

GRADO DE SATURACIÓN Y RIESGO DE PÉRDIDAS DE FÓSFORO EN UN MOLISOL DEL SUDESTE BONAERENSE CULTIVADO CON PAPA

NÉLIDA NANCY POSE; ESTER CRISTINA ZAMUNER & HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA

Recibido: 14-02-11

Recibido con revisiones: 11-03-11

Aceptado: 11-11-11

DEGREE OF SATURATION AND RISK OF PHOSPHORUS LOSS IN A MOLLISOL UNDER A POTATO CROP IN SOUTHEASTERN BUENOS AIRES

ABSTRACT

Phosphorus (P) loss by runoff, erosion, or leaching through the profile increase with high concentrations of available P and favorable conditions for transport. The P loss potential from a Typic Argiudoll cultivated with potato and fertilized with P was estimated with some indicators. Soil samples were taken from two trials with four P fertilization treatments (0, 100, 200 and 400 kg P ha⁻¹) in a randomized complete block design with three replications. Fertilization with 100 kg P ha⁻¹ on a soil with medium available P (19.3 mg kg⁻¹) increased Bray1 and crop yield. Fertilization with 200 and 400 kg P ha⁻¹ in a soil with high Bray1 (28.4 mg kg⁻¹) increased P availability and crop yield remained unchanged. The Phosphorus Soil Index did not change significantly (average 209 mg P kg⁻¹). Soil Phosphorus Degree (GSP) reached 25% at tuber initiation when fertilized with 400 kg P ha⁻¹. The GSP risk point threshold from the literature is 20-30%. Bray 1 and P CaCl₂ values greater than 52.4 and 1.72 mg P kg⁻¹ respectively, correspond to this threshold and alert of the risk of P loss and possible adverse environmental impacts of these crop management practices.

Key words. Sorption, extractable phosphorus, environmental risk, runoff.

RESUMEN

Las pérdidas de fósforo (P) por escurrimiento, erosión, o lavado aumentan con altas concentraciones de P disponible y condiciones que favorezcan su transporte. La potencialidad de pérdida de P de un suelo Argiudol típico cultivado con papa y fertilizado con P se estimó empleando algunos indicadores de P. Para ello se utilizaron muestras de suelo provenientes de dos ensayos de fertilización fosfatada con cuatro tratamientos (0, 100, 200 y 400 kg P ha⁻¹). El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. La fertilización con 100 kg P ha⁻¹ en un suelo con media disponibilidad inicial de P (19,3 mg kg⁻¹), incrementó el Bray1 y el rendimiento Bray1 en inicio de tuberización y el rendimiento. Cuando la disponibilidad inicial fue alta (28,4 mg kg⁻¹) y se agregaron 200 y 400 kg P ha⁻¹, Bray1 se incrementó y el rendimiento permaneció sin variaciones. El Índice de sorción de P del suelo no se modificó significativamente con la fertilización (en promedio 209 mg P kg⁻¹). En inicio de tuberización y con la mayor dosis de fertilización, el grado de saturación de P (GSP) llegó a 25%. El umbral de GSP obtenido en bibliografía es de 20-30%. Valores de Bray1 y P CaCl₂ mayores a 52,4 y 1,72 mg P kg⁻¹ respectivamente, corresponderían con dicho umbral y alertan del eventual impacto ambiental desfavorable de esta práctica de manejo de cultivo.

Palabras clave. Sorción, fósforo extractable, riesgo ambiental, escurrimiento superficial.

INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es considerado un elemento relativamente inmóvil en el suelo, no obstante puede perderse por escurrimiento, erosión, o lavado a través del perfil. La pérdida de P por cualquiera de estos mecanismos es mayor cuando los valores de concentración de P disponible en el suelo están por encima del rango óptimo agronómico para dicho suelo (Pote *et al.*, 1996; Beauchemin *et al.*, 1998). Si en un agrosistema se conjugan altos niveles de P en el suelo y condiciones que favorezcan su transporte hacia aguas superficiales, puede ocurrir la eutroficación de las mismas (Sharpley *et al.*, 2003). Esta situación ha incrementado la demanda de información que permita identificar áreas con riesgo de pérdida de P con el fin de ajustar las recomendaciones de fertilización a un balance entre protección del medio ambiente y producción agrícola sustentable (Pierzinski, 2005).

La retención de P por los coloides del suelo es un parámetro que permite determinar el destino o fuente de este elemento y su transporte. Este proceso de retención incluye reacciones de adsorción física, quimisorción, intercambio iónico, precipitación en superficie y en la fase sólida que podrían resumirse como reacciones de adsorción y precipitación (Sample *et al.*, 1980). La secuencia continua de los procesos de adsorción y precipitación se conoce como proceso de sorción (van der Zee & van Riemsdijk, 1988).

La habilidad de un suelo para liberar al medio P retenido en sus coloides, depende de la cantidad de P sorbido y de la capacidad de sorción de P del suelo, ya que existe un equilibrio o condición de cuasi-equilibrio lento entre la fracción lábil (P que puede pasar a la solución del suelo) y la fracción no lábil (compuestos de P que no pasan a la solución del suelo durante el cultivo) (Barrow, 1980), de tal forma que una variación en los componentes lábiles induce a una modificación proporcional en los componentes no lábiles del suelo (Barrow, 1983). Al incrementar la cantidad de P sorbido después de la aplicación de fertilizantes, la desorción de este nutriente tiende a aumentar y podría resultar en la pérdida de P por escurrimiento (Schroeder *et al.*, 2004; Vadas *et al.*, 2005).

Bache & Williams (1971) desarrollaron un índice de sorción de P (ISP) que permite determinar rápidamente la capacidad de sorción del suelo ya que es estimado a partir de una isoterma de un solo punto, y demostraron, empleando 42 suelos ácidos y calcáreos de Inglaterra, que el ISP correlaciona con la capacidad máxima de sorción de P estimada a partir de isotermas de sorción completas. Pos-

teriores estudios confirman su aptitud como estimador de la capacidad de sorción máxima de suelos (Börling, 2001; Hansen *et al.*, 2002; Axt, 1999; McDowell & Condon, 2004).

Integrando el valor de ISP con los valores de P disponible se puede obtener una caracterización del grado de saturación con P del suelo (GSP). El GSP es un índice simple que se desarrolló para cuantificar el riesgo de eutroficación de cuerpos de agua (Casson *et al.*, 2006), y que permite predecir el potencial del suelo para liberar P, que se transportaría por escurrimiento hacia las fuentes superficiales de agua o por lavado hacia aguas subterráneas. En la medida que el suelo está más saturado con P puede desorber mayor cantidad de este nutriente (Pautler & Sims, 2000). Por lo tanto, el GSP podría ayudar a predecir la potencialidad del suelo para liberar P al medio (Pautler & Sims, 2000; Allen & Mallarino, 2006).

Por otra parte, las extracciones de P con CaCl_2 se utilizan para estimar las pérdidas de P por escurrimiento superficial y lavado (McDowell & Sharpley, 2001; Börling *et al.*, 2004). Se han empleado el P extraído con CaCl_2 o el Bray1 ($\text{HCl} + \text{NH}_4\text{F}$) en el diagnóstico de la disponibilidad de P, siendo ambos métodos simples y rápidos de realizar. El Bray1 es el más empleado en suelos neutros y ácidos, mientras que el P en CaCl_2 es recomendado en suelos con amplio rango de pH (Hooda *et al.*, 2000). En general, las soluciones extractantes, desplazan rápidamente el P del suelo a la solución y a continuación tiene lugar una readсорción del P inicialmente desplazado. Rodríguez & Mendoza (1993) determinaron que la solución extractante de CaCl_2 0,01M con relación suelo:solución 1:10, mostró mucha menos readсорción de P con el tiempo de contacto, que el método Bray & Kurtz.

El sudeste bonaerense es una de las principales zonas productoras de papa (*Solanum tuberosum*) para consumo e industria argentina y posee suelos moderadamente ácidos, con abundante materia orgánica, de textura franca y con pendientes variables que pueden superar el 5%. Generalmente, el cultivo se realiza bajo riego con equipo de avance frontal y con aplicación de fertilizante fosfatado, a una dosis superior que la aconsejada para otros cultivos. El Bray1 es el método de determinación de la disponibilidad de P más empleado para recomendaciones de fertilización en el sudeste bonaerense y aún no se ha establecido la relación entre la cantidad de P removida con CaCl_2 y con Bray 1 para los suelos de la zona. Además, desde el punto de vista agronómico y ambiental sería importante el

relevamiento a escala local de parámetros de sorción de P simples, económicos y rápidos de realizar como análisis de rutina, que junto con el P en CaCl_2 pudieran contribuir a evaluar el potencial riesgo de pérdidas de P.

Se plantea que es factible el escurrimiento de P en solución en Argiudoles típicos del sudeste bonaerense, cultivados con papa y fertilizado con altas dosis de P. Para validar esta hipótesis, se plantean los siguientes objetivos: 1) estimar la capacidad de sorción de P a partir del ISP y calcular el grado de saturación de P (GSP), y 2) determinar la relación entre el GSP con el Bray1 y con el P extractable con CaCl_2 .

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este trabajo se emplearon muestras de suelo provenientes de dos ensayos de fertilización fosfatada en el cultivo de papa realizados en 2005-6 y 2007-8. Los ensayos se realizaron en el partido de Balcarce ($37^\circ 45' \text{ S}$; $58^\circ 18' \text{ W}$, 130 m snm), provincia de Buenos Aires. El clima de la región del sudeste bonaerense es mesotermal-húmedo-subhúmedo (Burgos & Vidal, 1951) con una temperatura media mensual (octubre-marzo) del aire de $17,2^\circ \text{ C}$ y una precipitación media mensual (octubre-marzo) de 95 mm promedio 1995-2006. Se calcularon balances hídricos decádicos utilizando la metodología propuesta por Della Maggiora *et al.* (1998). Los valores de precipitación diarios y la evapotranspiración máxima (ETM) se calcularon en períodos de diez días. La ETM se calculó como el producto de la evapotranspiración potencial (ETP) y el coeficiente del cultivo (Kc) estimado según la metodología de Doorenbos & Pruitt (1997).

El suelo pertenece al subgrupo Argiudol típico (USDA Soil Classification). En la Tabla 1 se resumen algunas características de los 20 cm superiores de los suelos al momento de la plantación del cultivo de papa y de las prácticas de manejo.

El diseño experimental en ambos ensayos fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. El primer ensayo se realizó con dos dosis de P (0 y 100 kg P ha^{-1}) y el segundo con tres dosis (0, 200 y 400 kg P ha^{-1}). En la campaña 2005-6 se evaluó la respuesta a la fertilización en el cultivar Bannock Russet y en la 2007-8 en la variedad Innovator. La dosis de 100 kg P ha^{-1} es habitual en la zona y las otras dos fueron seleccionadas con el objeto de magnificar el efecto de la fertilización con P. Las unidades experimentales consistieron en parcelas de 12 surcos, de 14 m de largo separados a 0,85 m. Se empleó superfosfato triple de calcio (0-20-0) como fuente de P, que se distribuyó en un 75% previo a la plantación y 25% en plantación. Con la finalidad de mantener el nivel

de N no limitante para el cultivo, se agregó urea (46-0-0) de acuerdo al siguiente cronograma: 100 kg ha^{-1} a la plantación y 150 kg ha^{-1} al escardillar el cultivo. Además se aplicaron 80 kg ha^{-1} de Sulpomag (18% de potasio, 21% azufre, 10% de magnesio).

A la madurez del cultivo se determinó el rendimiento de tubérculos (Mg ha^{-1}). Para ello se recolectaron en forma manual tres muestras de un metro lineal de los surcos centrales en cada tratamiento y cada repetición. El contenido de materia seca de los tubérculos fue determinado por gravimetría. Se calculó el P exportado en los tubérculos como el producto del rendimiento por la concentración de P. Esta se determinó por el método de Saunders & Williams (1955). Se calculó el balance de P como la diferencia entre la cantidad de P aplicada con el fertilizante y la removida por los tubérculos al momento de la cosecha.

En ambos experimentos se tomaron muestras de los 20 cm superiores del suelo en dos momentos del ciclo del cultivo: a los 60 días después de plantación (inicio de tuberización), y luego de cosechado el cultivo de papa. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron por malla de 2 mm. Se determinó P disponible por el método de Bray & Kurtz con un período de agitación de 5 minutos (Mendoza & Marban, 1990), P en CaCl_2 0,01M con agitación durante 1 h a 25° C y posterior centrifugación 10 min a 4000 RPM y se empleó la isoterma de adsorción de P de un punto (Mozaffari & Sims, 1994) para calcular el ISP (Bache & Williams, 1971). Para obtener la isoterma, se agitó 1 g de suelo con 20 mL de una solución de P conteniendo 75 mg P L^{-1} (como KH_2PO_4) en CaCl_2 0,01M durante 20 h a 25° C . La

Tabla 1. Características del suelo previo a la plantación y prácticas de manejo durante el ciclo del cultivo.

Table 1. Soil characteristics before planting and management practices during the crop cycle.

Información suelo/cultivo	Campaña	
	2005-06	2007-08
Carbono orgánico total ¹ ($\text{g}100\text{g}^{-1}$)	$30,2 \pm 0,2$	$24,4 \pm 0,6$
pH ² (agua)	$6,2 \pm 0,1$	$6,1 \pm 0,2$
P ³ (mg kg^{-1}) (0-20 cm)	$19,3 \pm 3,6$	$28,4 \pm 2,9$
N- NO_3^- (kg ha^{-1}) (0-40 cm)	$39,2 \pm 5$	$67,0 \pm 3,0$
N mineralizado (kg ha^{-1})	$151,0 \pm 8,5$	$175,0 \pm 10,7$
Fecha de plantación	20/10/05	19/10/07
Fecha de cosecha	13/3/06	18/3/08
Precipitación + riego (mm)	514	966

¹ Walkley & Black (1934); ² determinado con electrodo en una suspensión 1:2,5 de agua:suelo; ³ Bray & Kurtz (1945).

¹ Walkley & Black (1934); ² measured with an electrode in a 1:2.5 water suspension, soil ³ Bray & Kurtz (1945).

suspensión de suelo se centrifugó a 5000 rpm durante 30 min. La concentración de P en el sobrenadante se determinó por colorimetría (Murphy & Riley, 1962). La cantidad de P sorbido se calculó como diferencia entre la concentración de P agregada en la solución inicial y la concentración remanente en la solución del suelo al finalizar la agitación.

Los análisis químicos se realizaron por duplicado en cada muestra compuesta de suelo, en cada uno de los bloques, promediando los resultados de los duplicados para realizar el análisis estadístico.

Se calculó el ISP mediante la siguiente ecuación:

$$ISP(\text{mg kg}^{-1}) = \frac{X}{\log P_f}$$

donde: X = cantidad de P sorbido por la fase sólida (mg P kg^{-1}); P_f = concentración de P en la solución del suelo, después de 20 h de equilibrio (mg P L^{-1}).

Se estimó el grado de saturación de P (GSP) (Pautler & Sims, 2000) de la siguiente manera:

$$GSP(\%) = \frac{Bray1}{Bray1 + ISP} \times 100$$

donde: Bray1 = P disponible Bray1 (mg kg^{-1}); ISP = índice de sorción de P (mg kg^{-1}).

Los resultados obtenidos fueron analizados utilizando el programa estadístico InfoStat/Profesional Version 1.1 (2002). Las medias de cada tratamiento se compararon mediante la prueba de diferencias mínimas significativas (DMS) cuando el ANOVA fue significativo. Se determinó el coeficiente de Pearson para la asociación GSP y Bray1 y entre Bray1 y P CaCl_2 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones climáticas durante el período de cultivo fueron favorables para el crecimiento y desarrollo de papa. Las temperaturas medias mensuales en el período noviembre-febrero para la primera y segunda campaña fueron en promedio 0,66 y 0,33 °C superiores al promedio histórico del período 1998-2008. La cantidad de agua que recibió el cultivo (precipitación + riego) fue suficiente para cubrir sus requerimientos en ambas campañas (Tabla 2).

La fertilización fosfatada incrementó el rendimiento del cultivo de papa en un 25% el primer año (Tabla 3). El segundo año, con mayor disponibilidad de P la respuesta en rendimiento fue no significativa (Tabla 1 y Tabla 3). La concen-

Tabla 2. Precipitaciones (pp) + riego (R), Evapotranspiración potencial (ETP), Evapotranspiración real (ETR), deficiencias y excesos de agua en mm calculados cada 10 días a partir del balance de agua. 1 = 1-10 días, 2 = 11-20 días y 3 = 21-30/31 días.

Table 2. Rainfall (pp) + irrigation (R), potential evapotranspiration (PET), actual evapotranspiration (ETR), water deficiencies and excesses in mm calculated every 10 days from the water balance. 1 = 1-10 days, 2 = 11-20 days and 3 days = 21-30/31.

Campaña 2005 /06															
	Noviembre			Diciembre			Enero			Febrero			Marzo		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	----- mm -----														
pp + R	44	40	22	50	57	71	51	30	49	55	48	31	34	34	20
ETP ¹	31	36	42	42	45	50	48	46	51	40	38	31	40	32	29
ETR	21	29	37	40	46	53	51	47	47	34	27	19	22	16	13
Déficit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exceso	19	0	5	17	25	0	0	0	0	0	4	15	12	4	0

Campaña 2006 /07															
	Noviembre			Diciembre			Enero			Febrero			Marzo		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	----- mm -----														
pp + R	17,5	23,0	36,8	45,8	93,6	71,5	68,9	87,0	87,0	64,9	107,8	17,0	148,8	27,0	27,7
ETP ¹	36,1	42,6	45,9	48,8	49,7	53,8	45,6	51,0	57,5	55,4	42,7	32,0	30,7	28,4	27,1
ETR	14,4	23,4	30,3	39,0	44,7	51,1	46,1	53,6	60,4	56,0	39,7	27,2	21,5	17,0	16,3
Déficit	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Exceso	3,1	0,0	6,1	6,8	48,9	20,4	22,8	33,5	26,6	8,9	68,1	0,0	117,1	10,0	11,4

Tabla 3. Producción de materia seca, P removido en tubérculo y balance de P en el cultivo de papa sin fertilizar y fertilizado con P.

Table 3. Dry matter production, P removed by tuber and P balance in a potato crop unfertilized and fertilized with P.

Campaña	P aplicado	Rendimiento	P removido en tubérculo	Balance de P
	kg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
2005/06	0	47,3	13,4	-13,4
	100	63,3	21,1	78,9
	CV	2,3	15,4	
	P	0,0002	0,01	
	DMS	2,9	6,8	
2007/08	0	33,2	10,1	-10,1
	200	34,8	12,2	187,8
	400	33,1	13,0	387,0
	CV	23,3	23,3	
	P	0,9	0,7	
	DMS	15,7	5,2	

tración promedio de P en tubérculos se afectó por los tratamientos de fertilización y varió entre 1305 y 1522 mg kg⁻¹, para los tratamientos sin y con el agregado de P, respectivamente. Por lo tanto, la exportación de P en tubérculos incrementó el 57% en el primer año y 20 y 28% para 200 y 400 kg P ha⁻¹, respectivamente, en el segundo año.

Dada la afinidad de los iones fosfato a ser adsorbidos sobre la superficie de los coloides y de formar compuestos insolubles con cationes di y trivalentes, la pérdida de P a partir del suelo es mínima (Stevenson & Cole, 1999), por lo que puede considerarse que la principal remoción de P del suelo la realiza el cultivo. En este marco, la diferencia entre la cantidad de P agregada como fertilizante y la removida por el cultivo expresa el enriquecimiento o empobrecimiento del suelo respecto de este nutriente. Así, el balance de P es negativo en el tratamiento sin agregado de P mientras que en los tratamientos fertilizados la incorporación de P superó la exportación del cultivo, particularmente cuando las dosis de P fueron elevadas (Tabla 1).

Si se compara la disponibilidad de Bray1 en el tratamiento sin P, previo a la siembra con la registrada al inicio de tuberización (Tabla 1 y Tabla 4), puede observarse que la misma se incrementó alrededor del 50 y 14% en la primera y segunda campaña, respectivamente. En ese período el suelo no recibió agregado de P y la extracción de nutrientes por parte de la planta es mínima ya que el cultivo se encuentra en estado vegetativo. Teniendo en cuenta que el

suelo empleado en la primera campaña tenía un contenido de carbono orgánico mayor al de la segunda, posiblemente la liberación de P a partir de la mineralización de formas orgánicas haya sido un factor importante en la provisión de P disponible. Además las condiciones en las que se realiza el cultivo, temperaturas estivales, riego y aplicación de urea, favorecen la mineralización del P orgánico (Stevenson & Cole, 1999). No obstante, la magnitud del incremento en Bray 1 fue muy elevada y difícil de explicar por el proceso de mineralización exclusivamente. Al finalizar el ciclo del cultivo el suelo contiene un nivel de Bray 1 similar al obtenido al inicio de tuberización ($P > 0,01$) lo que sugiere que a medida que el cultivo remueve P, las fracciones orgánicas e inorgánicas de P del suelo reestablecen la del Bray 1, compensando el balance negativo que se produce en este tratamiento (Tabla 1 y Tabla 4).

Cuando el suelo se fertiliza con 100 kg P ha⁻¹, la disponibilidad de P en inicio de tuberización se incrementó significativamente respecto del valor inicial (41,9 mg P kg⁻¹), coincidiendo aproximadamente con la cantidad de P aplicada como fertilizante (100 kg P ha⁻¹ @ 45,5 mg P kg⁻¹) (para este cálculo se consideró 20 cm de profundidad de suelo y densidad aparente de 1,1 kg dm⁻³). Cuando se agregan 200 y 400 kg P ha⁻¹ ($\cong 91$ y 182 mg P kg⁻¹, respectivamente) la disponibilidad solo se incrementa en 25,9 y 37,3 mg P kg⁻¹, respectivamente. Lo que indica que una alta proporción del fertilizante agregado permaneció en el suelo en formas no disponibles (Tabla 1 y 4). Esta situación persiste al final del ciclo, ya que una alta proporción del fertilizante agregado no es removido por el cultivo y permaneció retenido por el suelo cuando se aplicaron las mayores dosis de P.

Si bien el agregado de P inorgánico como fertilizante incrementa el Bray 1, no se modificó significativamente ($P > 0,01$) la capacidad de sorción de P del suelo, evaluada a través del ISP (Tabla 4); siendo en promedio de 209 mg P kg⁻¹ de suelo. La cantidad de P retenido en la superficie del suelo depende de algunas propiedades fisicoquímicas del mismo, como contenido de arcilla, óxidos de hierro y aluminio, CaCO₃ y carbono orgánico (Reddy *et al.*, 1998). Estas características no se modifican en el corto plazo permitiendo explicar la falta de diferencia en el ISP entre los tratamientos.

Los valores de GSP en inicio de tuberización y cosecha difieren entre tratamientos pero no entre momentos de muestreo (Tabla 4). Los resultados muestran que, en inicio de tuberización y cuando el suelo es fertilizado con 400

Tabla 4. Valores de Bray 1, índice de porción de P (ISP) y grado de saturación con P (GSP) en dos momentos del ciclo del cultivo de papa.
Table 4. Bray 1, P index sorption (ISP) and degree of P saturation (GSP) values in two stages of the potato crop cycle.

Campaña	Momento	Tratamiento	pH	Bray ¹	ISP		GSP %
					----- mg kg ⁻¹ -----		
2005/06	Inicio de tuberización	Testigo	6,1	29,1 a	219		12 a
		100 kg P ha ⁻¹	6,2	61,2 b	200		23 b
	Cosecha	Testigo	6,2	28,2 a	197		12 a
		100 kg P ha ⁻¹	6,3	63,2 b	203		24 b
2007/08	Inicio de tuberización	Testigo	6,1	34,4 a	196		15 a
		200 kg P ha ⁻¹	6,0	56,1 b	205		21 b
		400 kg P ha ⁻¹	5,8	67,5 b	206		25 b
	Cosecha	Testigo	6,4	31,1 a	214		13 a
		200 kg P ha ⁻¹	6,4	39,1 ab	221		15 ab
		400 kg P ha ⁻¹	6,5	54,6 b	223		20 b

Letras distintas (a,b) indican diferencias significativas ($p < 0,01$) entre tratamientos de una misma campaña y momento.

Different letters (a, b) indicate significant differences ($p < 0.01$) among treatments in the same season and stages.

kg P ha⁻¹, el GSP llega a un máximo de 25%. Esto sugeriría que parte del P agregado podría haber precipitado (Henríquez, 2005) y de esta forma evitar valores más elevados de GSP. Este valor coincide con el valor crítico determinado por Sharpley *et al.* (1996), en suelos de Irlanda, con aplicación de abonos orgánicos. Pote (1999) demostró que el P reactivo disuelto en escorrentía de tres Ultisoles en Arkansas, se incrementa cuando los valores de GSP son mayores o iguales a 20-30%. De Smet *et al.* (1996) propusieron valores de 30% para profundidades de 0 a 90 cm, como límite superior para proteger los espejos de agua. Por lo tanto, hay un acuerdo en la bibliografía

internacional que establece un rango de valores de GSP de 20 a 30% a partir del cual existe riesgo ambiental, por lo que solo en inicio de tuberización estos suelos serían susceptibles a la liberación de P.

Se estableció la relación entre el GSP y las determinaciones Bray 1 y P CaCl₂ (Fig. 1 a y b). En ambos casos se pudo establecer una relación positiva y significativa. La asociación positiva entre los valores obtenidos utilizando diferente métodos para determinar la disponibilidad de P (Bray, Mehlich, P CaCl₂, etc.) y la saturación de P también ha sido reportada por otros investigadores en diferentes condiciones de suelo (Allen & Mallarino, 2006; Pautler &

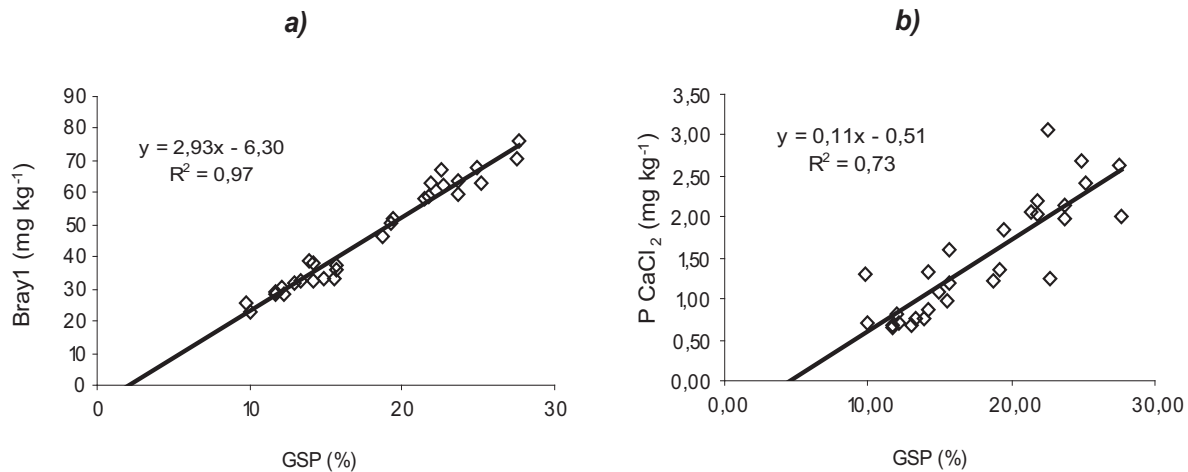


Figura 1. Relación entre el grado de saturación de fósforo (GSP) y el fósforo Bray 1 (a) y con CaCl₂ (b).

Figure 1. Relationship between the degree of phosphorus saturation (GSP) and phosphorus Bray 1 (a) and CaCl₂ (b).

Sims, 2000; Casson *et. al.*, 2006). Para un GSP con valor de 20% corresponden valores de 52,4 mg P kg⁻¹ de suelo según Bray 1 y 1,72 mg P kg⁻¹ de suelo según el método que utiliza CaCl₂, por lo tanto si en un suelo se cuantifican valores superiores a los umbrales mencionados, podría existir riesgo de pérdida de P por escurrimiento.

CONCLUSIÓN

En el sudeste bonaerense la fertilización fosfatada en el cultivo de papa es una práctica generalizada que afecta favorablemente los rendimientos. No obstante, se ha determinado riesgo de pérdida de P (alto GSP), cuando se aplican dosis muy elevadas de P y se producen excesos hídricos. La determinación de P Bray podría ser utilizada tentativamente para estimar los valores de GSP. Estos resultados alertan sobre los peligros de impacto ambiental desfavorable de esta práctica de manejo de cultivo, en especial en este tipo de regiones en las que existen suelos con pendientes que pueden favorecer el escurrimiento superficial.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, BL & AP Mallarino. 2006. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 454-463.
- Axt, JR & MR Walbridge. 1999. Phosphate Removal Capacity of Palustrine Forested Wetlands and Adjacent Uplands in Virginia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1019-1031.
- Bache BW & EG Williams. 1971. A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci.* 22: 289-301.
- Barrow, NJ. 1983. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. *Journal of Soil Science* 34: 733-750.
- Barrow, NJ. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. *In: The Role of Phosphorus in Agricultura (eds. FE Khasawneh, EC Sample & EJ Kamprath)*, pp 333-359. ASA-CSSA-SSA, Madison, USA.
- Beauchemin, S; RR Simard & D Cluis. 1998. Form and concentration of phosphorus in drainage waters of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.* 25: 721-728.
- Börling, K; E Otabbong & E Barberis. 2004. Soil Variables for Predicting Potential Phosphorus Release in Swedish Noncalcareous. *Soils J. Environ. Qual.* 33: 99-106.
- Börling, K; E Otabbong & E Barberis. 2001. Phosphorus sorption in relation to soil properties in some cultivated Swedish soils. *Nutr. Cycling Agroecosyst* 59: 39-46.
- Burgos, JJ & A Vidal. 1951. Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Revista Meteoros* 1(1): 3-32. Buenos Aires.
- Casson, J P; DR Bennett; SC Nolan; BM Olson & GR Ontkean. 2006. Degree of Phosphorus Saturation Thresholds in Manure-Amended Soils of Alberta. *J. Environ. Qual.* 35: 2212-2221.
- Della Maggiora, AI; L Echarte; EE Suero & AI Irigoyen. 1998. Deficiencia de agua en los cultivos de maíz, girasol, soja y trigo en la localidad de Balcarce. Actas X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Congreso de la Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorología. Editadas en CD: 5 p. Brasilia, 26 a 30 de octubre de 1998.
- De Smet, JG; J. Hofman; M Vanderdeelen; Van Meirvenne & L Baert. 1996. Phosphate enrichment in the sandy loam soils of west Flanders, Belgium. *Fert. Res.* 43: 209-215.
- Doorenbos, J & WO Pruitt. 1997. Necesidade hídrica das culturas. Campina Grande: UFPB. 204 p.
- Henríquez, C. 2005. Sorción y desorción de fósforo en un andisol de Costa Rica dedicado al cultivo del café, caña de azúcar y bosque. *Agromía Costarricense* 29(3): 97-105.
- Hansen, NC; TC Daniel; AN Sharpley & JL Lemunyon. 2002. The fate and transport of phosphorus in agricultural systems. *J. Soil Water Conserv.* 57: 408-417.
- Hooda, PS; M Moynagh; IF Svoboda; M Thurlow; M Stewart & HA Anderson. 1997. Soil and land use effects on phosphorus in six streams draining small agricultural catchments in Scotland. *Soil Use Manage.* 13: 1996-204.
- McDowell, RW & Condon. 2004. Phosphorus loss from New Zealand grassland soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research.* Vol. 47: 137-145.
- McDowell, RW; AN Sharpley; P Brookes & P Poulton. 2001. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. *Soil Sci.* 166: 137-149. *Cycling Agroecosyst.* 59: 39-46.
- Mendoza, RE & L Marbán. 1990. Evaluación del fósforo residual en suelos fertilizados: comparación entre Bray I, Bay II, Olsen y Punto nulo (P en solución). *Ciencia del Suelo* Vol.8: 101-109.
- Mozaffari, PM & JTSims. 1994. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic Coastal Plain watershed dominated by intensive, animal-based agriculture. *Soil Sci.* 157: 97-107.
- Murphy, J & JP Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
- Pautler, MC & TJ Sims. 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware soils. *J. Soil Sci* 64: 765-773.
- Pierzynski, GM; W Richard; McDowell & Thomas Sims. 2005. Chemistry, Cycling, and Potential Movement of inorganic Phosphorus in soils. 3 Pp. 53-86. *In: ASA, CSSA, SSSA, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. Phosphorus: agriculture and the environment, Agronomy Monograph N° 46.*
- Pote, DH; TC Daniel; DJ Nichols; AN Sharpley; PA Moore Jr.; DM Miller & DR Edwards. 1999. Relationship between phosphorus levels in tree ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.* 28: 170-175.
- Pote, DH; Daniel Sharpley; AN Moore; PA Edwards; DR, & DJ Nichols. 1996. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 855-859.

- Reddy, KR; GA O'Connor & PM Gale. 1998. Phosphorus sorption capacities of wetland soils & stream sediments impacted by dairy effluent. *J. Environ. Qual.* 27: 438-447.
- Rodríguez, D & R Mendoza. 1993. Readsorption of phosphate by soil during acid and alkaline extractions. *Commun Soil Sci Plant Anal* 24: 133-147.
- Sample, EC; RJ Soper & GJ Racz. 1980. Reactions of phosphate fertilizer in soil. Ed Khasawneh FE, Sample EC, Kamprath EJ. The role of phosphorus in agriculture. ASA, CSSA, SSSA. Madison, pp 263-310.
- Saunders, WMH & EG Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *J. Soil Sci.* 6: 254-267.
- Schroeder, PD; DE Radcliffe; ML Cabrera & CD Belew. 2004. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus in runoff: Effects of soil series variability. *J. Environ. Qual.* 33: 1452-1463.
- Sharpley, AN; TC Daniel; J Sims; R Lemunyon; R Stevens & R Parry. 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication. 2nd ed. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-149,44pp.
- Sharpley, AN; TC Daniel; JT Sims & DH Pote. 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil Water Conserv.* 51: 160-166.
- Stevenson, FJ & MA Cole. 1999. Phosphorus. P. 279-329. *In: Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.* Wiley & Son, NY.
- Vadas, PA; PJA Kleinman; AN Sharpley & BL Turner. 2005. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: A single extraction coefficient for water quality modeling. *J. Environ. Qual.* 34: 572-580.
- Van der Zee; TM SEA & WH van Riemsdijk 1988. Model for long-term Phosphate Reaction Kinetics in Soil. *J Environ Qual.* 17: 35-41.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.