necesidad de efectuar el seguimiento de la disponibilidad de P en el suelo durante la estación de crecimiento. Además sería necesario controlar los factores que pudieran favorecer el transporte del P al agua, como el exceso de riego en lotes con pendiente (Sharpley *et al.*, 2003) para no provocar situaciones de riesgo ambiental de pérdida de P debidas a la fertilización del cultivo de papa.

CONCLUSIONES

Las regresiones entre los métodos agronómicos de determinación de P del suelo (Bray1, Mehlich3 y Olsen) y con el método ambiental (CaCl₂) fueron muy significativas, por lo que podrían ser utilizados indistintamente para la determinación de P disponible en los suelos agrícolas del sudeste bonaerense.

A partir de la relación entre los métodos agronómicos y el ambiental se estimaron valores límite de P en el suelo (39, 34 y 27 mg kg⁻¹ para Bray1, Mehlich3 y Olsen, respectivamente) a partir de los cuales podría existir riesgo de pérdida de P desde el suelo a los sistemas acuáticos.

Se determinaron concentraciones de P Bray1 en suelos cultivados con papa que podrían asociarse con riesgo de pérdida de P, lo que alerta respecto al potencial impacto ambiental por fertilización con P.

BIBLIOGRAFÍA

- Atia, AM & AP Mallarino. 2002. Agronomic and Environmental Soil Phosphorus Testing in Soils Receiving Liquid Swine Manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1696-1705.
- Bai Z; H Li; X Yang; B Zhou; X Shi; B Wang; D Li; J Shen; Q Chen; W Qin; O Oenema & F Zhang. 2012. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types. *Plant Soil* 372: 27-37.
- Beegly, D. 2005. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. *In: JT Sims and AN Sharpley (ed).* Phosphorus: Agriculture and the environment. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison. p.123-143.
- Caldiz, DO. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. McCain Argentina SA, Balcarce-BASF Argentina SA, Capital Federal. Argentina. 226 p.
- Ciampitti, IA; LI Picone; G Rubio & FO Garcia. 2011. Pathways of Phosphorous Fraction Dynamics in Field Crop Rotations of the Pampas of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 918-926.
- Echeverría, HE & J Ferrari. 1993. Relevamiento de algunas características de los suelos agrícolas del sudeste bonaerense. Boletín Técnico (INTA. Balcarce) N° 112. INTA. Balcarce. Balcarce (Argentina). 18p
- Echeverría, HE & FO García. 2005. Papa. *In: Echeverría and García (ed)* Soil fertility and fertilization of crops. Buenos Aires (Argentina) p. 365-378.
- García, FO; LI Picone & A Berardo. 2007. Fósforo. *En: Echeverría, HE; García, FO (eds).* Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 99-121.
- Gikonyo, EW; AR Zaharah; MM Hanafi & AR Anuar. 2010. Comparison of Soil Phosphorus Tests for Assessing Plant Availability of Phosphorus in an Ultisol Amended with Water-Soluble and Phosphate Rock Sources. *The Scientific World J.* 10: 1679-1693.
- Gonzalez, J & E Rodríguez. 2011. Limitantes para la implementación de buenas prácticas agrícolas en la producción de papa en argentina. *Agroalimentaria* 17: 63-84.
- Havlin, JL; JD Beaton; SL Tisdale & WL Nelson . 2005. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management (6th Edition). Pearson Prentice Hall (ed). 514 pp.
- Hopkins, BG; DA Horneck & AE MacGuidwin. 2014. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension. *Am. J. Potato Res.* 91: 161-174.
- Ige, DV; OO Akinremi & DN Flatten. 2005. Environmental index for estimating the risk of phosphorus loss in calcareous soils of Manitoba. *J. Environ. Qual.* 34: 1944-1951.
- Indiati, R. 2000. Addition of phosphorus to soils with low to medium phosphorus retention capacities. II. effect on soil phosphorus extractability. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 2591-2606.
- Johnston, A E; PR Poulton & RP White. 2013. Plant-available soil phosphorus. Part II: the response of arable crops to Olsen P on a sandy clay loam and a silty clay loam. *Soil Use and Management* 29: 12-21.
- Jordan-Meille L; GH Rubæk; PAI Ehler; V Genot; G Hofman; K Goulding; J Recknagel; G Provolò & P Barradough. 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28: 419-435.
- Kulhánek M; J Balík; J Ěrný; F Vašák & Š Shejbalová. 2014. Influence of long-term fertilizer application on changes. *Plant Soil Environ.* Vol. 60, No. 4: 151-157.
- Laboski, CAM, & JB Peters. 2012. Nutrient application guidelines for field, vegetable and fruit crops in Wisconsin. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin-Extension, Publication A2809.
- Maguire RO; WJ Chardon & RR Simard. 2005. Assessing potential environmental impacts of soil phosphorus by soil testing. *In: JT Sims and AN Sharpley (ed).* Phosphorus: Agriculture and the environment. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison. p.123-143.
- Mallarino, AP & MA Atia. 2005. Correlation of a Resin Membrane Soil Phosphorus Test with Corn Yield and Routine Soil Tests. *SSSAJ.* Vol. 69 No. 1, p. 266-272.
- Mallarino, AP & AM Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentration of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84: 850-856.
- Marbán, L& SE Ratto. 2005. Tecnologías en análisis de suelos: alcance a Laboratorios Agropecuarios. - 1° ed. - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. - Buenos Aires, pág. 21
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15:1409-1416.
- Munoz F; RS Mylavarapu & CM Hutchinson. 2005. Environmentally responsible potato production systems: A review. *Journal of Plant Nutrition* 28: 1287-1309.

- Murphy, J & JP Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* 27: 31-36.
- Pack, JE; CM Hutchinson & EH Simonne. 2006. Evaluation of controlled-release fertilizers for northeast Florida chip potato production. *Journal of Plant Nutrition* 29: 1301-1313.
- Pautler, MC & JT Sims. 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 765-773.
- Paz-Ferreiro, J; E Vidal Vázquez & CD Abreu. 2012. Phosphorus Determination after Mehlich 3 Extraction and Anion Exchange Resin in an Agricultural Soil of Northwestern Spain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43: 102-111.
- Pierzynski, GM; WR McDowell & T Sims. 2005. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of inorganic Phosphorus in soils. In: ASA, CSSA, SSSA, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Phosphorus: agriculture and the environment, Agronomy Monograph N° 46. p. 53-86.
- Pote, DH; TC Daniel; PA Moore Jr; AN Sharpley; DR Edwards & DJ Nichols. 1995. Phosphorus: relating soil tests to runoff concentrations across five soil series. *Agronomy Abstracts.* p. 294. Am. Soc. Agron. Madison. WI.
- Pöthig, R; H Behrendt; D Opitz & G Furrer. 2010. A universal method to assess the potential of phosphorus loss from soil to aquatic ecosystems. *Environ Sci Pollut Res* 17: 497-504.
- Rosen, CJ; KA Kelling; JC Stark & GA Porter. 2014. Optimizing Phosphorus Fertilizer Management in Potato Production. *Am.J.Potato Res.* 91: 145-160
- Ruark, MD; KA Kelling & L Ward Good. 2014. Environmental Concerns of Phosphorus Management in Potato Production. *American Journal of Potato Research.* 91: 132-144.
- Rubio, G; MJ Cabello; FH Gutiérrez Boem & E Munaro. 2007. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1721-1727.
- Sainz Rozas, H; HE Echeverría & H Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra-pampeana Argentina. *RIA* 38: 33-39.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release version 9.1. SAS Inst., Cary, NC.
- Saunders, WMH & EG Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6: 254-267.
- Schroder, JL; H Zhang & JR Richards. 2009. Interlaboratory validation of the Mehlich 3 method as a universal extractant for plant nutrients. *Journal of AOAC International* 92: 995-1008.
- Sharpley, AN; T Daniel; T Sims; J Lemunyon; R Stevens & R Parry. 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication. (2 nd Edition). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS 149.44 pp.
- Shen, J; L Yuan; J Zhang; H Li; Z Bai; X Chen; W Zhang & F Zhang. 2011. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology.* Vol. 156, pp. 997-1005.
- Sims, JT & N Sharpley. 2005. Phosphorus: Agriculture and the Environment. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI. 1020 p.
- Sims, JT. 2009. Soil Test Phosphorus: Principles and Methods In: Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residual and waters. JL Kovar and G.M. Pierzynski (eds). Southern Cooperative Series Bulletin N° 408. Available in: http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/P_Methods2ndEdition2009.pdf
- Stevenson, FJ & CV Cole. 1999. Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. John Wiley and Sons, NY. 380 p.
- Torrent, J & A Delgado. 2001. Using phosphorus concentration in the soil solution to predict phosphorus desorption to water. *J. Environ. Qual.* 30: 1829-1835.
- Wendt, JW. 1995. Evaluation of Mehlich 3 soil extractant for upland Malawi soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 687-702.
- Westerman, DT. 2005. Nutritional Requirement of Potato. *Amer. J. Potato Res.* 82: 301-307.
- Zamuner, EC; LI Picone & HE Echeverría. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. *Soil and Tillage Res.* 89: 70-77.
- Zhang, W; W Ma; Y Ji; M Fan; O Oenema & F Zhang. 2008. Efficiency, economics, and environmental implications of phosphorus resource use and the fertilizer industry in China. *Nutr Cycl Agroecosyst* 80: 131-144.

