

## DOSIS ÓPTIMA ECONÓMICA DE FÓSFORO EN EL CULTIVO DE PAPA EN EL SUDESTE BONAERENSE

ESTER CRISTINA ZAMUNER<sup>1\*</sup>; JAUME LLOVERAS<sup>2</sup> & HERNÁN EDUARDO ECHEVERRÍA<sup>1</sup>

Recibido: 14-07-15

Recibido con revisiones: 23-09-15

Aceptado: 26-09-15

### RESUMEN

Asegurar una buena disponibilidad de fósforo (P) para el cultivo de papa, es tan importante como ajustar la estrategia de fertilización para producir el máximo rendimiento con la mayor eficiencia económica. El Avail®, aditivo que puede aplicarse como recubrimiento de fertilizantes fosforados, ha demostrado aumentar la eficiencia de uso en diversos cultivos, sin resultados consistentes en papa. Para el cultivo de papa en el sudeste bonaerense, se plantearon como objetivos: 1- Comparar el rendimiento a dosis diferentes de superfosfato triple de calcio sin (SFT) y con agregado del Avail® (SFT+ Avail®) y 2- establecer la dosis de fertilización fosforada que produce el máximo beneficio económico (DOE). Se realizaron nueve ensayos de fertilización fosforada (2005-14). Se determinó contenido de P en el suelo con los extractantes Bray1 y Mehlich3 y el rendimiento de papa. Se calculó la DOE para diferentes relaciones de precios fertilizante/tubérculo. La fertilización incrementó el rendimiento en todos los ensayos (44 y 52-69 Mg ha<sup>-1</sup> para el testigo y los tratamientos fertilizados, respectivamente. No se detectaron diferencias significativas en rendimiento debido al uso de diferentes fuentes de P (SFT o SFT+Avail®), para ninguna de las dosis evaluadas. Esta respuesta fue consistente en todos los ensayos a pesar que tenían contenidos diferentes de P extractable. La DOE determinada a partir de Bray1 o Mehlich3 fueron similares (R<sup>2</sup>=0,8). Este resultado fue consistente en todos los sitios con diferente P extraíble antes de la siembra. Para ambos extractantes, la DOE disminuyó con el aumento de la disponibilidad inicial de P según: DOE P (kg ha<sup>-1</sup>) = 176 -5 \*Bray1; 216 -6 \*Mehlich3. Si bien la disponibilidad de P en el suelo y la relación de precios afectaron la DOE, la primera fue el factor determinante para definir la dosis de fertilizante fosfatado adecuada para una producción rentable del cultivo de papa.

**Palabras clave.** Avail®; rendimiento; Bray; Mehlich.

### ECONOMIC OPTIMAL PHOSPHORUS RATE FOR POTATO CROP IN THE SOUTHEAST BUENOS AIRES PROVINCE

#### ABSTRACT

To ensure the phosphorus (P) availability in potato crop is as important as to adjust the fertilization strategy to achieve maximum yield with the greatest economic efficiency. Avail®, which is an additive that can be used to coat phosphorus fertilizers, was proven to increase P fertilizer efficiency in various crops, but without consistent results in potato. For potato crops in the Southeastern Buenos Aires, the objectives of this research were: 1- to compare potato yield at different rates of calcium triple superphosphate (TSP) with and without Avail® addition and, 2- to establish the phosphorus fertilization rate that produces the maximum economic benefit (DOE). Information of nine P fertilization trials (2005-14) were used. Bray1 and Mehlich3 tests were applied to soil samples taken before crop planting and total yield was determined. The DOE were calculated for different fertilizer/tuber price relationships. Fertilization increased yields with average values of 44 Mg ha<sup>-1</sup> for the unfertilized plots and 52-69 Mg ha<sup>-1</sup> for the fertilized treatments. There were no significant yield differences due to the use of different P sources (TSP or TSP +Avail®), for any of the tested rates. This result was consistent across all trials despite having different extractable P contents before planting. Determined DOE for Bray1 or Mehlich3 were similar (R<sup>2</sup>=0, 8). For both extractants, the DOE decreased with increasing P availability, specifically: DOE P (kg ha<sup>-1</sup>) = 176 - 5\*Bray1; 216 - 6\*Mehlich3. Even though both soil P availability and price relationships affected the DOE, the first was the determining factor to define the suitable phosphorus fertilizer rate for cost-effective production of potato crops.

**Key words.** Avail®; yield; Bray; Mehlich.

1 Facultad de Ciencias Agrarias- Universidad Nacional de Mar del Plata.

2 Agrotecnio Center, University of Lleida (UdL).

\*Autor de contacto: zamunerester@inta.gov.ar

## INTRODUCCIÓN

Los 290 millones de toneladas de producción mundial de papa (*Solanum tuberosum* L.) la convierten en uno de los principales cultivos después del trigo, el maíz y el arroz (FAOSTAT, 2010). La planta de papa se caracteriza por tener una menor densidad y longitud de raíces que el arroz, trigo, soja y remolacha azucarera (Iwama, 2008). La densidad máxima de raíces ocurre durante el inicio de tuberización (40-49 días después de la siembra), mientras que el 60-70% del fósforo (P) es absorbido después de ese período, por lo que una adecuada nutrición durante la tuberización y llenado de los tubérculos es especialmente importante en este cultivo para lograr una elevada producción agrícola.

La gran demanda de nutrientes del cultivo y el bajo nivel de P disponible de la mayoría de los suelos de la Región Pampeana Argentina (< 10 mg kg<sup>-1</sup>; Sainz Rozas *et al.*, 2012), hacen que sea necesaria la aplicación de fertilizantes fosforados para obtener altos rendimientos. Cuando el fertilizante es agregado al suelo, los iones fosfato reaccionan con cationes formando compuestos de baja solubilidad, haciendo que el P sea poco móvil en la mayoría de los suelos y que las raíces de la plantas deban crecer activamente para interceptarlo y absorberlo (Hopkins *et al.*, 2014). La empresa Specialty Fertilizer Products ha desarrollado y patentado un copolímero dicarboxílico de alta densidad de carga denominado Avail®, que puede aplicarse como un recubrimiento a los fertilizantes granulados o mezclarse en los fertilizantes líquidos. El polímero acompleja los cationes polivalentes metálicos de la solución del suelo y de esta manera aumenta la disponibilidad de iones fosfato para el cultivo (Sanders *et al.*, 2012). Los resultados con varios cultivos no son consistentes, ya que hay investigaciones que reportan incrementos de rendimiento en papa, maíz, soja y remolacha asociados al uso del recubrimiento con el polímero (Gordon & Courtland, 2007; Repking & Laboski 2008; Hopkins *et al.*, 2010), mientras que otras informan que no hay diferencia respecto al uso del fertilizante sin recubrir (Repking & Laboski, 2007; Osmond *et al.*, 2008; Ward, 2010; Dudenhoeffer *et al.*, 2012). Para los suelos del sudeste bonaerense no se han reportado trabajos que evalúen el uso de AVAIL® como recubrimiento de fertilizantes fosforados sobre el rendimiento del cultivo de papa.

La metodología más difundida de diagnóstico de requerimiento de fertilización fosforada, se basa en la determinación del contenido de P extractable en el suelo (0-20 cm) al momento de la siembra y el objetivo de rendimiento

(Echeverría & Giletto, 2015). En la actualidad, para el análisis de suelo se utiliza en sudeste Bonaerense el método de Bray & Kurtz 1 (Bray 1), que es un extractante específico de P. Más recientemente, se ha propuesto el uso de soluciones extractoras denominadas "universales" como Mehlich 3, con las cuales puede hacerse una evaluación más completa del suelo sin incrementar la complejidad del análisis. Además, Mehlich 3, es propuesto como un buen método desde el punto de vista agro ambiental a la vez que predecir la respuesta en rendimiento del cultivo de papa (Khiari & Parent, 2000; Maguire & Sims, 2002; Sims *et al.*, 2002).

El umbral de concentración de P en el suelo definido hasta el momento para el cultivo de papa, es el valor que corresponde a la disponibilidad necesaria para obtener la máxima producción física, cuando los otros nutrientes o factores de producción se encuentran en un nivel adecuado. El umbral o nivel crítico también puede definirse como el valor de la concentración de P en el suelo que corresponde a la disponibilidad necesaria para obtener la producción de máxima eficiencia económica. Hobbs (2003) señala que los resultados de un estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) revela que uno de los factores que impulsan la producción agrícola con buenas prácticas de manejo (entre ellas la fertilización adecuada) es el incentivo económico, que incluye el incremento o estabilización de las ganancias y la reducción en los costos (Gonzalez & Rodriguez, 2011). Por esta razón, es necesario generar información que permita ajustar la estrategia de fertilización para producir el máximo rendimiento con la mayor eficiencia económica.

Para el cultivo de papa en el sudeste bonaerense, se plantean como objetivos: 1- comparar el rendimiento cuando se utilizan distintas dosis de superfosfato triple de calcio (SFT) con y sin agregado de Avail® y 2- establecer la dosis de fertilización fosforada que produce el máximo beneficio económico.

## MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó entre 2005 y 2014 con información procedente de 9 ensayos de fertilización fosfatada en papa que manifestaron respuesta al agregado de P en el sudeste de la región pampeana. Los suelos sobre los que se llevaron a cabo los ensayos fueron Argiudoles típicos (USDA-NRCS, 2014), sin limitaciones para el uso agrícola y con un amplio rango de concentración de P extractable Bray 1 y Mehlich 3 (Sims, 2009) previo

a la siembra. Algunas características edáficas y de cultivo se muestran en la Tabla 1. Las temperaturas durante la estación de crecimiento fueron favorables para el desarrollo de la papa, con temperaturas medias mensuales levemente inferiores (-0,8 °C) al promedio histórico del período 1980-2014 (19,1 °C). Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron, en promedio, 107 mm superiores a la media histórica de 508 mm para el período 1980-2014 (Tabla 2).

La preparación del suelo se realizó de acuerdo a la modalidad de la zona, utilizando cincel y rastra de discos, previo a la plantación. En cada sitio experimental, los tratamientos consistieron en diferentes dosis de P (Tabla 2), que se repitieron por triplicado en un diseño de bloques completos al azar. Las parcelas tuvieron un tamaño de 102 m<sup>2</sup> (12 surcos de 10 m de longitud distanciados 0,85 m). Como fuente de P, se utilizó superfosfato triple de calcio (SFT) aplicado manualmente en bandas en la siembra e incorporado inmediatamente. En las campañas 2009/10, 2010/11 y 2012/13, además del SFT se utilizó SFT recubierto con Avail® (SFT+Avail®). El SFT+Avail® se preparó siguiendo las recomendaciones del proveedor (210 mL de Avail® cada 100 kg de SFT). Para evitar la deficiencia de nitrógeno se aplicó urea [(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO] de acuerdo con el siguiente esquema: 120 kg ha<sup>-1</sup> 20-30 días antes de la siembra, 100 kg ha<sup>-1</sup> durante la siembra y 100 kg ha<sup>-1</sup> al aporque. Para asegurar el suministro hídrico se regó por aspersión a partir del momento crítico del cultivo (45-50 días después de plantación) añadiendo aproximadamente 20 mm de agua cada 5-7 días. El control de malezas se realizó con aplicaciones químicas y métodos mecánicos (aporque). Cada productor usa productos químicos diferentes, sin embargo el esquema de control de plagas, enfermedades incluye la aplicación de un herbicida antes de la plantación que se incorpora usando una rastra de discos. Luego de la plantación, se aplican herbicida

de pre-emergencia para controlar malezas de hoja ancha. Los insecticidas y fungicidas se aplican sistemáticamente (una vez por semana) pulverizando una vez que la planta alcanza una altura de unos 15 cm. Las enfermedades que aparecen normalmente en los cultivos de papa, tales como *Alternaria solani* y *Phytophthora infestans*, se controlan con productos sistémicos y de contacto en dosis variables en función del grado de la enfermedad. El fungicida sistémico más utilizado fue Mancozeb [(C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>MnN<sub>2</sub>S<sub>4</sub>)x(Zn)y], y el fungicida de contacto fue Clorotalonil (C<sub>8</sub>Cl<sub>4</sub>N<sub>2</sub>).

A la madurez del cultivo, y una semana después de producir la desecación del cultivo con Paraquat (C<sub>12</sub>H<sub>14</sub>Cl<sub>2</sub>N<sub>2</sub>), se cosecharon manualmente dos metros de cada uno de los 2 surcos centrales en cada unidad experimental y se estimó el rendimiento en peso fresco (Mg ha<sup>-1</sup>).

En cada ensayo, se ajustó el modelo cuadrático-meseta para relacionar el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) con la dosis de P (kg ha<sup>-1</sup>).

$$y = \alpha + bx + cx^2 \quad x < C \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$y = P \quad x > C \quad (\text{Ecuación 2})$$

La Ecuación 1, se utilizó cuando el P extractable (x) es menor al valor crítico (C), situaciones donde hay repuesta a un aumento en la disponibilidad de P. La Ecuación 2, representa las situaciones donde el P extractable (x) es mayor o igual al valor crítico (C) y sin variaciones de rendimiento debido al agregado de P.

Para la determinación de la dosis óptima económica (DOE) esto es, la dosis de P que produce el máximo beneficio económico, se igualó la derivada primera de cada curva de pro-

Tabla 1. Algunas características edáficas (0-20 cm) de los sitios experimentales, previo a la siembra del cultivo de papa.  
Table 1. Some soil characteristics (0-20 cm) before potato planting for the individual experimental sites.

Sitio	Estación de crecimiento	P extractable inicial <sup>a</sup>		pH <sup>b</sup>	Materia orgánica <sup>c</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-d</sup>
		Bray1	Mehlich3		g 100 g <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
		mg kg <sup>-1</sup>				
1	2005/06	19,3 ± 3,0	18,9 ± 2,5	6,2 ± 0,1	5,2 ± 0,1	39,2 ± 3,3
2	2008/09	15,4 ± 1,3	15,7 ± 2,0	5,8 ± 0,1	5,2 ± 0,1	114,8 ± 6,6
3	2008/09	14,5 ± 1,4	15,0 ± 1,3	5,8 ± 0,1	5,2 ± 0,1	110,4 ± 4,8
4	2009/10	22,1 ± 2,0	21,1 ± 1,9	6,1 ± 0,1	5,4 ± 0,1	38,5 ± 2,5
5	2010/11	8,6 ± 0,9	10,3 ± 1,0	6,2 ± 0,1	5,4 ± 0,1	11,7 ± 1,1
6	2012/13	11,1 ± 1,1	11,7 ± 0,7	6,6 ± 0,1	3,8 ± 0,1	55,0 ± 5,1
7	2013/14	20,0 ± 1,8	18,6 ± 1,7	5,9 ± 0,2	6,5 ± 0,1	28,5 ± 1,5
8	2013/14	19,0 ± 2,3	19,4 ± 1,5	6,0 ± 0,2	5,0 ± 0,2	18,3 ± 2,4
9	2013/14	19,1 ± 1,5	18,7 ± 2,0	6,0 ± 0,1	5,6 ± 0,1	13,4 ± 1,6

<sup>a</sup>Sims (2009); <sup>b</sup>Relación suelo:agua 1:2,5; <sup>c</sup>Walkley & Black (1934); <sup>d</sup>Bremner (1965), profundidad 0-60 cm ± representa el Desvío Standard.

Tabla 2. Información de condiciones climáticas y prácticas de manejo de cada sitio experimental.

Table 2. Climatic conditions and management practices for individual experimental sites.

Sitio	Cultivo antecesor <sup>a</sup>	Fecha de		Temperatura <sup>b</sup> °C	Precipitación <sup>b</sup> mm	Fertilización <sup>c</sup>	
		Plantación	Cosecha			SFT	SFT+Avail®
						kg P ha <sup>-1</sup>	
1	Pastura	10/20/05	03/13/06	17,4	530	0,25,50,100	
2	Pastura	11/05/08	03/11/09	17,4	628	0,25,50,100	
3	Papa	10/24/08	02/24/09	17,4	586	0,25,50,100	
4	Trigo/soja	11/01/09	03/02/10	18,6	758	0,25,50,100	25,50
5	Pastura	11/12/10	03/30/11	18,9	642	0,25,50,100	25,50
6	Papa	11/01/12	03/05/13	18,6	705	0,25,50,100	25,50,100
7	Soja	11/08/13	04/15/14	18,6	561	0,25,50,100,150,200	
8	Trigo/soja	11/07/13	04/11/14	18,6	561	0,25,50,100,150,200	
9	Girasol	11/20/13	04/10/14	18,6	561	0,25,50,100,150,200	

<sup>a</sup>Pastura (*Bromus* sp., *Stipa* sp., *Lolium multiflorum*, *Lotus tenuis*, *Paspalum dilatatum*); Soja (*Glycine max*), Papa (*Solanum tuberosum* L.), Trigo (*Triticum aestivum*), Girasol (*Helianthus annuus*); <sup>b</sup>Temperatura media del aire y precipitación durante la estación de crecimiento; <sup>c</sup>Superfosfato triple de calcio (SFT) y SFT recubierto con Avail® (SFT+Avail®).

ducción a diversas relaciones de precios (Belanger, 2000), calculadas según la Ecuación 3.

$$\text{Relación de precios} = \frac{\text{Precio P (US\$ kg}^{-1} \text{ P)}}{\text{Precio tubérculo (US\$ kg}^{-1} \text{)}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

El precio máximo, mínimo y mediana del SFT desde mayo de 2005 hasta agosto de 2014 fue 1,131,0,178 y 0,355, US\$ kg<sup>-1</sup> (<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=triple-superphosphate;04/09/2015>) todos los valores en dólares de los EE.UU. Para calcular el "Precio P" en la Argentina se consideró el contenido de P del fertilizante (20%) y se incrementó el precio del fertilizante un 20% respecto al registrado en USA (Márgenes agropecuarios 2005-2014). El "Precio tubérculo" representa el ingreso real recibido por el agricultor por la venta del tubérculo fresco. González y Rodríguez (2011) informan que los precios promedio mensuales de papa a nivel mayorista, ajustados por el Índice de Precios Internos Mayoristas Nivel General, estimado por el INDEC varió entre 0,1 y 0,3 US\$ kg<sup>-1</sup>, siendo el valor de la mediana 0,25 US\$ kg<sup>-1</sup>. Se consideró que los costos adicionales representaron un aumento de la relación de precios de un 20%. Se calculó la relación de precios para años considerados favorable (el menor precio de P y el mayor precio de tubérculo), desfavorables (el mayor precio de P y el menor precio de tubérculo) y promedio (la mediana de precio de P y de tubérculo).

### Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el Sistema de Análisis Estadístico (SAS 9.1, 2002). En cada sitio experimental se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) del

rendimiento en función de la dosis de P aplicada, para un diseño en bloques completos aleatorizados. El test de Fisher de diferencias mínimas significativas ( $DMS_{0,05}$ ) fue usado para probar la significancia de las diferencias de rendimiento observadas. Se compararon los rendimientos de los tratamientos SFT y SFT+Avail® a través de contrastes ortogonales ( $p < 0,05$ ). Las ecuaciones de los modelos cuadrático-meseta empleados para describir la relación entre el rendimiento y la dosis aplicada en cada sitio experimental, fueron obtenidas con el procedimiento no-lineal (PROC NLIN) para modelos segmentados. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fueron calculados del análisis de varianza provisto por SAS. Los parámetros de los modelos lineales utilizados para relacionar el P extractable previo a la siembra con la DOE se obtuvieron con el procedimiento lineal (LIN).

### RESULTADOS y DISCUSIÓN

Los rendimientos con aplicaciones de SFT variaron entre 31 y 76 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabla 3). Estos valores son similares a los presentados por Caldiz (2006) para cultivos de la región, con rendimientos promedio de 40 Mg ha<sup>-1</sup> y máximos de 70 Mg ha<sup>-1</sup>. La fertilización con la mayor dosis de P (200 kg P ha<sup>-1</sup>) produjo un incremento promedio en el rendimiento de 24 Mg ha<sup>-1</sup>, con respecto al testigo sin P lo que representa 15% mayor que el testigo. Los rendimientos de papa utilizando SFT y SFT+Avail® como fuentes fosforadas, se muestran en la Tabla 4. Los resultados ponen en evidencia que no hubo diferencias significativas en rendimiento debido al uso de diferentes fuentes de P, para ninguna de las dosis evaluadas. Esta respuesta fue con-

Tabla 3. Rendimiento en peso fresco de cultivos de papa fertilizados con superfosfato triple de calcio (SFT).  
Table 3. Fresh weight yield of potato crops fertilized with calcium triple superphosphate (SFT).

Sitio	Promedio de rendimiento <sup>a</sup>						Pr > F
	0	25	50	100	150	200	
	Mg ha <sup>-1</sup>						
1	49,1 c	55,5 bc	62,8 ab	69,7 a	-	-	0,002
2	30,6 b	41,1 a	42,0 a	47,8 a	-	-	0,004
3	54,1 c	59,2 b	67,2 ab	75,3 a	-	-	0,021
4	37,1 b	39,9 b	43,9 a	45,9 a	-	-	0,043
5	44,7 b	64,4 a	65,7 a	73,5 a	-	-	0,002
6	49,4 c	53,6 bc	64,0 b	67,5 b	-	75,5 a	0,036
7	63,7 b	64,5 ab	70,8 ab	77,2 ab	81,2 a	75,5 a	0,043
8	43,5 c	50,4 bc	54,2 abc	57,2 ab	60,7 ab	65,1 a	0,049
9	46,9 c	51,5 bc	55,0 bc	57,9 ab	65,4 a	62,9 a	0,041
Promedio	44,3	51,9	56,8	61,8	63,0	67,8	

<sup>a</sup>Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ( $p > 0,05$ ), de acuerdo al test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS).

Tabla 4. Rendimiento promedio en peso fresco del cultivo de papa fertilizado con 25, 50 o 100 kg P ha<sup>-1</sup>, utilizando superfosfato triple de calcio (SFT) o SFT+Avail® como fuentes de P.

Table 4. Mean fresh weight yield of the potato crop fertilized with 25, 50 or 100 kg P ha<sup>-1</sup> using calcium triple superphosphate (SFT) or SFT + Avail® as P sources.

Tratamiento	Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )		
	Sitio		
	4	5	6
25-SFT	39,85 ± 1,94	64,40 ± 2,19	53,62 ± 1,19
25- SFT+Avail®	42,03 ± 2,94	62,42 ± 5,54	57,81 ± 3,81
50-SFT	43,92 ± 4,93	65,71 ± 3,65	63,94 ± 5,00
50- SFT+Avail®	45,22 ± 4,63	66,23 ± 4,94	64,23 ± 2,29
100-SFT	-	-	67,51 ± 3,27
100- SFT+Avail®	-	-	67,71 ± 4,08
CONTRASTES	Pr > F		
25-SFT vs 25- SFT+Avail®	0,4035	0,1985	0,8077
50-SFT vs 50- SFT+Avail®	0,5558	0,8696	0,9527
100-SFT vs 100- SFT+Avail®	-	-	0,9676

<sup>a</sup>Promedio de rendimiento entre tratamientos con igual dosis de P y diferente fertilizante; ± representa el Desvío Standard

sistente en todos los sitios evaluados a pesar que tenían contenidos variables de P extractable previo a la plantación (Tabla 1).

Ciampitti *et al.* (2011) cuantificaron los cambios en fracciones de P en suelos neutros a ligeramente ácidos de la región pampeana. Determinaron que la fertilización fosfatada aumenta todas las fracciones inorgánicas de P (especialmente la más soluble e inmediatamente inter-

cambiable, y la unidas al Ca y minerales del suelo), probablemente debido a que los suelos pampeanos poseen una alta saturación de bases y porcentaje de Ca intercambiable. Con el objetivo de determinar la razón por la cual no hubo efecto significativo del uso de SFT + Avail®, se presentan algunas consideraciones teóricas. Teniendo en cuenta que la CIC de los suelos estudiados es en promedio de 17 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, y que un 55% de la CIC está ocupada por Ca, se calculó

que la cantidad teórica de este catión que podría intercambiar el suelo es de  $9,35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Luego, tomando como base la CIC del Avail® ( $1800 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ; Chien *et al.*, 2014), y la cantidad del mismo agregada por cada 100 kg de SFT (210 mL, densidad:  $1,3 \text{ g mL}^{-1}$ ) se calculó que la cantidad de Ca que podría ser secuestrada por el Avail® es de  $1,1 \times 10^{-6} \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , para la dosis de fertilización de  $100 \text{ kg P ha}^{-1}$ . Por lo tanto, la cantidad de Avail® agregada sería insuficiente para producir un cambio importante en la reacción del P con el Ca del suelo y mejorar la eficiencia de uso del SFT (Osmond *et al.*, 2008; Ward, 2010). Otro factor que afecta la fijación del P en el suelo es el contenido de materia orgánica, ya que los aniones orgánicos compiten con el P en los sitios de sorción y forman quelatos con el Fe y Al, resultando en una menor retención del P. Saunders *et al.* (2012) muestran resultados de campo que evidencian que el uso de Avail® es efectivo aun en suelos con alto contenido de materia orgánica, donde se podría enmascarar el efecto del polímero. Sin embargo, no hay suficiente información que permita esclarecer el me-

canismo de acción de esta tecnología en suelos neutros y con alto contenido de materia orgánica.

El costo de la fertilización con SFT para el año promedio (costo del fertilizante  $0,426 \text{ US\$ kg}^{-1}$ ) y una dosis de  $100 \text{ kg P ha}^{-1}$ , es de  $213 \text{ US\$ ha}^{-1}$ . El recubrimiento del SFT con Avail® incrementa el costo del SFT en  $0,07 \text{ US\$ kg}^{-1}$  de SFT. Por lo tanto, el agregado del polímero incrementa el costo de la fertilización un 16% sin aumentar, en nuestros ensayos, el rendimiento significativamente. Como consecuencia de este resultado, se utilizó el valor de rendimiento obtenido con SFT en el cálculo de la DOE. La relación entre la dosis de P y el rendimiento, en cada sitio experimental, fue caracterizada con un modelo cuadrático-meseta (Tabla 5), ya que este modelo permite evaluar tanto la respuesta física como la económica a la fertilización con resultados más racionales desde el punto de vista agronómico respecto a otros modelos (Pagani *et al.*, 2008; Barbieri *et al.*, 2009; Steinbach, 2012). Todas las regresiones fueron significativas ( $P < 0,05$ ) y explicaron una alta proporción de la varia-

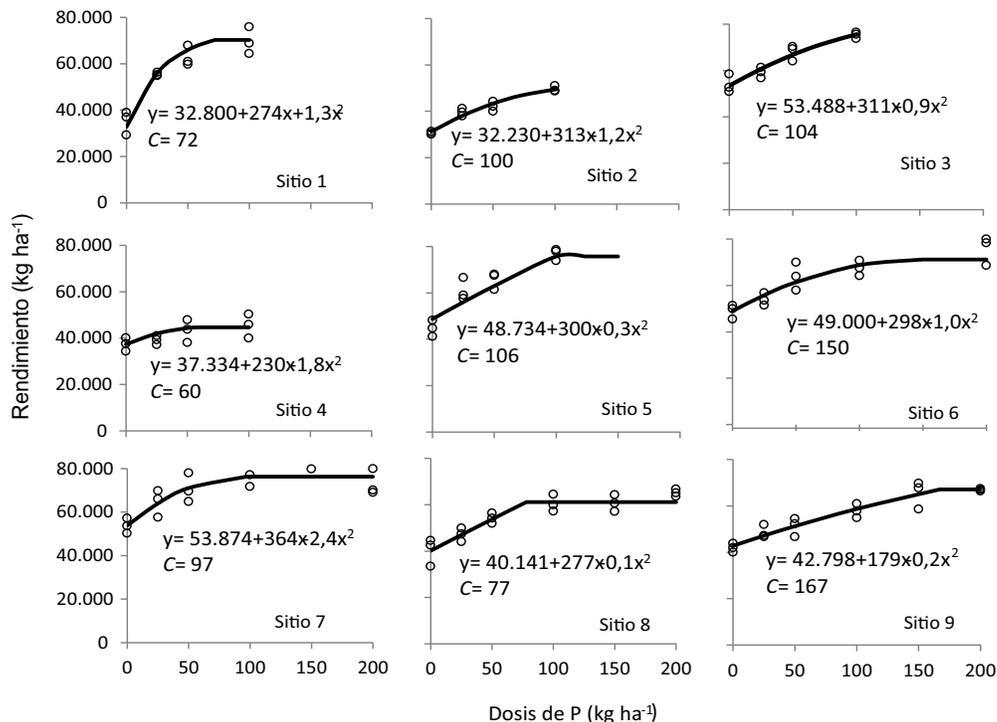


Figura 1. Ecuación cuadrática que relaciona rendimiento y dosis de P, para cada sitio experimental. Ecuaciones de ajuste aplicable a los valores de dosis de P menores a la intersección con el valor crítico (C).  
Figure 1. Quadratic adjustment functions of yield versus P rate for each experimental site. Equations applicable to P rate values less to the intersection with the critical value (C).

bilidad, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) mayores a 0,8 en la mayoría de los casos.

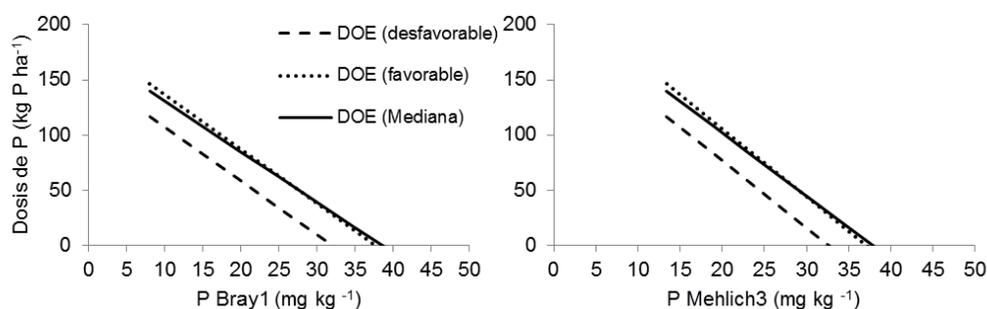
A partir de la ecuación cuadrática que relacionó rendimiento y dosis de P (Fig. 1) se obtuvo la DOE para cada sitio experimental y relación de precios. Finalmente se estableció la relación entre el P extractable inicial (Bray1 o Mehlich3) como variable independiente y la DOE como variable dependiente (Fig. 2). Esta Figura permite, partiendo de la concentración de P extractable en el suelo previo a la siembra del cultivo, obtener la DOE para la relación de precios seleccionada. Los resultados mostraron que en la medida que la disponibilidad inicial de P, evaluada mediante Bray1 o Mehlich3 y la relación de precios disminuyen, la dosis de fertilizante para obtener el máximo beneficio económico se incrementa. Las DOE determinadas a partir de Bray1 o Mehlich3 estuvieron significativamente correlacionadas ( $R^2=0,8$ ;  $P<0,001$ ), dada la asociación lineal y significativa entre ambas técnicas analíticas (Atia & Mallarino, 2002; Zamuner *et al.*, 2006; Zamuner *et al.*, 2015). La relación entre la DOE (y) y el P extractable (x) en la mayoría de los años (mediana) fue: dosis de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) =  $176 - 5 * \text{Bray1}$ ;  $216 - 6 * \text{Mehlich3}$ .

La DOE para la relación de precios más frecuente (mediana) fue muy próxima a la DOE cuando la relación de precios es favorable. Por ejemplo, cuando la concentración de Bray1 previo a la siembra es  $20 \text{ mg kg}^{-1}$ , la DOE es  $85$  y  $87 \text{ kg ha}^{-1}$  para la mediana y años favorables, respectivamente. Esto se repite para los dos extractantes evaluados. En general, con los cultivos de alto valor, como la papa, el precio de los fertilizantes tiene menos impacto en la DOE que para los cultivos con un menor valor. Así, en la ma-

yoría de las situaciones la utilización de la función de relación de precios correspondiente a la mediana, será la que presente resultados económicamente más convenientes y solo en situaciones muy desfavorables la dosis de fertilización fosfatada debería reducirse (para Bray1 =  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  la DOE es  $60 \text{ kg ha}^{-1}$ ) para obtener el máximo beneficio económico (Fig. 2). Los costos de producción y comercialización de papa en el sudeste de la provincia de Buenos Aires indican que el gasto en papasemilla es el factor de mayor peso relativo dentro de los costos totales (González & Rodríguez, 2011), mientras que la fertilización representa una baja proporción (aproximadamente 8%) del costo total de producción (Constantino, 2005). El carácter fundamentalmente doméstico del mercado de papa, la estacionalidad de los precios, la baja elasticidad de la demanda y el bajo nivel de comercio exterior de la producción hacen que los precios sean notoriamente sensibles a las variaciones en la producción (Mosciano, 2009). Por lo tanto, la expectativa del nivel de precio de venta de la producción será el mayor determinante de la selección de la dosis de P a aplicar. De todas maneras, la elección de una u otra estrategia forma parte del contexto, racionalidad y filosofía de cada productor.

## CONCLUSIONES

El rendimiento de papa se incrementó con la fertilización fosfatada, sin embargo no se obtuvieron ventajas debidas al recubrimiento del SFT con Avail®. Por lo tanto, en el cultivo de papa bajo riego el uso de Avail® no se muestra como una innovación prometedora en suelos del sudeste bonaerense.



DOE desfavorable: Relación de precios = 81; DOE favorable: Relación de precios = 0,04; DOE mediana: Relación de precios = 10.

Figura 2. Dosis de P para máximo beneficio económico (DOE) calculada para diferentes relaciones de precios (P/papa) y fósforo (P) extractable en el suelo previo a la siembra del cultivo de papa con diferentes metodologías (Bray1 y Mehlich3).

Figure 2. P rate for maximum economic benefits (DOE) calculated with different prices ratios (P/ potato) and extractable soil phosphorus (P) previous to planting the potato crop (Bray1 and Mehlich3).

En la medida que la disponibilidad inicial de P, evaluada mediante Bray1 o Mehlich3 y la relación de precios (fertilizante/tubérculo) disminuyen, la dosis de fertilizante para obtener el máximo beneficio económico se incrementa. Si bien ambas variables, afectan la DOE de fertilizante, la disponibilidad de P en el suelo previo a la siembra es el factor determinante para definir la dosis de fertilizante fosfatado en el cultivo de papa.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo presenta resultados parciales del Trabajo de Tesis de Doctorado (Universitat de Lleida) de la Ing. Agr. Ester Zamuner y fue financiado con fondos del proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Mar del Plata AGR 447/14 e INTA PN Suelo.

### 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.
- Barbieri, PA; HE Echeverría & HR Sainz Rozas. 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ci. Suelo* 27: 115-125.
- Belanger, G; JR Walsh; JE Richards; PH Milburn & N Ziadi. 2000. Comparison of Three Statistical Models Describing Potato Yield Response to Nitrogen Fertilizer. *Agron. J.* 92: 902-908.
- Berenson, ML; DM Levine & M Goldztein. 1983. Intermediate statistical methods and application. Prentice-Hall, Inc.
- Caldiz, DO. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. McCain Argentina SA, Balcarce-BASF Argentina SA, Capital Federal. Argentina. 226 p.
- Chien, SH; D Edmeades; R McBride & KL Sahrawat. 2014. Review of Maleic-Itaconic Acid Copolymer Purported as Urease Inhibitor and Phosphorus Enhancer Soils. *Agron. J.* 106: 423-430.
- Costantino, S. 2005 Costo de producción de papa. Disponible en <http://www.biblioteca.org.ar/libros/210319.pdf> 04/09/2015
- Dudenhoefter, CJ; KA Nelson; PP Motavalli; D Dunn; WE Stevens; KW Goynes; N Manjula & P Scharf. 2012. Corn production as affected by phosphorus enhancers, phosphorus source and lime. *Journal of Agricultural Science* 4 :137.
- Echeverría, HE; & CM Giletto. 2015. Papa. En: HE Echeverría y FO García (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos, 585-608. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Gonzalez, J & E Rodríguez. 2011. Limitantes para la implementación de buenas prácticas agrícolas en la producción de papa en argentina. *Agroalimentaria* 17: 63-84.
- Gordon, WB & KS Courtland. 2007. Management of enhanced efficiency fertilizers. In: *Proceedings, North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference* Vol. 37: 14-15.
- Hobbs, J. 2003. Incentives for the adoption of good agricultural practices. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ag854e/ag854e00.pdf>. 04/09/2015
- Hopkins, BG; JW Ellsworth; TR Bowen; AG Cook; SC Stephens; AK Shiffler & D Eggett. 2010. Phosphorus fertilizer timing for Russet Burbank potato grown in calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 33: 529-540.
- Hopkins, BG; DA Horneck & AE Mac Guidwin. 2014. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension. *American Journal of Potato Res.* 91: 161-174.
- Iwama, K. 2008. Physiology of the Potato: New Insights into Root System and Repercussions for Crop Management. *Potato Res.* 51: 333-353.
- Karamanos, RE & DPuurveen. 2011. Evaluation of a polymer treatment as enhancer of phosphorus fertilizer efficiency in wheat. *Can. J. Soil Sci.* 91: 123-125.
- Khari, L & LE Parent. 2000. An agri-environmental model for potato phosphorus recommendations. *Better Crops.* 84: 16-17.
- Maguire, RO & JT Sims. 2002. Measuring Agronomic and Environmental Soil Phosphorus Saturation and Predicting Phosphorus Leaching with Mehlich 3. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 2033-2039
- Márgenes agropecuarios. 2005-2014. <http://www.margenes.com/04/09/2015>
- Mosciaro, M. 2009. Caracterización de la Producción y Comercialización de Papa en Argentina. Área de Economía y Sociología Rural EEA - INTA Balcarce.
- Osmond, D; C Crozier; J Dunphy; K Edminsten; L Fisher; R Heiniger; R Weisz & D Hardy. 2008. Caroline Cotton Notes. Testing New Fertilizers and Fertilizer Additives. <http://www.cotton.ncsu.edu/ccn/2008/may20b.html>.
- Pagani, A; HE Echeverría; HR Sainz Rozas & PA Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ci. Suelo* 26(2): 183-193.
- Repking, MJ & CAM Laboski. 2007. Effects of phosphorus fertilizer rate, timing, and addition of fertilizer enhancer on potato yield and quality. In: 2007 A-C-S Annual Meeting Abstracts. Madison.
- Repking, MJ & CAM Laboski. 2008. Effectiveness of Avail for improving potato yield. In: Proceedings of the 2008 Wisconsin Fertilizer, Aglime & Pest Management Conference, 47th, pp. 133-142. Madison, WI: University of Wisconsin. Disponible en [http://www.soils.wisc.edu/extension/wcmc/2008\\_04/09/2015](http://www.soils.wisc.edu/extension/wcmc/2008_04/09/2015)
- 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.
- Sainz Rozas, H; M Eyherabide; HE Echeverría; P Barbieri; H Angelini; GE Larrea; GN Ferraris & M Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Simposio fertilidad 2013: 62-73. Disponible en: <http://www.fertilizar.org.ar/subida/evento/Simposio%20de%20Fertilidad%202013/SainzRozas.pdf>. 04/09/2015
- Sanders, JL; LS Murphy; A Noble; RJ Melgar & J Perkins. 2012. Improving Phosphorus use Efficiency with Polymer Technology. *Procedia Engineering* 46: 178-184.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release version 9.0. SAS Inst., Cary, NC.
- Sims, JT. 2009. Soil Test Phosphorus: Principles and Methods In Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residual and waters. JL Kovar & GM Pierzynski (eds). Second Edition. Southern Cooperative Series Bulletin No. 408.

- Sims, JT; RO Maguire; AB Leytem; KL Gartley & MC Pautler. 2002. Evaluation of Mehlich 3 as an Agri-Environmental Soil Phosphorus Test for the Mid-Atlantic United States of America. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 2016-2032.
- Steinbach, HS. 2012. Funciones de producción. En: Álvarez, R; P Prystupa; MB Rodrigues & C Álvarez. (ed). Fertilización de cultivos y pasturas Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. 1ª edición. Pp: 65-75. Editorial Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires. Argentina. 623 p.
- USDA-NRCS (USDA-NRCS Soil Survey Staff). 2014. Keys to Soil Taxonomy. 362 p. file:///C:/Users/zamuner.ester/Downloads/2014\_Keys\_to\_Soil\_Taxonomy.pdf. 04/09/2015.
- Ward, NC. 2010. Impact of avail and jumpstart® on yield and phosphorus response of corn and winter wheat in Kansas. Thesis for the degree Master of Science Department of Agronomy. College of Agriculture. Kansas State University. Manhattan, Kansas. <http://krex.k-state.edu/>. 04/09/2015
- Zamuner, EC; LI Picone & HE Echeverría. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. *Soil Tillage Res.* 89: 70-77.
- Zamuner, EC; J Lloveras & HE Echeverría. 2015. Métodos agronómicos y ambientales de determinación de fósforo en Argiudoles del sudeste bonaerense. *Ci. Suelo* 33(1): 55-63.

