



Universitat de Lleida

Evaluación agroambiental de la fertilización y nutrición fosfatada en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.)

Ester Cristina Zamuner

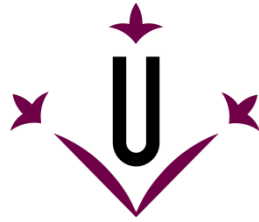
<http://hdl.handle.net/10803/399577>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

UNIVERSITAT DE LLEIDA
ESCOLA TECNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA



TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN AGROAMBIENTAL DE LA
FERTILIZACIÓN Y NUTRICIÓN FOSFATADA
EN EL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.)**

i

Ester Cristina Zamuner

Balcarce (Argentina), Abril 2016

**EVALUACIÓN AGROAMBIENTAL DE LA
FERTILIZACIÓN Y NUTRICIÓN FOSFATADA
EN EL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.)**



ii

Ester Cristina Zamuner

Ingeniera Agrónoma y Magíster Scientiae en Producción Vegetal - Universidad Nacional
de Mar del Plata (Argentina)

Facultad de Ciencias Agrarias – Cátedras de Introducción a la Química y Química
Analítica general – Departamento de Introducción a las Ciencias Agrarias – Facultad de
Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata

Lleida, Mayo 2016

UNIVERSITAT DE LLEIDA
ESCOLA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA

**EVALUACIÓN AGROAMBIENTAL DE LA
FERTILIZACIÓN Y NUTRICIÓN FOSFATADA
EN EL CULTIVO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.)**

Memoria de la tesis presentada por Ester Cristina Zamuner
Para optar al grado de Dr. en Ciencia y Tecnología Agraria
por la Universitat de Lleida (España)

iii

Dirigida por el Dr. Jaume Lloveras Vilamanyà
ETS d'Enginyeria Agrària de Lleida
y el Ing. Agr. (Ms Sc) Hernan E. Echeverría
Profesor Titular de la cátedra Edafología Agrícola –
Departamento de Producción Vegetal, Suelos e Ingeniería Rural –
Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina)

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento, a todas las personas que colaboraron en la realización de este trabajo:

A Hernán Echeverría, porque desde lo profesional, me facilito todo lo necesario para poder completar la tarea. Pero más importante, por creer en mí, por ayudarme a “perseguir mis sueños”, como dice un poema del Mario Benedetti (autor Uruguayo).

A Jaime Lloveras por el respeto y calidez en el trato, y por su valioso asesoramiento para que el trabajo pueda concretarse.

A Liliana Iriarte y Cecilia Videla (miembros de la Red AGROFORALIA – Programa Pablo Neruda), por promover mi viaje a la Universidad de Lleida (España) que me permitió compartir valiosas experiencias de campo y académicas, y disfrutar de la cordial atención recibida en éstos ámbitos.

A mi esposo por acompañarme, ayudarme a sostener la decisión de seguir estudiando y ser “el centinela” de nuestra familia. A mis hijos (María Inés, Cecilia y Pablo) por saber entender tantas postergaciones.

A Claudia Giletto, por tantas horas de trabajo, amistad y esperanzas compartidos!

A Sandra, Natalia, y todos los “chicos” con los que compartimos trabajo en el campo y en el laboratorio, por formar un grupo de trabajo alegre y solidario como pocos.

A mi hermana y a mis amigos con quienes siempre he contado para compartir las venturas y desventuras del “camino de la Tesis”.

A mis compañeros de cátedra por sostener las tareas de docencia durante mi ausencia.

INDICE GENERAL

Contenido	Página
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xii
Resumen	xiv
Abstract	xvi
Abreviaturas	xviii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción general	2
1.2 Características de la región estudiada	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Abordaje del estudio	10
1.5 Relevancia de la tesis	11
CAPITULO 2: RIESGO AMBIENTAL DE PÉRDIDA DE P	12
Métodos agronómicos y ambientales de determinación de fosforo en Argiudoles del sudeste bonaerense	13
2.1 Resumen	13
2.2 Abstract	13
2.3 Introducción	14
2.4 Materiales y Métodos	16
2.5 Resultados y Discusión	17
2.5.1 Relación entre métodos de extracción	17
2.5.2 Riesgo de pérdida de P en el cultivo de papa	21
2.6 Conclusiones	24
2.7 Bibliografía	24
CAPITULO 3: DIAGNÓSTICO DE FERTILIZACIÓN FOSFATADA	28
Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for potato crops in Mollisols	29
3.1 Abstract	29

3.2 Introduction	30
3.3 Materials and methods	31
3.4 Results	36
3.4.1. Relationships between the potato yield response to P fertilization and soil extractable P	36
3.4.2. The P rate for maximum yield	40
3.5 Discussion	40
3.5.1 Relationships between the potato yield response to P fertilization and soil extractable P	41
3.5.2 The P rate for maximum yield	43
3.6 Conclusions	45
3.7 References	45
CAPTITULO 4: EVALUACIÓN ECONOMICA DE LA FERTILIZACIÓN FOSFATADA	48
4.1 FERTILIZACIÓN EN PAPA: EVALUACIÓN DEL AGREGADO DE UN POLIMERO AL SUPERFOSFATO	49
4.1.1 Resumen	49
4.1.2 Introducción	50
4.1.3 Materiales y métodos	51
Ensayo a campo	51
Ensayo en macetas	51
4.1.4 Resultados y discusión	52
4.1.5 Conclusión	55
4.1.6 Bibliografía	55
4.2 DOSIS ÓPTIMA ECONÓMICA DE FÓSFORO EN EL CULTIVO DE PAPA EN EL SUDESTE BONAERENSE	57
4.2.1 Resumen	57
4.2.2 Abstract	57
4.2.3 Introducción	58
4.2.4 Materiales y Métodos	59

4.2.5 Resultados y discusión	63
4.2.6 Conclusiones	68
4.2.7 Bibliografía	68
CAPITULO 5: CURVA DE DILUCIÓN PARA EL DIAGNÓSTICO DE DEFICIENCIA DE P	71
USE OF A CRITICAL PHOSPHORUS DILUTION CURVE TO IMPROVE POTATO CROP NUTRITIONAL MANAGEMENT	72
5.1 Abstract	72
5.2 Introduction	72
5.3 Materials and methods	74
5.3.1 Field experiments	74
5.3.2 Sampling and laboratory procedures	75
5.4 Results and discussion	77
5.4.1 Yield response to P fertilization	77
5.4.2 Determination of P concentration in the whole plant	78
5.4.3 Estimation of P dilution curve parameters	83
5.4.4 P Nutrition Index (PNI)	85
5.5 Conclusions	87
5.6 References	88
CAPITULO 6: DISCUSION GENERAL Y CONCLUSIONES	93
6.1 Discusión General	94
6.2 Conclusión general	98
6.3 Bibliografía general	98
CAPITULO 7: CONSIDERACIONES FINALES	102
7. 1 Síntesis de los principales hallazgos e implicancias prácticas	103
7.2. Futuras líneas de investigación	104
Anexos	105
Anexo I: Estadios de crecimiento y desarrollo de la planta de papa	106

Anexo II: Cartas de suelo	107
Anexo III: Características agro-climáticas de la Región estudiada	119

INDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1.1: EL área punteada representa el área de origen de la papa y la zona sombreada muestra el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Argentina	3
Figura 1.2: Estadios de crecimiento y desarrollo del cultivo de papa	4
Figura 1.3: Representación esquemática del ciclo del fosforo (P) en el sistema suelo-planta	5
Figura 2.1: Relación entre concentración de fósforo (P) en el suelo extraído con tres test agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen)	20
Figura 2.2: Relación entre la concentración de P en el suelo extractable con CaCl_2 (P-CaCl_2) y con tres métodos de extracción agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen)	21
Figura 2.3: 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 20010/11).	22
Figura 2.4: Evolución de la cantidad de fósforo (P) extraído por el cultivo de papa, en dos estaciones de crecimiento (2009/10 y 20010/11).	23
Figure 3.1: Relationships between extractable soil P determined before crop planting for different tests (Bray 1, Mehlich 3, Olsen and CaCl_2) and the differences in yield (yield of the fertilized treatment with the highest yield and that for the unfertilized plot) and the relative yield.	39
Figure 3.2: Relationship between fresh tuber yield and the maximum quantity of P uptake by the whole crop (aerial + tubers) at 104 days after planting).	42
Figure 3.3: Relationship between experimental and recommended P rate needed to obtain a soil available P index Bray1=32.	43
Figura 4.1.1: Eficiencia de uso del superfosfato triple de calcio (SFT) y SFT revestido con Avail (Avail) para el cultivo de papa expresada como factor parcial de productividad (FPP), eficiencia agronómica (EA) y presupuesto parcial de nutriente (PPN).	53
Figura 4.1.2: Fósforo extractable Bray1 en suelo fertilizado con diferentes dosis de P (25, 50 y 100 kg P ha ⁻¹), Columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre dosis de P dentro de cada muestreo (días de incubación).	54
Figura 4.2.1: Ecuación cuadrática que relaciona rendimiento y dosis de P, para cada sitio experimental.	66
Figura 4.2.2: Dosis de P para máximo beneficio económico (DOE) calculada para diferentes relaciones de precios (P/papa) y fósforo (P) extractable en el suelo	67

previo a la siembra del cultivo de papa con diferentes metodologías (Bray1 y Mehlich3).	
Figure 5.1: Effect of P fertilization with 0, 25, 50 and 100 kg P ha ⁻¹ on aerial and tuber dry matter accumulation during the 2006/07, 2009/10 and 2010/11 potato growing seasons.	78
Figure 5.2: Effect of P fertilization with 0, 25, 50 and 100 kg P ha ⁻¹ on P concentration in potato tissues (aerial and tuber) during the 2006/07, 2009/10 and 2010/11 growing seasons.	81
Figure 5.3: Relationships between P concentration and (a) Total biomass <1 Mg DM ha ⁻¹ and (b) Total biomass >1 Mg DM ha ⁻¹ . Solid line represents the critical P dilution curve [Pc = 3.919 W -0.304] for potato crop growing under non-limiting N and water conditions.	83
Figure 5.4: Validation of the critical P dilution curve (Pc) for potato crop with data points corresponding to the 2005/06 and 2012/13 growing seasons.	85
Figure 5.5: Phosphorus nutrition index (PNI) of potato crops fertilized with 0, 25, 50 and 100 kg P ha ⁻¹ . The PNI is shown at different crop growth stages expressed in days after planting for the 2005/06 and 2012/13 growing seasons.	86
Figure 5.6: Relationship between the relative yield and phosphorus nutrition index (PNI) at 60 and 80 days after planting (dap). The PNI was calculated by dividing the P concentration in the total dry matter at each sampling date, fertilization rate and growing season by the Pc obtained from the critical P dilution curve (Figure 5.3).	87
Figura 6.1: Relación entre P extractable Bray1 (P-Bray1) previo a la plantación (0-20 cm de profundidad) y rendimiento del cultivo de papa. P crítico agronómico = concentración de P en el suelo para obtener el máximo rendimiento; P crítico ambiental = concentración de P en el suelo a partir de la cual existe riesgo ambiental de pérdida de P).	95
Figura 6.2. Modelo teórico para el diagnóstico de los requerimientos de fertilización fosfatada en el cultivo de papa.	96
Figura 6.3. Dosis de P recomendada (calculada teniendo en cuenta el P crítico agronómico y ambiental, el P requerido por el cultivo para un rendimiento específico y el P necesario para aumentar la concentración de P del suelo, Capítulo 3) y dosis óptima económica (DOE) para relación de precios P/tubérculo mediana (Capítulo 4).	97
Figura III.1: Mediana de la precipitación mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el periodo 1985-2014. Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37° 45'S, 58° 18'O, 130 msnm).	119
Figura III.2: Mediana de la temperatura mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el periodo 1985-2014. Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA (37°	119

45'S, 58° 18'O, 130 msnm).

Figura III.3: Mediana de la evapotranspiración potencial (ETP) mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el periodo 1985-2014. 120

Figura III.4: Evolución del balance hídrico (en mm) durante la estación de crecimiento del cultivo, expresada cada 10 días 120

INDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla 2.1. Características edáficas previas a la siembra del cultivo de papa y prácticas de manejo de los sitios experimentales	17
Tabla 2.2: Estadística descriptiva de métodos de extracción de fósforo del suelo.	18
Tabla 2.3: Coeficientes de correlación y test de comparación de medias para pares de métodos de extracción de fósforo del suelo	19
Tabla 2.4: Resumen del efecto de la estación de crecimiento (año), dosis de fósforo (P) y tiempo transcurrido desde la fertilización (ddp) sobre Bray1 y el fósforo extraído por el cultivo de papa	23
Table 3.1: Location, some of the soil characteristics (0-20 cm depth) before planting the potato crop; climate conditions during the growing seasons; and management information for the individual trials.	32
Table 3.2: Average total tuber yields depending on P fertilization (0. 25. 50. 100. 150 and 200 kg P ha ⁻¹).	33
Table 3.3: Statistical models used to describe the relationships between soil P concentrations determined with different extractants (x) and total yield response to P fertilization of the potato crop (y).	37
Table 3.4: Recommended phosphorus rates (kg P ha ⁻¹) for irrigated potato crops with different goal yields and initial available P indexes (Pav index).	40
Table 3.5: Extractable phosphorus Bray1 after potato crops in soil samples (from depths of 0 to 20 cm).	44
Tabla 4.1.1: Rendimiento en peso fresco, concentración de P en tubérculo y P extraído por el cultivo de papa fertilizado con 0, 25, 50 o 100 kg P ha ⁻¹ utilizando superfosfato triple de calcio (SFT) o SFT+Avail (Avail) como fuentes de P.	52
Tabla 4.2.1: Algunas características edáficas (0-20 cm) de los sitios experimentales, previo a la siembra del cultivo de papa.	61
Tabla 4.2.2: Información de condiciones climáticas y prácticas de manejo de cada sitio experimental.	62
Table 4.2.3: Rendimiento en peso fresco de cultivos de papa fertilizados con superfosfato triple de calcio (SFT)	64
Tabla 4.2.4 : Rendimiento promedio en peso fresco del cultivo de papa fertilizado con 25, 50 o 100 kg P ha ⁻¹ , utilizando superfosfato triple de calcio (SFT) o SFT+Avail® como fuentes de P.	65
Table 5.1: Soil characteristics (0–20 cm) and cropping practices in the experimental sites evaluated.	74

Table 5.2: Effect of P fertilizer rates on fresh tuber yield	77
Table 5.3: Average total biomass (TB) determined during the 2006-07, 2009–10 and 2010–11 growing seasons for the experimental potato fields.	80
Table 5.4: P concentration in the total biomass (aerial plant + tuber) (PC) during 2006-07, 2009–10 and 2010–11 growing seasons for experimental potato fields.	82

RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es el cuarto cultivo más importante en la producción mundial y su tubérculo ha contribuido históricamente a la seguridad alimentaria y nutricional en el mundo. En la región sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), una de las principales zonas de producción del país, los suelos normalmente muestran una baja disponibilidad de fósforo (P) por lo que la fertilización fosfórica es una práctica esencial para obtener altos rendimientos. La falta de herramientas que permitan evaluar la nutrición fosfatada de una manera integral, que incluya la visión agronómica, económica y ambiental, hace que frecuentemente los fertilizantes se apliquen sin tener en cuenta su impacto en la sostenibilidad económica y ambiental del sistema productivo. Se planteó como objetivo central de la presente tesis, proveer de información que permita la comprensión de los aspectos más relevantes de la nutrición y fertilización fosfatada del cultivo de papa bajo riego, en nuestro tipo de suelos. Se realizaron ensayos de respuesta a la fertilización fosfatada con el cultivar de papa "Innovator" en diferentes años y sitios (13 años-sitio) y ensayos en macetas; y se analizaron muestras de suelo y planta de cada uno de ellos. Dado el carácter pionero de la evaluación de riesgo ambiental de pérdida de P desde el suelo hacia cuerpos de agua en Argentina, el primer objetivo fue determinar la concentración de P en el suelo a partir de la cual existe riesgo ambiental de pérdida de P (P crítico ambiental) utilizando métodos agronómicos de extracción de P. Para ello se utilizaron muestras de suelo (0-20 cm) y se estableció la relación entre la cantidad de P extraída con métodos agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen) y con CaCl_2 0,01 M. A partir de dichas relaciones y considerando como valor crítico ambiental 5 mg kg^{-1} de P extractable con CaCl_2 , se determinó que el P crítico ambiental para los suelos Argiudoles es: 39, 34 y 27 mg kg^{-1} para Bray1, Mehlich3 y Olsen, respectivamente. Tomando estos valores como referencia se realizó un seguimiento de la disponibilidad de P en el suelo durante el desarrollo del cultivo. Se determinó la concentración de P Bray1 que se asocia con riesgo ambiental de pérdidas de P desde el suelo hacia cuerpos de agua en etapas tempranas de desarrollo (los primeros 60 días después de la plantación), lo que sustenta el potencial impacto ambiental negativo de la fertilización con P. El siguiente objetivo fue determinar el P crítico agronómico, concentración de P en el suelo (0-20 cm) a partir de la cual no se espera respuesta significativa en rendimiento por fertilización fosfatada. Se determinó que el P crítico agronómico es 32, 32 11 y 2,8 mg kg^{-1} para Bray1, Mehlich3, Olsen y CaCl_2 , respectivamente. Teniendo en cuenta los valores de P crítico ambiental y agronómico, la disponibilidad inicial de P y los requerimientos de P del cultivo se propuso y se validó una metodología de recomendación de fertilización fosfatada que permite optimizar el rendimiento y es ambientalmente segura. Para incrementar la eficiencia del uso del P se ha sugerido el recubrimiento del fertilizante con polímeros que aumentarían la solubilidad del P en el suelo. Con el objetivo de verificar esta información para los suelos Argiudoles, se realizaron ensayos en macetas y de campo. Se determinó que, dadas las características edáficas de la región, el uso de un recubrimiento del fertilizante con polímeros no produce aumento de la disponibilidad de P en el suelo, del rendimiento ni la eficiencia de uso de P por el cultivo. Por lo tanto los valores críticos agronómicos de P pueden utilizarse aunque se recubra el fertilizante. Una evaluación integral de la fertilización fosfatada requiere también del análisis de aspectos económicos de la misma. Se determinó la dosis óptima económica (dosis de P que produce el máximo beneficio económico) para un amplio rango de contenido

de P en el suelo y relaciones de precios (P/papa). Se concluyó que la dosis de P recomendada para obtener el máximo rendimiento y minimizar el riesgo ambiental de pérdida de P también es la más adecuada para lograr el máximo beneficio económico. Finalmente se investigaron aspectos relacionados con la nutrición del cultivo, determinando y validando la curva de dilución de P para el cultivo de papa. El P crítico en planta (P_c) esto es la concentración mínima de P necesaria para el máximo crecimiento ($P_c = 3.919 * \text{Biomasa total}^{0.304}$) es un aporte novedoso y que permitió caracterizar el estatus fosfatado del cultivo mediante el índice de nutrición fosfatada. Este indicador del estado nutricional y del rendimiento del cultivo en etapas tempranas de crecimiento (60-80 días después de plantación), permite realizar correcciones a la fertilización si fuesen necesarias. En su conjunto creemos que esta tesis es un documento novedoso para los suelos Argiudoles que ayudará a mejorar la eficiencia del abonado fosfórico en nuestra región.

ABSTRACT

Potato (*Solanum tuberosum* L.) is the fourth most important crop in the world, and its tuber has historically contributed to food security. Specifically in the south-eastern Pampas region of the Buenos Aires Province (Argentina), one of the main productive areas in that country, soils usually present low phosphorus (P) availability. This is why P fertilization is essential to achieve high yields. The lack of P diagnose methods that comprehensible integrate the agronomic, economic and environmental aspects of fertilization leads to an irrational P application, without taking into account the economic and environmental sustainability of the system. The aim of this thesis was to generate information about the most relevant aspects of potato P nutrition and fertilization in irrigated potato crops from the south-eastern Pampas. Different field experiments (13 years-sites) were performed together with pot experiments to evaluate the P the potato “Innovator” cultivar P response. Soil samples and potato tissues from each of these experiments were analyzed. As there is no available information about P runoff risk from soils to watercourses in Argentina, our first objective was to determine the critical P soil concentration above which there is an environmental risk of P losses, using agronomic P-extraction methods. To this end, soil samples (0 to 20 cm) were treated with different agronomic extractants (Bray1, Mehlich3 y Olsen), and these results were compared with those from a CaCl₂ 0.01 M extraction. From this comparison, and considering a 5 mg kg⁻¹ critical P value for CaCl₂ extractions, we determined a soil environmental P critical concentration of 39, 34 and 27 mg kg⁻¹ for Bray1, Mehlich3 and Olsen extractions, respectively. Using these reference values, we evaluated soil P availability throughout the growing season. We determined that P Bray 1 concentration is associated with P runoff risk in early crop stages (first 60 days after planting), demonstrating the potential negative impact of P fertilization. Our second objective was to determine the agronomic soil P critical value (0 to 20 cm) above which there is no yield response to P fertilization. We determined an agronomic soil P critical threshold of 32, 32, 11 and 2.8 mg kg⁻¹ for Bray1, Mehlich3, Olsen and CaCl₂, respectively. Taking into account the determined environmental and agronomic soil P critical concentrations, the initial soil P availability, and the potato crop P demand, we proposed and validated a P diagnose strategy that optimizes potato yield in an environmentally secure way. Considering that the coating of P fertilizers with polymers has been suggested as an strategy to increase fertilizer P use efficiency, we evaluated this hypotheses by performing field and pot experiments in Argiudoll soils. We determined that polymer coatings do not increase P availability, nor potato yield or P use efficiency as compared to regular P fertilizers. This is why the agronomic P critical values we previously determined can be used independently from the use of polymer coatings. An integral P diagnose strategy should also contemplate the economic aspects of fertilization. We determined the economic optimum P rate (P rate at which the economic profit is maximized) for a wide range of initial soil P availability values and fertilizer and corn prices. We concluded that the recommended P rate that maximizes yield while reducing the environmental risk is also the rate that maximizes the economic profit. Finally, we investigated aspects associated with potato nutrition, by determining and validating the potato P dilution curve. The determination of the plant P critical concentration (P_c), which is the minimum plant P concentration at which the maximum growth is achieved (P_c= 3.919*total biomass^{-0.304}) is a novel aspect of our study, which allowed to characterize the P status through a P nutrition index. The evaluation of this index in early stages of potato

growing season (60-80 days after planting) allows to apply in-season P fertilizers to correct deficiencies, if necessary. The results from this thesis are novel and will allow a better use of P fertilizers in the south-eastern Pampas region.

ABREVIATURAS

ddp = DAP: días después de plantación.

DMS: test de Fisher de diferencias mínimas significativas.

DOE=Dosis optima económica: dosis de fertilización fosforada (kg ha^{-1}) que produce el máximo beneficio económico.

EA= Eficiencia Agronómica (Mg kg^{-1}): (rendimiento del tratamiento fertilizado – rendimiento del testigo) / dosis de P.

FPP= Factor Parcial de Productividad (Mg kg^{-1})= rendimiento / dosis de P.

P crítico ambiental: concentración de P en el suelo (mg kg^{-1}) a partir de la cual existe riesgo ambiental de pérdida de P.

P- Mehlich3= concentración de P en el suelo extraído con el método de Mehlich3 (mg kg^{-1})

P= fósforo.

Pav = concentración de P suelo (mg kg^{-1}) determinada por cualquier método de análisis (Bray1, Mehlich3, Olsen o CaCl_2).

P-Bray1: concentración de P en el suelo (mg kg^{-1}) extraído con el método de Bray1.

Pc = P crítico en planta: concentración mínima de P (mg kg^{-1}) en planta entera necesaria para lograr el máximo crecimiento en un momento específico y en condiciones de campo.

P- CaCl_2 = concentración de P en el suelo (mg kg^{-1}) extraído con CaCl_2 0.01M.

P-Olsen= concentración de P en el suelo (mg kg^{-1}) extraído con el método de Olsen.

PPP = Presupuesto Parcial de P = P extraído a cosecha (kg) / dosis de P (kg).

Pt = umbral de P disponible = P crítico agronómico: concentración de P en el suelo (mg kg^{-1}) umbral o crítico por encima del cual no hay respuesta significativa a la fertilización fosfatada.

RY = Rendimiento relativo (%): rendimiento promedio del tratamiento sin fertilización con P / rendimiento promedio del tratamiento fertilizado con P de mayor rendimiento)*100.

SFT= Superfosfato triple de calcio.

TB = Biomasa total (Mg ha^{-1}): biomasa aérea + biomasa de tubérculos.

YD = diferencia de rendimiento (Mg ha^{-1}): Rendimiento promedio del tratamiento sin fertilización con P - rendimiento promedio del tratamiento fertilizado con P de mayor rendimiento.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción general

La población mundial será de unos 8,1 mil millones en 2025 y de unos 9,6 millones en 2050, correspondiendo el mayor crecimiento a los países en desarrollo y en los entornos urbanos. Además del incremento en la población, se espera un aumento de la renta per cápita, y como consecuencia un aumento en la demanda mundial de alimentos (Tilman, et al., 2011). El satisfacer esta demanda global es un reto para la producción agrícola y una de las alternativas para mitigar este problema es incrementar el rendimiento de los cultivos. Esta opción fue apoyada por un estudio de la FAO (Alexandratos y Bruinsma, 2012) que predice que el 71% de los futuros aumentos de producción de cultivos provendrá de aumentos de rendimiento. Entre los cultivos extensivos, la papa (*Solanum tuberosum* L.) ocupa el cuarto lugar de importancia al nivel mundial después del trigo, maíz y arroz, (FAOSTAT, 2010) y dada la extensa superficie destinada al cultivo (18 millones de hectáreas) y su elevada producción (392 mill ton; FAOSTAT, 2013) es el principal cultivo hortícola. Por lo tanto, el incrementar la productividad de los cultivos de papa será un aporte para satisfacer la demanda creciente de alimentos. Para aumentar el rendimiento y optimizar el uso de los fertilizantes químicos es necesario tener una comprensión integral del sistema productivo y de la dinámica de los nutrientes en la relación suelo-cultivo.

La papa es originaria de la región sur de América, donde era cultivada por los incas, lo que habla de la tradición de este producto en las culturas indígenas del continente. A comienzos del siglo XVI los colonizadores españoles la descubrieron en el actual territorio de Colombia, Perú, Bolivia y el noroeste de Argentina (Figura 1.1). Desde España el cultivo se distribuyó hacia toda Europa, primero como una curiosidad botánica y luego, como un importante producto alimenticio (Caldiz, 2006). Actualmente se cultiva en todo el mundo, siendo los principales países productores China (17%), la Federación Rusa (8,7 %), India (7,1%), Estados Unidos (5,1%) y Ucrania (4,8%) <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. A excepción de China, donde la producción es intensiva en el uso de mano de obra, la alta producción del resto de los países obedece fundamentalmente a extensas áreas cultivadas y altos rendimientos. Tal es el caso de Bélgica, Nueva Zelanda, Holanda y Estados Unidos con rendimientos de 46 Mg ha⁻¹ (promedio 2012-13). En Argentina, la producción de papa (2,2 mill tn en 2013) se destina principalmente al consumo interno en fresco (82%) e industrializado (18%). En el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1.1), el rendimiento promedio es de 40 Mg ha⁻¹, aunque se pueden superar los 70 Mg ha⁻¹ (Caldiz, 2006).

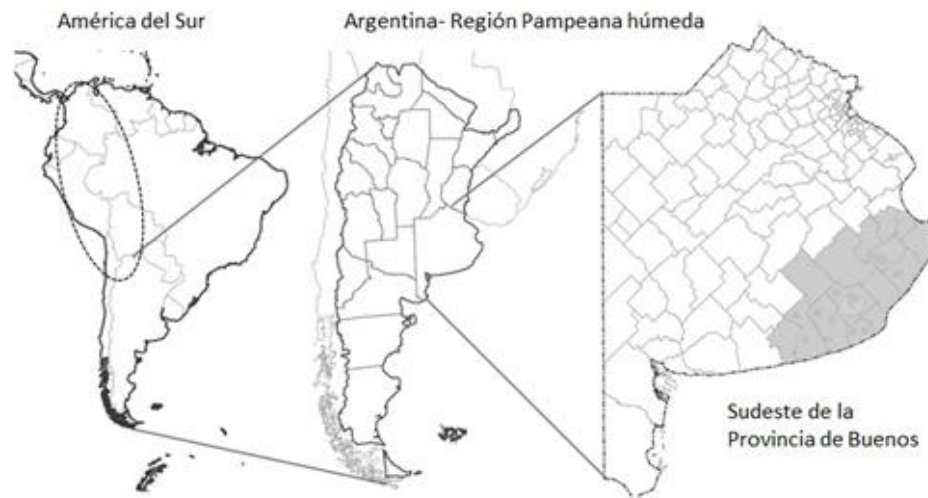


Figura 1.1: El área punteada representa el área de origen de la papa y la zona sombreada muestra el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

La papa es una planta muy plástica, lo que le permitió adaptarse a áreas tropicales y subtropicales, a pesar de ser originaria de una zona caracterizada por inviernos fríos (con temperaturas por debajo de 0°C), y veranos frescos con alta radiación. Se adapta a suelos diversos, expresando su potencial productivo en aquellos de textura franca a franca arenosa con pH entre 5,7 y 6,5, elevado contenido de materia orgánica, alto porcentaje de macro y micro porosidad, y profundidad efectiva del suelo de por lo menos 50 cm (Caldiz, 2006; Echeverría y Giletto, 2015). El crecimiento y desarrollo de la planta de papa se puede dividir en cinco etapas (Mikkelsen y Hopkins, 2006; Figura 1.2) cuya duración depende de factores ambientales, de manejo y del cultivar. Al inicio del ciclo (estadio I), el tubérculo madre es la única fuente de energía, a partir del cual se producen brotes y raíces y se inicia la emergencia de la parte aérea. Durante el crecimiento vegetativo (estadio II), la planta distribuye los productos de la fotosíntesis hacia el crecimiento de la parte aérea y de la raíz. El estadio III es una etapa corta, de aproximadamente dos semanas, en la que se empiezan a formar los tubérculos, y coincide con la floración. Posteriormente, (estadios IV) los tubérculos aumentan su fuerza de destino, y una porción creciente de los fotosintatos disponibles se destina a estos, en detrimento del crecimiento del follaje. En la etapa final (estadio V) se detiene la absorción y los nutrientes de las estructuras vegetativas son trasladados hacia los tubérculos donde se acumulan (para más detalles ver Anexo I).

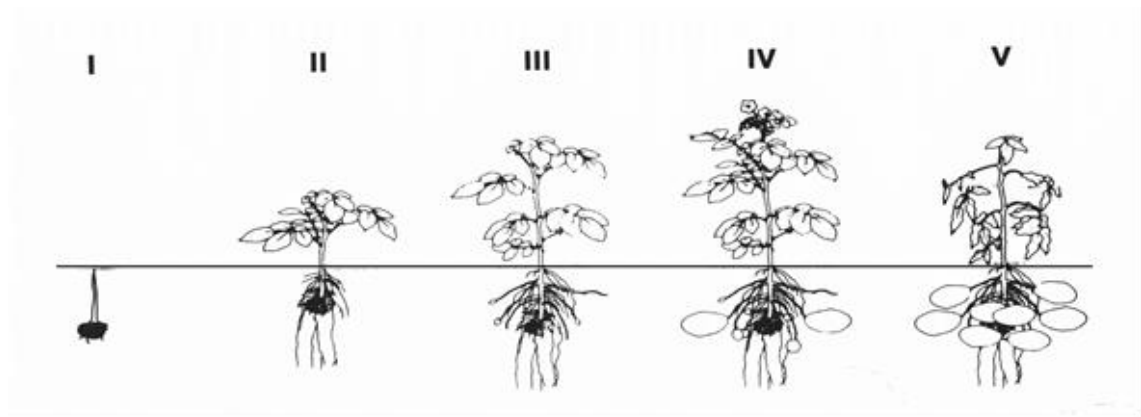


Figura 1.2: Estadios de crecimiento y desarrollo del cultivo de papa (adaptado de Mikkelsen y Hopkins, 2006). I: Brotación; II: Crecimiento vegetativo; III: Inicio de tuberización; IV: Llenado de tubérculos; V: Madurez.

La planta de papa se caracteriza por tener menor densidad y longitud de raíces que el arroz (*Oryza sativa*), el trigo (*Triticum aestivum*) y la soja (*Glycine max*) (Iwama, 2008; Fixen y Bruulsema, 2014), por ejemplo, siendo algo ineficiente en su exploración del suelo (Rosen *et al.*, 2014; Fixen y Bruulsema, 2014); por lo que es necesaria una adecuada nutrición fosfatada desde los estadios iniciales de crecimiento hasta la madurez. Los requerimientos de fósforo (P) del cultivo varían con los estadios de crecimiento, no obstante la mayor tasa de acumulación se produce a partir de inicio de tuberización (estadio III), generalmente entre los 60 y 70 días después de la plantación (Echeverría y Giletto, 2015). Si el suministro de P no se ajusta a los requerimientos del cultivo se pueden observar plantas con menor desarrollo, hojas en la parte baja de la planta de color verde oscuro y en algunos casos rojizo o rojo-violeta por acumulación de antocianinas, retraso en la madurez y reducción de la resistencia a las enfermedades. Los síntomas visuales constituyen *per se* un método de diagnóstico de deficiencia de P, sin embargo cuando estos se presentan generalmente es tarde para intentar repararla. Por lo tanto, una adecuada nutrición fosfatada durante todo el ciclo de crecimiento es especialmente importante en este cultivo.

Los suelos Mollisoles Pampeanos en general, y los del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Figura 1.1) en particular eran originalmente suelos ricos en materia orgánica y de muy alta fertilidad natural (ver Anexo II). Sin embargo, un largo período bajo cultivo ha dado lugar a pérdidas de ambas propiedades. Sin bien el contenido de materia orgánica del suelo sigue siendo alto (5-6%), como resultado de su nivel original, en algunos casos se redujo en un 50 % respecto del valor original (Álvarez, 2001; Lavado, 2006), el pH disminuyó hasta 0,3 unidades en situaciones con aportes de N y P durante siete años (Fabrizzi *et al.*, 1998) y la disponibilidad de P pasó de rangos de valores promedio altos ($> 20 \text{ mg kg}^{-1}$) a medios ($10\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$) o de rangos medios a bajos ($<10 \text{ mg kg}^{-1}$; Montoya *et al.*, 1999; García, 2001). En la actualidad los valores más frecuentes (mediana) en la provincia de Buenos Aires para carbono orgánico, pH y P-Bray son $25,4 \text{ g kg}^{-1}$, 6,2 y $10,4 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente (Sainz Rozas *et al.*, 2012; Sainz Rozas *et al.*, 2011). Este proceso de degradación del recurso está asociado a la intensidad de las

labranzas (Steinbach y Alvarez, 2006), la duración de los ciclos agrícolas, los cultivos incluidos en la rotación, y a la práctica de la fertilización (Studdert y Echeverría, 2000), entre otros factores.

Mantener la concentración de P en la solución del suelo en un rango óptimo para el crecimiento de los cultivos, a menudo citado como $>0.2 \text{ mg L}^{-1}$, al tiempo que se restringe la concentración de P en las aguas superficiales a $<0.03 \text{ mg L}^{-1}$ es un objetivo tendiente a optimizar el manejo de la fertilización fosfatada (Pierzynski et al., 2005). Para ello, es importante tener presente el ciclo de P en el suelo, y los procesos químicos y bioquímicos involucrados (Figura 1.3). Cuando el fertilizante fosfatado es agregado al suelo se disuelve y las formas más solubles de P (iones ortofosfato) pueden ser tomadas por las raíces o la biomasa microbiana, o participar en la reorganización de los reservorios de P del suelo a través de mecanismos de sorción-desorción, precipitación-disolución e inmovilización-mineralización (Shen et al., 2011). La dinámica del P en el suelo es la resultante de una serie de procesos complejos influenciados por la naturaleza de las fases sólidas tanto inorgánicas como orgánicas, forma y extensión de la actividad biológica, química de la solución del suelo (pH, fuerza iónica, potencial redox, etc.) y es modificada por factores ambientales como contenido de humedad del suelo y temperatura (Pierzynski et al., 2005). Los procesos de retención del P que se producen cuando el fertilizante se pone en contacto con la humedad del suelo, son fácilmente reversibles y el P agregado está disponible para las plantas o es susceptible de perderse por escurrimiento superficial (Sharpley et al., 2007). Luego los compuestos formados inicialmente se pueden convertir en formas menos solubles de tal manera que la concentración de P en la solución del suelo disminuye y con ella la disponibilidad para las plantas.

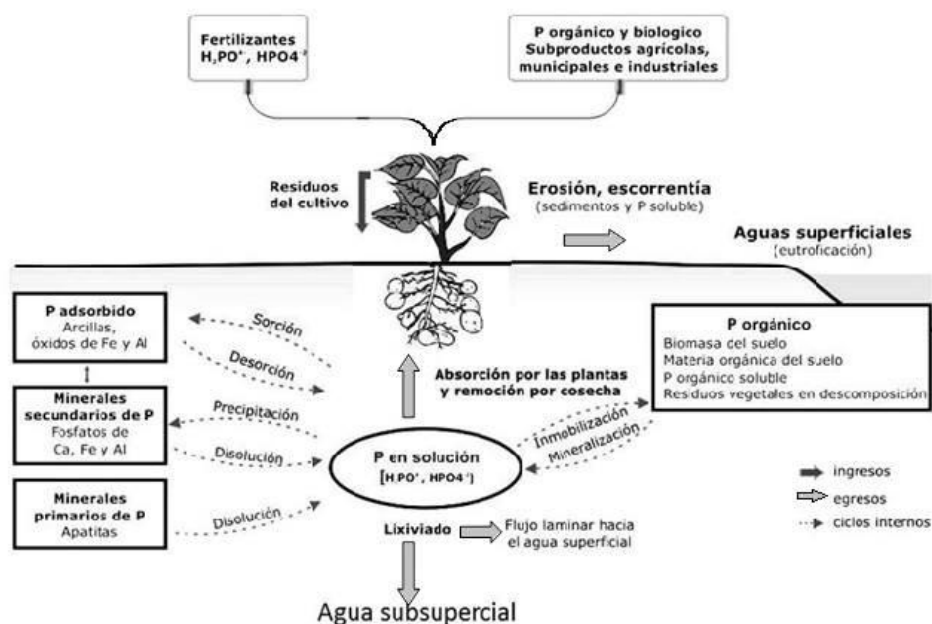


Figura 1.3: Representación esquemática del ciclo del fósforo (P) en el sistema suelo-planta. (Adaptado de Pierzynski et al., 2005)

En respuesta a esta situación, y con el objetivo de aumentar la disponibilidad de P para el cultivo, es frecuente que se realicen aplicaciones de fertilizante excesivas respecto de lo que absorbe el cultivo (Kiari *et al.*, 2000; Ruark *et al.*, 2014) que incrementan la cantidad de P retenido (Havlin *et al.*, 2005) y la desorción de este nutriente (Zamuner y Culot, 1999). Para que la pérdida de P sea causa de un problema ambiental, tienen que conjugarse altos niveles de P en el suelo y factores hidrológicos y geomorfológicos que favorezcan el transporte (Sharpley, 2003). En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, caracterizado por un paisaje ondulado, aproximadamente el 30% de la superficie del suelo presenta cierto riesgo de erosión (Cabria y Calandroni, 2011). Por lo tanto ambos factores (alta concentración de P y potencial de transporte) están presentes en la región. Este P puede mobilizarse e integrarse a corrientes de agua cuando llueve y acelerar la eutrofización de arroyos y lagunas. El desequilibrio en los ecosistemas acuáticos producto de la eutrofización puede interferir de modo importante en el uso que el hombre hace de estos recursos hídricos, tal como abastecimiento de agua potable, riego, recreación, etc. (Sharpley *et al.*, 2003; Pierzinski, 2005; Ruark *et al.*, 2014). Una vez que se detecta la eutrofización del agua en lagunas, ríos, arroyos, etc., es difícil revertir la tendencia (Sims y Sharpley, 2005; Sharpley *et al.*, 2007) por lo que es importante realizar acciones preventivas dirigidas al adecuado manejo del P en los sitios de producción agrícola.

Viglizzo *et al.* (2002) realizaron una evaluación de la sustentabilidad ambiental del agro pampeano en la década de 1990 y concluyeron que los riesgos de contaminación por P parecían ser nulos. Sin embargo a partir de ese período se acentúa la tendencia hacia modelos de producción más intensivos, se consolidan las prácticas de fertilización sistemática por lo que el balance de P podría resultar positivo en algunas áreas y aumentar el riesgo de contaminación. Las investigaciones en este sentido no han continuado y en la actualidad no se dispone de una metodología que permita el monitoreo del riesgo ambiental de pérdida de P. En la mayoría de los países europeos y en Estados Unidos, la evaluación de pérdidas de P desde sistemas agrícolas se basa en el nivel de P según el análisis de suelo empleando métodos ambientales (Pöthig *et al.*, 2010; Torrent y Delgado; 2001; Buczko y Kuchenbuch, 2007). Entre ellos se destaca el P soluble en agua o CaCl_2 0,01 M cuyo valor límite de 5 mg kg^{-1} , es independiente del tipo de suelo (Pöthig *et al.*, 2010). El uso del análisis de suelo como indicador de riesgo de pérdida de P ha recibido algunas críticas ya que no considera los factores de transporte (Buczko *et al.*, 2007), sin embargo, es una herramienta sencilla y rápida que ha demostrado ser válida para determinar el P crítico ambiental, esto es la concentración de P en el suelo a partir de la cual existe riesgo ambiental de pérdida de P (Bai *et al.*, 2014; Atia y Mallarino, 2002).

Los análisis de suelo se desarrollaron originalmente con fines agronómicos, o sea para utilizar el valor de P en el suelo como un estimador de la disponibilidad de P para el cultivo y efectuar recomendaciones de fertilización (métodos agronómicos). Numerosas investigaciones han sido realizadas en diferentes regiones correlacionando la cantidad de P extraída por algún método ambiental y los métodos agronómicos (Torrent *et al.*, 2010; Buczko *et al.*, 2007; Atia y Mallarino, 2002; Indiaty, 2000). Estos estudios muestran que las relaciones están ampliamente afectadas por las propiedades del suelo y pocas generalizaciones pueden hacerse entre suelos o regiones (Atia y Mallarino, 2002). *Por lo tanto, establecer la relación entre la cantidad de P*

extraído con métodos agronómicos y con CaCl₂ 0,01 M para los suelos del sudeste bonaerense permitiría que los métodos agronómicos sean utilizados también como indicadores de riesgo ambiental de pérdida de P hacia los cuerpos de agua. Teniendo en cuenta que la fertilización fosfatada se realiza tradicionalmente previo o en la siembra, que en ese período las precipitaciones son generalmente abundantes (Anexo III) y el cultivo presenta un escaso desarrollo radicular hacen suponer que los primeros 40-60 días después de plantación será un período de potencial riesgo ambiental de pérdida de P desde el suelo. Las escasas investigaciones que muestren la variación del P disponible durante el ciclo de crecimiento del cultivo de papa fertilizado (Alvarado et al., 2009), resaltan la importancia de ***establecer el momento en que debe realizarse la evaluación de riesgo ambiental en el cultivo de papa.***

Para reducir la pérdida de P de los suelos agrícolas hacia los cursos de agua es indispensable optimizar el manejo de la fertilización fosfatada. Rosen et al. (2014), en un listado de buenas prácticas de manejo para papa, sugieren evaluar la oferta de P del suelo mediante análisis de suelo y aplicar la dosis de nutriente calibrada para las condiciones particulares. En la etapa de calibración de un método de diagnóstico de requerimiento de fertilización, los valores de concentración de P en muestras de suelo obtenidas previo a la siembra del cultivo, se relacionan con la respuesta en rendimiento del cultivo y se define el P crítico agronómico como la concentración de P en muestras de suelo por encima del cual la respuesta a la fertilización fosfatada es muy baja o nula. El P crítico varía, entre otros factores, con el tipo de suelo (Maier et al., 1989), el cultivar (Maier et al., 1989b; Sanderson et al., 2003), el método de análisis, la forma de expresar la respuesta en rendimiento y el modelo utilizado para describir la relación entre la respuesta en rendimiento vs el P extractable no habiendo niveles críticos definitivos (Rosen et al., 2014). En nuestro país se realizan las recomendaciones de fertilización fosfatada en papa a partir de información internacional obtenida de cultivares y condiciones edafo-climáticas diferentes. Dependiendo del objetivo de rendimiento se recomienda no fertilizar cuando la concentración de P-Bray1 es mayor a 30-40 mg kg⁻¹ (Echeverría, 2005). Innovator es un cultivar ampliamente utilizado en Argentina, Europa y Norte América, de alto potencial de rendimiento y calidad de tubérculos apto para uso industrial (Caldiz, 2006). Por lo tanto, realizar mediciones en campo para ***definir el valor de P crítico agronómico para el cultivar de papa Innovator*** sería relevante para ajustar las recomendaciones de fertilización.

Una vez obtenido el valor crítico de P que separa los suelos con alta y baja o nula probabilidad de respuesta, se puede establecer la dosis de fertilización apropiada para cada valor o rango de disponibilidad de P. La dosis recomendada depende del nivel de P en el suelo previo a la implantación del cultivo, del rendimiento esperado, de la relación de precios papa/fertilizante, y del criterio de recomendación del laboratorio y/o asesor. Respecto a este último aspecto, debe tenerse en cuenta que existen dos criterios de recomendación: el de suficiencia y el de reconstrucción y mantenimiento. El criterio de suficiencia pretende satisfacer los requerimientos del cultivo, mientras que el de reconstrucción y mantenimiento también incluye aportes para mejorar el nivel de P disponible en el suelo. Las diferencias en las características edáficas y en la respuesta a P así como los criterios utilizados para interpretar los análisis de suelo, han contribuido a la generación de pautas de recomendación de

fertilización diferentes según el área de cultivo de papa en América del Norte (Laboski, Peters y Bundy 2006; Manitoba Agricultura, Alimentación e Iniciativas Rurales 2007; Stark, Westermann y Hopkins, 2004) y según el país en Europa (Jordan-Meille, 2012; Tóth et al., 2014). Si bien en muchas investigaciones se explicitan los criterios utilizados para decidir dosis de aplicación de P (suficiencia o reconstrucción y mantenimiento), no consideran las consecuencias ambientales de la fertilización fosfatada. En la actualidad, la preocupación ambiental ha obligado a considerar la elaboración de recomendaciones para las aplicaciones de P a nivel de productor y de cuencas en base a la posibilidad de pérdida de P desde los suelos agrícolas. Por lo tanto, ***definir una metodología de recomendación de fertilización fosfatada para el cultivo de papa que permita optimizar el rendimiento y minimizar el riesgo ambiental de pérdida de P, es un objetivo sustancial de esta investigación.***

La mayor parte de los fertilizantes fosfatados utilizados internacionalmente son productos solubles en agua, como el superfosfato triple de calcio (0-48-0), el fosfato monoamónico (11-52-0) y el fosfato diamónico (18-46-0). La eficiencia agronómica de estos fertilizantes es reducida debido a la conversión del P soluble en formas menos solubles como fosfatos de hierro o aluminio en suelos ácidos y de calcio en suelos alcalinos (Figura 1.3). Una alternativa para mejorar la eficiencia de uso de P que se ha propuesto en los últimos años es el empleo de aditivo, como el Avail®. El copolímero de ácido maleico y ácido itacónico que forma el Avail® tiene una capacidad de intercambio catiónico muy alta (1800 cmol kg⁻¹) por lo que puede retener los cationes intercambiables metálicos polivalentes (Ca⁺², Mg⁺², Fe⁺² y Al⁺³) de la solución del suelo circundante al gránulo de fertilizante, impidiendo la formación de minerales secundarios de P y aumentando la disponibilidad de los iones fosfato para el cultivo (Sanders et al., 2012; Chien et al., 2014). Los resultados del uso de este producto en el cultivo de papa no son consistentes (Repking y Laboski, 2008; Laboski y Andraski, 2009; Stark y Hopkins, 2013; Hopkins, 2014). En estos trabajos de investigación se genera abundante información acerca de la relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo y el contenido de P en el suelo al momento de la siembra, sin analizar los aspectos económicos de la fertilización. Esta situación genera incertidumbre respecto al beneficio de su empleo ya que, si el agregado del recubrimiento no aumenta el rendimiento del cultivo de papa, se estaría incrementando el costo de producción y disminuyendo la eficiencia económica del sistema productivo. Por lo tanto, ***generar información que permita determinar la dosis óptima económica (dosis de P que produce el máximo beneficio económico) según la disponibilidad de P en el suelo cuando se utilizan fertilizantes con o sin recubrimiento de polímeros,*** completaría la información que debe disponer el productor a la hora de decidir respecto de la fertilización fosfatada.

Una vez definida la dosis de fertilizante para maximizar el rendimiento, el beneficio económico y minimizar el riesgo ambiental, la estrategia de manejo tradicional es la aplicación localizada a la plantación, excepto cuando las dosis recomendadas son muy altas y el fraccionamiento entre pre-plantación y plantación es aconsejado (Rosen et al. 2014). Cuando las condiciones climáticas son muy favorables y se incrementa el potencial de rendimiento, una aplicación extra de P puede ser necesaria, de manera similar a las estrategias de manejo que actualmente se utilizan para el nitrógeno. Por esta razón es importante hacer un seguimiento del estado nutricional del cultivo durante el ciclo de crecimiento para determinar la necesidad de

fertilización fosfatada suplementaria a la realizada en pre-plantación y/o plantación. Tradicionalmente se ha utilizado la concentración de P en pecíolos para evaluar el estado nutricional durante la estación de crecimiento del cultivo de papa (Westermann y Kleinkopf, 1985; Freeman et al., 1998). Sin embargo, estudios más recientes reportan variaciones sustanciales en la concentración de P en pecíolo entre años y dosis de P, y una escasa o nula correlación con el rendimiento (Sanderson et al., 2003; Rosen y Bierman, 2008; Mohr y Tomaszewicz, 2011). Otra alternativa para identificar deficiencias o excesos de P es el análisis de tejido vegetal en la planta entera. Con esta metodología se determina la concentración crítica de P (P_c), esto es la concentración mínima de P en planta entera necesaria para lograr el máximo crecimiento en un momento específico y en condiciones de campo. Esta metodología se denomina curva de dilución de P en analogía a la muy estudiada curva de dilución de nitrógeno. El valor de P_c ha sido determinado en el fleo (*Phaleum pratense* L.; Belanger y Ziadi, 2008) y en trigo (*Triticum aestivum* L.; Belanger et al., 2015), sin embargo, no ha sido aún evaluado en papa. Una vez determinada la curva de dilución de P se puede calcular el índice de nutrición fosforada (concentración de P en planta a campo / P_c) como indicador del estado nutricional. El índice de nutrición fosforada (INP) puede integrarse en un plan de evolución nutricional del cultivo de papa. **Determinar y validar la curva de dilución de P en papa, y establecer la utilidad del Índice de nutrición fosfatada como indicador del estado nutricional del cultivo de papa y del rendimiento** abriría la posibilidad de corregir la cantidad de P aplicado a la siembra por medio de fertilización foliar, posibilitando un mayor rendimiento y eficiencia de uso del P.

1.2. Características de la Región estudiada

Los suelos predominantes en la región (Figura 1.1) pertenecen al orden de los Molisoles, gran grupo Argiudoles ó Paleudoles desarrollados sobre sedimentos loésicos, bajo régimen údico-térmico (Studdert et al., 2012). Para más detalles ver Anexo II: Cartas de suelo. Aproximadamente el 65% de la superficie corresponde a Argiudol típico series Mar del Plata, Tandil y Comandante Nicanor Otamendi sin limitantes de profundidad, y el 23% a Paleudol Petrocálcico serie Balcarce, con limitantes de profundidad entre 50 y 80 cm.

La región presenta una topografía que incluye sierras (11% de la superficie) y zonas con pendientes entre 3 y 10% (15% de la superficie) cuyas limitantes son la susceptibilidad a la erosión hídrica y la profundidad efectiva (15 cm). El resto de la superficie (74%) está ocupada por suelos con menores pendientes (1 a 3%), cuyo uso principal es la agricultura.

El clima de la Región se clasifica como mesotermal sub-humedo-humedo (según Thornthwaite) o como templado húmedo sin estación seca (según Köppen) (A. Irigoyen, comunicación personal). La mediana anual de temperatura y precipitación es 14,3 °C y 917,6 mm, respectivamente. El régimen pluviométrico presenta tres estaciones: lluviosa (octubre a marzo), moderadamente lluviosa (abril, mayo, septiembre) y poco lluviosa (junio a agosto). La evapotranspiración potencial estimada en la región es de 880 - 1035 mm año. El balance hídrico para el cultivo de papa presenta deficiencias de 90 a 190 mm en el periodo crítico entre inicio de tuberización y fin de llenado de tubérculos (Estadios III y IV, Figura 1.2) por lo tanto el

riego tiene carácter de suplementario de las precipitaciones (Suero et al., 2001). Para más detalles ver Anexo III: Características agro-climáticas de la región.

1.3. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es generar información que permita definir pautas de manejo de la fertilización fosfatada del cultivo de papa regado tendiente a lograr alta productividad, económicamente viable y con mínimo impacto ambiental. Para cumplir con el objetivo general de la tesis, se plantearon los siguientes objetivos parciales:

- 1.- Determinar la concentración crítica de P en el suelo a partir de la cual existe riesgo de pérdida de P hacia aguas superficiales (riesgo ambiental) utilizando métodos agronómicos de extracción de P.
- 2.- Establecer el momento del ciclo de crecimiento de cultivo de papa en que debería realizarse la evaluación de riesgo ambiental.
- 3.- Establecer la dosis de fertilización fosfatada que maximiza el rendimiento y el beneficio económico minimizando el riesgo ambiental de pérdida de P.
- 4.- Definir la curva de dilución de P, modelo que no ha sido descrito aun para el cultivo de papa e indagar sobre la potencialidad del índice de nutrición fosfatada como indicador del rendimiento del cultivo.

1.4. Abordaje del estudio

La información generada en la tesis se dividirá en 4 capítulos, redactados como publicaciones independientes:

- Capítulo 2: Riesgo ambiental de pérdida de P.
- Capítulo 3: Diagnóstico de fertilización fosfatada.
- Capítulo 4: Evaluación económica de la fertilización fosfatada.
- Capítulo 5: Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P.

Para finalizar se realizara una integración de los resultados en la discusión general (Capítulo 6) y una sección de Consideraciones finales (Capítulo 7) que incluirá una síntesis de los resultados más relevantes y sus implicancias prácticas y se propondrán futuras líneas de investigación.

1.5. Relevancia de la tesis

La presente tesis intenta avanzar en el estado del conocimiento referido al manejo integral de la fertilización fosfatada para una producción sustentable del cultivo de papa bajo riego. Se desean establecer el valor de concentración de P en el suelo, determinados por varias técnicas analíticas, que permiten la máxima producción (**valor crítico agronómico**), el mínimo riesgo ambiental de pérdida de P (**valor crítico ambiental**) y el mayor beneficio económico (**dosis óptima económica**) para integrarlos en un método de diagnóstico de requerimientos de fertilización fosfatada. Otro aspecto poco explorado y que despierta interrogantes es la posibilidad de incorporar la fertilización foliar durante el ciclo del crecimiento del cultivo como estrategia de manejo que permita aumentar la eficiencia de la fertilización fosfatada. Los resultados obtenidos a partir de la curva de dilución de P (**P crítico en planta**) permitirán disponer de una herramienta válida para decidir respecto de la necesidad o no de la fertilización foliar. El enfoque integral del manejo del suelo y planta proveerá de herramientas de decisión tendientes a lograr la producción sustentable del cultivo de papa.

CAPÍTULO 2:
RIESGO AMBIENTAL DE
PÉRDIDA DE FÓSFORO

**METODOS AGRONÓMICOS Y AMBIENTALES DE DETERMINACION DE FOSFORO EN
ARGIUDOLLES DEL SUDESTE BONAERENSE**

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

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

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

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

2.1 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 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

2.2 ABSTRACT

Soil testing is a useful tool to evaluate soil fertility and to make fertilizer recommendations (agronomic tests). Other methods estimate the quantity P that can 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. Our objectives were to determine the relationship between agronomic P extraction methods (Bray1, Olsen, Mehlich3) and environmental (CaCl₂) and determine the risk of contamination with P from potato crops fertilized 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 used at the rates of: 0, 25, 50, 100, 150 and 200 kg P ha⁻¹. Extractable P with Bray1, Mehlich3, Olsen and 0.01M CaCl₂ was determined. The 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). From agronomic and environmental methods relationships, soil limit values were estimated (39, 34 and 27 mg kg⁻¹ for Bray1, Mehlich3 and Olsen, respectively) from which P loss from soil to aquatic systems can be occur. Bray1 P concentrations that are associated with risk of P loss (greater than 39 mg kg⁻¹) were determined in soils cultivated with potatoes, thus warning about the potential environmental impact of P fertilization.

Keywords: Bray, Mehlich, Olsen, CaCl₂, pollution, potato

2.3 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 (Laboski & 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 Argentina (Gonzalez & Rodriguez, 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 & Garcia, 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 CaCl_2 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 CaCl_2 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.

2.4 MATERIALES Y METODOS

El trabajo se desarrolló en 13 lotes de producción localizados en los partidos de General Balcarce (37°75' S, 58° 25' O), General Pueyrredón (38° 00 'S, 57° 33'O) y General Alvarado (38°17 'S, 58° 08'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 2.1). 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 fosfatada 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 CaCl₂ 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 (1mm) 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 HNO₃-HClO₄ (Saunders & Williams (1955) y cuantificación colorimétrica (Murphy & Riley, 1962). La cantidad de P extraído por el cultivo en cada fecha de muestreo se calculó como la sumando el contenido de P (concentración de P x biomasa) de tubérculo y parte aérea de cada parcela.

Tabla 2.1. Características edáficas previas a la siembra del cultivo de papa y prácticas de manejo de los sitios experimentales

Table 2.1: Soil characteristics before planting the potato crop and management information for individual trials

Sitio	Estación de crecimiento	P-Bray1 [†] mg kg ⁻¹	pH ([†] , [‡])	Materia orgánica ^(†) g kg ⁻¹	N-NO ₃ ⁻ ^(§) kg ha ⁻¹	Cultivo previo
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.

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.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 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 2.1). 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

Publicado en Ciencia del Suelo. 33(1): 55-63. ISSN: 0326-3169 (Print) 1850-2067 (Online)

por Olsen (3,0–153,2 mg kg⁻¹) y la menor amplitud se registró en P-CaCl₂ (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-CaCl₂ que extrajeron respectivamente 10, 25 and 87% menos P que Bray1 (Tabla 2.2). La diferencia de P extractable promedio de 3 mg kg⁻¹ entre Bray1 y Mehlich3 fue significativa (Tabla 2.2); sin embargo, 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 acomplejante. 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 solubles (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).

Tabla 2.2: Estadística descriptiva de métodos de extracción de fósforo del suelo.

Table 2.2: Descriptive statistics of soil phosphorus extraction methods.

Parámetros estadísticos	Método de extracción			
	Bray1	Mehlich3	Olsen	P-CaCl ₂
	----- mg kg ⁻¹ -----			
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

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 2.3). Estos resultados ratifican la 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 (Figura 2.1) 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 (Figura 2.2.1) y las correlaciones consiguientes (Tabla 2.3) 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 (Mehlich3 = 0.80 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 CaCO₃ 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.

Tabla 2.3: Coeficientes de correlación y test de comparación de medias para pares de métodos de extracción de fósforo del suelo

Table 2.3: 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 $t = 1,977$, $-t = -1,977$

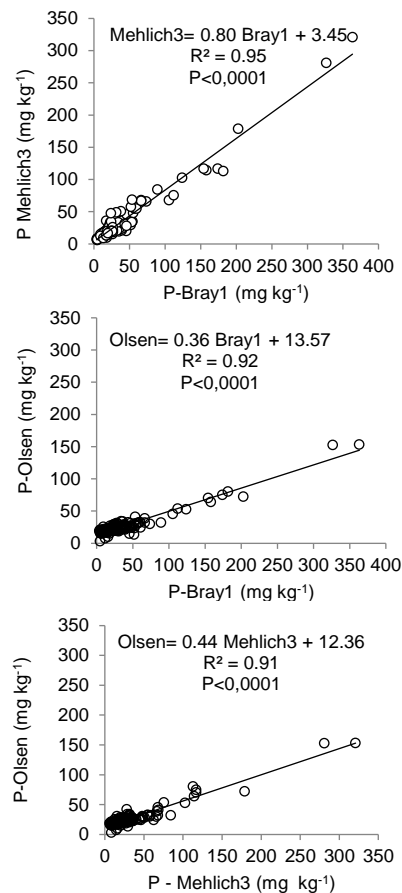


Figura 2.1: Relación entre concentración de fósforo (P) en el suelo extraído con tres test agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen). n=163

Figure 2.1: Relationship between soil phosphorus (P) concentrations extracted with three agronomic tests (Bray1, Mehlich3 and Olsen).

Las relaciones entre los métodos agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen) y el ambiental ($CaCl_2$) fueron lineales y significativas (Figura 2.2). 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 que permite concluir que valores de P en el suelo mayores a 5 mg P kg^{-1} implican riesgo de pérdida de P. Utilizando dicho umbral de $P-CaCl_2$ en las ecuaciones de la Figura 2.2, se calcularon los valores de P extractable con cada método agronómico. Por consiguiente, cuando se 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.

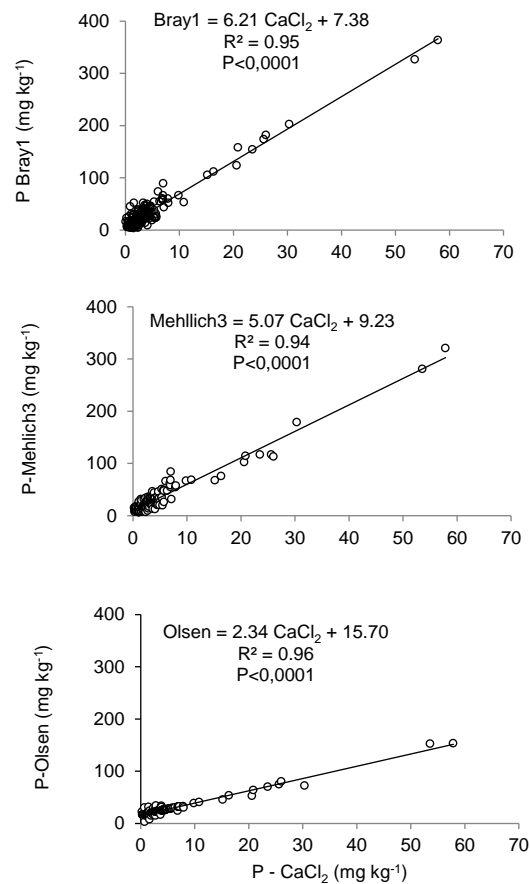


Figura 2.2: Relación entre la concentración de P en el suelo extractable con CaCl₂ (P-CaCl₂) y con tres métodos de extracción agronómicos (Bray1, Mehlich3 y Olsen). n=150
Las flechas verticales indican el valor del test agronómico (y) que corresponde a 5 mg L⁻¹ extraído con CaCl₂ (x)

Figure 2.2: Relationship between soil phosphorus concentrations extracted with CaCl₂ (P-CaCl₂) and three agronomic tests (Bray1, Mehlich3 and Olsen).
Vertical arrows indicate the value of agronomic test (y) corresponding to 5 mg L⁻¹ extracted with CaCl₂ (x)

2.5.2 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.* (2016 *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 (Figura 2.2), se puede inferir que no habría antagonismo entre productividad del cultivo de papa y la sostenibilidad ambiental del sistema de producción.

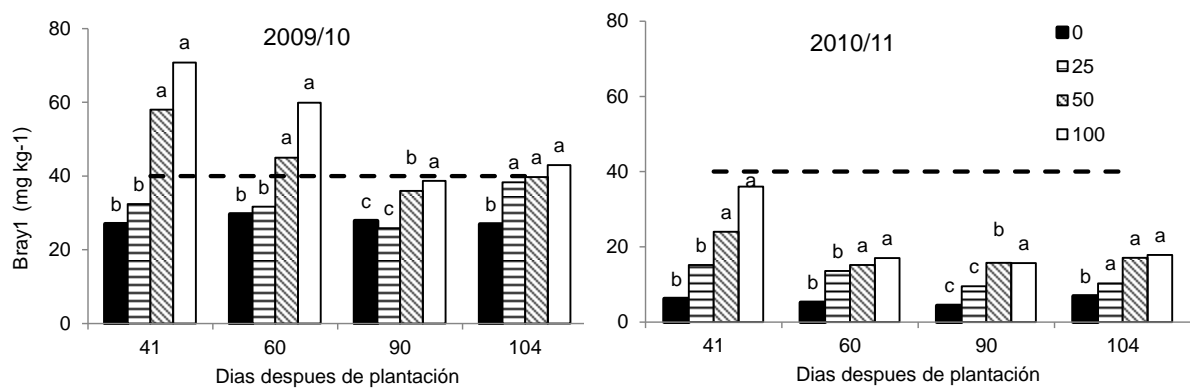


Figura 2.3: Fósforo extractable Bray1 en muestras de suelo (0-20 cm) cultivado con papa y fertilizado con 0, 25, 50 o 100 kg P ha⁻¹, durante dos estaciones de crecimiento (2009/10 y 2010/11).

La línea representa el valor límite de riesgo ambiental de pérdida de P.
Letras distintas indican diferencias significativas (p ≤ 0,05)

Figure 2.3: 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 ≤ 0,05)

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 2.4). 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 (Figura 2.3). 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 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 (Figura 2.3). 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 H₂PO₄⁻ / HPO₄²⁻ en la solución suelo aún en etapas avanzadas del crecimiento (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 2.4). 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 (Figura 2.4).

Tabla 2.4: Resumen del efecto de la estación de crecimiento (año), dosis de fósforo (P) y tiempo transcurrido desde la fertilización (ddp) sobre Bray1 y el fósforo extraído por el cultivo de papa.

Table 2.4: Summary of the effect of the growing season (year), phosphorus rate and time since fertilization (ddp) on Bray1 and phosphorus extracted by the potato crop.

Factor	Bray1 Pr>F	P Fósforo extraído
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

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 (Figura 2.3). 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 momento del ciclo del cultivo (Figura 2.3). 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.

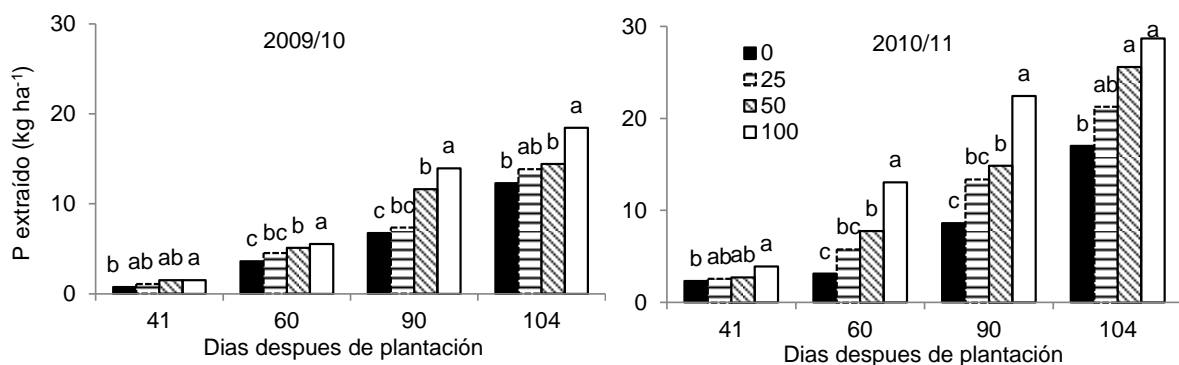


Figura 2.4: Evolución de la cantidad de fósforo (P) extraído por el cultivo de papa, en dos estaciones de crecimiento (2009/10 y 2010/11).

Letras distintas indican diferencias significativas (p ≤ 0,05)

Figure 2.4: Evolution of the amount of phosphorus (P) extracted by the potato crop, in two growing seasons (2009/10 and 2010/11).

Different letters indicate significant differences (p ≤ 0,05)

2.6 CONCLUSIONES

Las regresiones entre los métodos agronómicos de determinación de P del suelo (Bray1, Mehlich3 y Olsen) y con el método ambiental (CaCl_2) 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.

2.7 BIBLIOGRAFIA

- Atia, AM & A.P. 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* J.T. Sims and A.N. 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 García. 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, H.E.; García, F.O. (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. *TheScientificWorld 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 Flaten. 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 Ehlert; V Genot; G Hofman; K Goulding; J Recknagel; G Provolò & P Barraclough. 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 Černý; 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* J.T. Sims and A.N. 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*. - 1º 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, J E; 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 & J T 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 & D.J. 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. J.L. 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; Ma, W; Ji, Y; Fan, M; Oenema, O & F Zhang. 2008. Efficiency, economics, and environmental implications of phosphorus resource use and the fertilizer industry in China. *Nutr Cycl Agroecosyst* 80:131-144.

CAPÍTULO 3:
DIAGNÓSTICO DE FERTILIZACIÓN
FOSFATADA

COMPARISON OF PHOSPHORUS FERTILIZATION DIAGNOSTIC METHODS OF POTATO IN MOLLISOLS

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

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

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

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

3.1 ABSTRACT

The aim of this research was to provide tools for the profitable and environmentally friendly phosphorus (P) fertilization of potato crops. The objectives were: i) to examine the relationships between the available soil P index (Pav), as determined by Bray1, Mehlich3, Olsen and CaCl₂ in Mollisols, and potato yields and ii) to identify the P fertilization rates required to obtain the maximum agronomic yields, considering the environmental risk of P loss. The study was conducted from 2005 to 2014 in soils with a wide range of initial available P levels (8.6-50.0 mg kg⁻¹ Bray1; from a depth of 0 to 20 cm) in which irrigated potato crops fertilized with P were cultivated. The linear-plateau, quadratic-plateau and Cate-Nelson models were used to analyze crop responses to P and to determine the P threshold (Pt) required identifying soils with positive responses to P fertilization. The Pt was 32 mg kg⁻¹ for Bray1 and Mehlich3, 11 mg kg⁻¹ for Olsen and 2.8 mg kg⁻¹ for CaCl₂. Recommended P rates were defined based on the initial soil Pav index, the quantity of P removed by the crop for a specific yield, the P required to increase the initial soil P to the Pt, and the environmental Pt. Soil Bray1 determined postharvest confirmed that the P fertilizer recommendation was appropriate.

Key words: Soil extractable P; Agronomic optimum; Soil P tests.

Abbreviations

Pt = available P threshold (soil test value above which there is no significant crop response to P fertilization).

Pav = any soil P test value (Bray1, Mehlich3, Olsen, CaCl₂).

RY = relative yield (%). It was calculated for each trial as follows: (mean yield of the unfertilized treatment / mean yield of the fertilized treatment with the highest yield)*100.

YD = difference in yield (Mg ha⁻¹). It was calculated for each trial as follows: mean yield of the unfertilized treatment - mean yield of the treatment with the highest yield.

3.2 INTRODUCTION

The vast area planted with potato (18 million ha) and the significant level of potato (*Solanum tuberosum* L.) production (about 290 million Mg) make this crop one of the world's main staple foods, the fourth in importance after wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), and rice (*Oryza sativa* L.) (He and Honeycutt, 2012). The potato has traditionally been considered to have a relatively high P requirement and to be somewhat inefficient at accessing soil P (Iwama, 2008; Rosen et al., 2014; Fixen and Bruulsema, 2014). In studies in Minnesota (USA), Rosen and Bierman (2008) measured a total potato P uptake of from 37.4 to 49.6 kg P ha⁻¹ for a Russet Burbank crop, while Mohr and Tomasiewicz (2011) have reported lower P uptakes (18.7 to 23.4 kg P ha⁻¹) in western Canada.

Appropriate crop nutrition is essential for profitable crop production (Rosen et al., 2014). The P requirements of a particular crop can normally be determined using a diagnostic method based on soil analysis (Echeverría and García, 2015; Rosen et al., 2014, Johnston et al., 2013), since soil tests provide information about possible crop responses to P fertilization. The calibration of an extraction method identified a threshold or critical value (Pt) above which no fertilizer response is expected. In the case of Argentina, assessments of soil P fertility levels for agricultural soils tend to be based on the Bray1 test (Sims, 2009) and determined from soil surface samples (0-20 cm) taken before the crop is planted. This Pav index has been used to define P fertilization requirements for wheat, corn, sunflower, and soybean crops (Echeverría and García, 2015), but this type of information is not available, in the above mentioned areas, for potato crops. Soil Pt for potatoes may vary according to the analytical test and mathematical model used to quantify the relationship between Pt and potato yield responses. Based on Pt, the results of soil analyses can be interpreted and the degree of sufficiency, or deficiency, can be identified (Echeverría and García, 2015).

After determining a Pt in a given soil, it is important to establish the fertilizer application rate required to produce the maximum yield. Obtaining an appropriate P rate is necessary to ensure healthy soils (without either a P-deficiency or P-accumulation and with balanced nutrition), and to prevent or reduce eutrophication and pollution. Furthermore, increasing concerns around the long-term availability and accessibility of the world's main source of P, phosphate rock, means that there is a need to investigate sustainable measures to protect the world's food systems against the potential long and short-term impacts of a global P scarcity (Van Vuuren et al., 2010; Cordell and White, 2013).

A better understanding of the impact of P management on irrigated potato systems is required to ensure that fertilization practices provide sufficient P to optimize crop yield and concurrently prevent the application of excess P. The general objectives of the current study were: to assess the impact of P fertilization, triple superphosphate, on crop yield, plant requirements and soil nutrient status for irrigated potato, and to provide information to help refine P management recommendations. The specific objectives of this study were: 1) to examine the relationships between the potato yield response and soil Pav index determined by the Bray1, Mehlich3, Olsen and CaCl₂ tests in Mollisols, and 2) to establish the P fertilization

rates which provide the maximum agronomic yield, considering the environmental risk of P loss.

3.3 MATERIALS AND METHODS

This study was conducted over seven growing seasons (from 2005 to 2014) in soils with a wide range of initial available P concentrations. In total, the study analyzed 13 (site-years) trials. Field experiments were conducted in the Southeastern Buenos Aires Province, Argentina. The experimental sites were located in Maipú, General Madariaga, Balcarce, Miramar, and Lobería counties, with a total area of 17,431 km² (Table 3.1). The predominant soil types found in the area were Typic Argiudolls, which are non-calcareous soils, with no evident limitations for agricultural use. The climate is humid, sub-humid and mesothermal. The regional water balance is deficient (90-190 mm) during the period in which the crop is most sensitive to yield loss due to a lack of water: at tuber initiation and tuber filling (Suero et al., 2001). As a result, from tuber initiation to tuber bulking, sprinkler irrigation was applied when the soil moisture level in the soil profile (0-20 cm) was close to field capacity. On average, 20 mm of water were added at 5-7 day intervals. Some of the main characteristics of the experimental trials are presented in Table 3.1.

Capítulo 3: *Diagnóstico de fertilización fosfatada*

Table 3.1: Location, some of the soil characteristics (0-20 cm depth) before planting the potato crop; climate conditions during the growing seasons; and management information for the individual trials.

Trial	Latitude	Longitude	Bray1	Mehlich3	Olsen	CaCl ₂	pH [†]	Organic matter	Rainfall [‡]	Previous crop [§]
			----- mg kg ⁻¹ -----					g kg ⁻¹	mm	
1	-37.86°S	-58.17°W	19.3	18.5	10.4	1.4	6.2	52	530	Pasture
2	-37.38°S	-58.10°W	27.8	28.0	11.4	2.8	6.0	42	870	Soybean
3	-38.14°S	-60.07°W	33.1	33.2	14.6	2.9	6.1	52	534	Potato
4	-37.68°S	-57.97°W	15.4	20.1	6.9	1.0	5.8	52	628	Pasture
5	-37.73°S	-58.36°W	14.5	16.0	6.8	0.8	5.8	52	586	Potato
6	-37.31°S	-58.17°W	22.1	26.0	5.7	2.1	6.1	54	758	Wheat/soybean
7	-37.85°S	-59.41°W	8.6	7.3	5.3	0.2	6.2	54	642	Pasture
8	-37.91°S	-58.23°W	29.0	26.0	15.0	2.8	5.9	58	567	Soybean
9	-37.19°S	-58.32°W	11.1	10.1	6.0	0.5	6.6	38	705	Potato
10	-37.76°S	-57.96°W	45.0	44.6	15.5	5.5	5.9	61	513	Wheat/soybean
11	-37.28°S	-57.75°W	20.0	24.5	8.8	1.3	5.9	65	604	Soybean
12	-37.20°S	-59.44°W	19.0	15.2	7.7	1.3	6.0	50	640	Wheat/soybean
13	-38.23°S	-58.80°W	19.1	15.7	8.6	1.4	6.0	56	604	Sunflower

[†]Soil: water 1:2.5; [‡] Mean rainfall during crop growing season; [§]Pasture (*Bromus* sp., *Stipa* sp., *Lolium multiflorum*, *Lotus tenuis*, *Paspalum dilatatum*, Soybean (*Glycine max*), Potato (*Solanum tuberosum* L.), Wheat (*Triticum aestivum*), Sunflower (*Helianthus annuus*).

A randomized complete block design consisting of three replicates of four or six P fertilizer rates (0, 25, 50, 100, 150 and 200 kg P ha⁻¹; Table 3.2) was established. Each experimental plot consisted of 12 rows (each row was 10 m long and the rows were spaced 0.85 m apart). Soil samples were collected before the crop was planted and fertilized. Each sample consisted of 10 sub-samples (2.25 cm diam.) taken from a depth of 0 to 20 cm. The samples were air-dried, crushed to pass through a 0.5 mm sieve, and then kept at room temperature until they were submitted for laboratory analyses. The available Pav index was quantified using four different soil methods: the Bray and Kurtz 1 (Bray1), Mehlich3, Olsen and CaCl₂ methods (Sims, 2009). The amount of inorganic P was determined colorimetrically by the molybdenum blue method (Sims, 2009). The P concentration determined in soil samples collected before the crop was planted and fertilized will be hereafter referred to as the “initial soil P”.

*Aceptado en Agronomy Journal doi: 10.2134/agronj2015.0467; Date posted: February 24, 2016
ISSN: 0002-1962 (Print) 1435-0645 (Online)*

Capítulo 3: *Diagnóstico de fertilización fosfatada*

Table 3.2: Average total tuber yields depending on P fertilization (0. 25. 50. 100. 150 and 200 kg P ha⁻¹).

Trial	Average potato yield with P rates †							Average
	0	25	50	100	150	200	Pr> F	
	----- Mg ha ⁻¹ -----							
1	49.1	55.5	62.8	69.7	-	-	**	59.3
2	36.6	39.3	39.1	42.2	-	-	ns	39.3
3	44.6	46.6	44.2	45.9	-	-	ns	45.3
4	30.6	41.1	42.0	47.8	-	-	*	40.4
5	54.1	59.2	67.2	75.3	-	-	**	64.0
6	37.1	39.9	43.9	45.9	-	-	**	41.7
7	44.7	64.4	65.7	73.5	-	-	**	62.1
8	66.3	-	-	65.1	-	75.6	ns	69.0
9	49.4	53.6	64.0	67.5	-	75.5	**	62.2
10	58.5	65.3	66.1	70.5	-	-	ns	65.1
11	63.7	64.5	70.8	77.2	81.2	75.5	*	72.2
12	43.5	50.4	54.2	57.2	60.7	65.1	*	55.2
13	46.9	51.5	55.0	57.9	65.4 a	62.9	**	56.6
Average	48.6	52.0	56.2	61.5	69.1	70.9	**	56.3
ANOVA			Pr>F					
Trial			<0.0001					
Rate			<0.0001					
Trial*Rate			0.0296					

ns: not statistically significant; *P< 0.05; **P<0.01

The soil was prepared for planting using a disk harrow, chisel and vibrocultivator. Innovator cultivar was planted in all trials. It is a cultivar obtained in the Netherlands (HZPC), widely used in Argentina and Europe, and currently in North America. It is a cultivar (120–130 days from planting to crop maturity) with high dry matter content, very good for potato sticks. Planting was carried out between mid-October and mid–November, using a four-row planter, and the crop was harvested 110-120 days later (between mid-February and mid-March). The

Aceptado en Agronomy Journal doi: 10.2134/agronj2015.0467; Date posted: February 24, 2016

ISSN: 0002-1962 (Print) 1435-0645 (Online)

“planting” tubers were pretreated with appropriate commercial fungicides and insecticides at the recommended commercial rates. The average potato seed piece weight ranged from 45 to 50 g and the planting density used was 4.5 cuts m⁻¹. Phosphate fertilizer (Triple superphosphate, 18% P) was row-applied at planting (at about 10 cm from the center row and 4-6 cm below the seed piece). In order to maintain the appropriate level of N, urea [(NH₂)₂CO] (46% N) was added to each plot according to the following scheme: 120 kg N ha⁻¹ at planting and 100 kg N ha⁻¹ at hilling. Hilling was carried out before the crop reached full ground cover (about 50 days after planting). Specific commercial agrichemicals were used to control disease and pests and mechanical and chemical methods were used for weed control, with applications following recommended local practices (Caldiz, 2006). Before planting, the herbicide Metholachlor (2-Chloro-*N*-(2-ethyl-6-methyl-phenyl)-*N*-(1-methoxypropan-2-yl) acetamide) was applied at a dose of 1-3 L ha⁻¹ and incorporated using a disc harrow. After planting, the pre-emergence herbicide Metribuzin (C₈H₁₄N₄OS) was applied, at a rate of 0.8 L ha⁻¹, to control broadleaf weeds. Insecticides and fungicides were systematically applied by spraying, on a weekly basis, after the plant had reached a height of about 15 cm. Diseases that normally appear in potato crops, such as *Alternaria solani* and *Phytophthora infestans*, were controlled using contact and systemic products, with the product applied depending on the degree of disease. The most widely used systemic fungicide was Mancozeb [(C₄H₆MnN₂S₄)_x(Zn)_y], applied at a rate of 2.5 kg ha⁻¹, with about twelve applications being made during the growing season in each trial. The contact fungicide Chlorothalonil (C₈Cl₄N₂) was applied at a rate of 1 L ha⁻¹, with two applications being made during the growing season in each trial.

Shoot and tuber biomass were measured in trials 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 and 11. The crop was harvested 104 days after planting; four meter-long-sections of the two central rows of each plot were hand-harvested. Shoots and tubers were weighed while fresh and subsamples were separated for dry matter (DM) determination and laboratory analyses. Subsamples (approximately 200 g) were dried at 60°C in a forced draft oven, for 7 d., mechanically shredded, passed through a 1 mm screen in a Wiley mill and then stored at room temperature before laboratory analyses. The P concentration in plant tissue was determined by digestion with HNO₃-HClO₄ (Saunders and Williams, 1955) and the inorganic P concentration of the solutions was determined using the colorimetric technique (Murphy and Riley, 1962). The total P uptake by the crop was calculated by adding the P contents of the shoots and tubers.

Tuber yields were evaluated by hand-harvesting four meter-long-sections of the two central rows of each plot, after previous haulm killing. Paraquat (C₁₂H₁₄Cl₂N₂) was applied to kill the foliage a week before harvest. Each plot sample was weighed to obtain the total fresh yield and subsamples were separated for dry matter (DM) determination. This was done 104 days after planting and the P concentration in potato tubers was determined as previously described for plant tissue. Tuber yield, DM, and tuber P concentration values were used to calculate the P exported by the crop at harvest.

The potato yields obtained from the field experiments were used to obtain 2 different results:

i. - Yield responses to P fertilization were expressed as the yield difference (YD) and the relative yield (RY). YD was calculated for each trial by subtracting the mean yield of the unfertilized treatment from the mean yield of the treatment with the highest yield. The RY was calculated for each trial by dividing the mean yield of the unfertilized treatment by the mean yield of the fertilized treatment with the highest yield and then multiplying the result by 100. The non P-limited yield was considered the average for the highest yielding treatments that were not statistically different based on the Contrast analysis ($P < 0.05$; Table 3.2).

For each trial, the mean yield response (YD or RY) was plotted against the initial soil Pav index (Bray1, Mehlich3, Olsen or CaCl_2) determined from the soil samples collected before the crop was planted.

Soil Pt values were estimated for each extraction method using segmented models (linear-plateau and quadratic-plateau models) and the Cate-Nelson graphic method. The Pt for the segmented model is the concentration at which the two parts of the model join. The Pt for the Cate-Nelson model is the concentration that splits the data into two groups; this was determined at 94-96% of the maximum yield response.

ii. -Recommended P rates were based on the initial soil Pav index, the quantity of P removed by the crop for a specific yield, and the quantity of P required to change the initial soil P to Pt, as follows:

- In soils with an initial soil P lower than Pt, the recommended P rate (kg ha^{-1}) was obtained by taking in account the total quantity of P extracted by the crop for a specific yield (Fig. 1) plus the P required to change the initial soil P Bray1 to Pt ($4.13 \text{ kg P ha}^{-1}$ to increase 1 mg kg^{-1} of Bray1; Rubio et al., 2008).

- In soils with an initial soil P greater than Pt, but lower than the environmental P threshold, the agronomic P rate was equal to the total quantity of P extracted by the crop for a particular yield (Fig. 1). The environmental P threshold values determined by Zamuner et al. (2015) for the soils in the region were 39, 34 and 27 mg kg^{-1} for Bray1, Mehlich3 and Olsen, respectively.

- In soils with initial soil P levels that were greater than environmental P threshold, the recommendation was not to apply fertilization.

Soil samples were collected from each plot after the final harvest in fall. This was done by hand sampling 10 cores per plot at depths of 0 to 20 cm. The soil cores within each plot were thoroughly mixed, air dried, and then ground. The concentration of Bray1 was determined in the same way as the initial P.

Statistical analysis

The statistical analyses were performed using SAS Statistical Analysis Systems (SAS 9.1, 2002). The analysis of variance (ANOVA) for the effect of P fertilization on both fresh tuber yield was performed using the PROC MIXED procedure for a split-plot design with three randomized blocks. The main plot was considered the trial, and the sub-plot was the P rate. Since the

interaction trial x P rate was significant ($P < 0.05$), contrast analysis was used to evaluate the relationship between total potato yield and P rate. To describe the potato yield response to P fertilization, three statistical models (linear-plateau; quadratic-plateau and Cate-Nelson procedure) were fitted. In the three models, y was the tuber yield response (Mg ha^{-1}), x was the available Pav index previous to crop planting and a , b and c were parameter estimates obtained from the Nonlinear Model (PROC NLIN) for segmented models. The coefficients of determination (R^2) were computed from the analysis of variance provided by SAS. The analysis of residues (measured yields minus calculated yields) was also used as a criterion to evaluate the linear-plateau; quadratic-plateau models. A statistical test based on the values of two parameters: W and P (Shapiro-Wilk test), was used to determine whether the residues of each of the models were normally distributed.

Regression analyses (PROC REG) were used to study the relationships between uptake P vs exported P and uptake P vs Potato yield.

3.4 RESULTS

3.4.1 Relationships between the potato yield response to P fertilization and soil extractable P

Potato yields ranged from 31 to 81 Mg ha^{-1} across the different trials and P rates and were significantly influenced by: trial, P rate and the interaction of the two. Phosphorus fertilization produced significant increases in yield in 9 of the 13 experiments (Table 3.2). On average, the unfertilized plots yielded 22 Mg ha^{-1} less than those fertilized with the highest P rate; as a result, the RY of the unfertilized plots was 68% of that obtained from the plots fertilized at the maximum P rate.

The associations between quantities of available P removed by each extractant were evaluated previously (Zamuner et al., 2015). The results showed that the Bray1 method extracted the greatest amount of P while Mehlich3 P, Olsen and CaCl_2 removed respectively 10, 25, and 87% less P than Bray1. A linear and significant association was found between them ($p < 0.001$). The ability of each soil Pav index to predict the potato response to P fertilization is presented in Figure 3.1 and Table 3.3. For all P extractants, despite having few points at the higher soil P levels, YD decreased and RY increased as the soil test values increased, up to a point at which P no longer limited yield (Figure 3.1). When the linear-plateau and quadratic-plateau models were used, all the relationships between the crop response and P extractant were significant ($P < 0.05$). Both models explained a large proportion of the variability indicated by R^2 , with this being greater than 0.70 in most cases. The differences between the R^2 values obtained when using RY (0.86-0.96) were smaller than those obtained using YD (0.65-0.81). A Shapiro-Wilk test showed that the residual values obtained from all the models for the potato yield responses and P extractants were normally distributed (Table 3.3). Only the residues from the CaCl_2 extractant vs YD quadratic-plateau model did not have a normal distribution (Table 3.3); so Pt value is not indicated in Table 3.3 and Figure 3.1.

Capítulo 3: *Diagnóstico de fertilización fosfatada*

Table 3.3: Statistical models used to describe the relationships between soil P concentrations determined with different extractants (x) and total yield response to P fertilization of the potato crop (y).

P extractant	Yield Response [†]	Model [‡]	a	b	c	Pr> F [§]	R ²	Shapiro Wilks test	Pt [¶] mg kg ⁻¹	
Bray 1	YD (Mg ha ⁻¹)	LP		-0.996 ±0.209	33.904 ±4.057	**	0.79	W= 0.85; P= 0.0547	x=31	
		QP	0.023 ±0.003	-1.950 ±0.086	41.605 ±2.665	**	0.75	W= 0.89; P= 0.1511	x=38	
		CN	NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=32	
	RY (%)	LP			1.252 ±0.129	52.598 ±2.512	**	0.96	W= 0.94;P= 0.6508	x=33
		QP	-0.024 ±0.007	2.218 ±0.402	44.175 ±4.872	**	0.95	W= 0.97; P= 0.9177	x=36	
		CN	NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=32	
Mehlich 3	YD (Mg ha ⁻¹)	LP		-1.045 ±0.184	32.586 ±3.657	**	0.81	W= 0.91; P= 0.3422	x=27	
		QP	0.016 ±0.015	-1.8593 ±0.690	38.641 ±7.071	**	0.80	W= 0.90; P= 0.2951	x=37	
		CN	NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=33	
	RY (%)	LP			1.300 ±0.1671	53.610 ±3.322	**	0.96	W= 0.89; P= 0.2472	x=31
		QP	-0.274 ±0.010	1.773 ±0.166	50.204 ±2.549	**	0.95	W= 0.93; P= 0.5658	x=36	
		CN	NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=32	
Olsen	YD (Mg ha ⁻¹)	LP		-3.902 ±1.099	45.105 ±8.529	*	0.65	W=0.96; P= 0.8320	x=10	
		QP	0.413	-9.064	62.273	*	0.65	W= 0.97; P =	x=12	

Capítulo 3: *Diagnóstico de fertilización fosfatada*

			±0.036	±0.254	±4.071			0.9211	
	CN		NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=11
CaCl ₂	RY	LP		5.307	33.784	**	0.86	W= 0.86; P=	x=11
	(%)			±0.921	±7.422			0.0752	
		QP	-0.516	11.571	12.121	**	0.83	W= 0.97; P= 0.881	x=13
			±0.134	±2.822	±4.063				
	CN		NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=11
CaCl ₂	YD	LP		-	28.192	*	0.69	W=0.94; P=	x=1.6
	(Mg ha ⁻¹)			11.404	±5.148			0.6583	
		QP	2.185	-	29.712	*	0.67	W= 0.50; P=	NA
			±0.648	15.024	±2.701			<0.0001	
			±0.465						
	CN		NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=3.0
CaCl ₂	RY	LP		11.146	61.441	**	0.94	W= 0.87; P=	x=2.8
	(%)			±1.461	±2.306			0.1367	
		QP	-1.350	13.604	60.122	**	0.87	W= 0.89; P=	x=4.9
			±1.309	±2.471	±1.584			0.2605	
	CN		NA	NA	NA	NA	NA	NA	x=2.8

[†] YD=differences in yield between the fertilized treatment with the highest yield and the unfertilized plots; RY= calculated for each trial by dividing the mean yield of the unfertilized plots by the mean of the highest P fertilization treatment and multiplying the result by 100.

[‡] LP = linear-plateau; QP = quadratic-plateau; CN= Cate and Nelson; c: quadratic coefficient. b: linear coefficient; a: intercept; R²: Coefficient of determination; ±Data represents Standard Error

[§] ns: not statistically significant; *P< 0.05; **P<0.01.

[¶] Pt = available P threshold. x=soil P (mg kg⁻¹). The equation shown applies for x values below the critical P value at which the two parts of the model join.

NA= not applicable.

Even so, the models were adequate for explaining: the potato response to P fertilization; they produced a wide variety of Pt (Table 3.3). The Pt values ranged from 31 to 38 mg P kg⁻¹ for the Bray1 test, from 27 to 37 mg P kg⁻¹ for the Mehlich3 test, from 10 to 13mg P kg⁻¹ for the Olsen test, and from 1.6 to 4.9 mg P kg⁻¹ for the CaCl₂ test (Table 3.3). The Pt values defined by the

quadratic-plateau model approach were usually higher than those identified by both the linear-plateau model and Cate-Nelson approaches (Table 3.3, Figure 3.1).

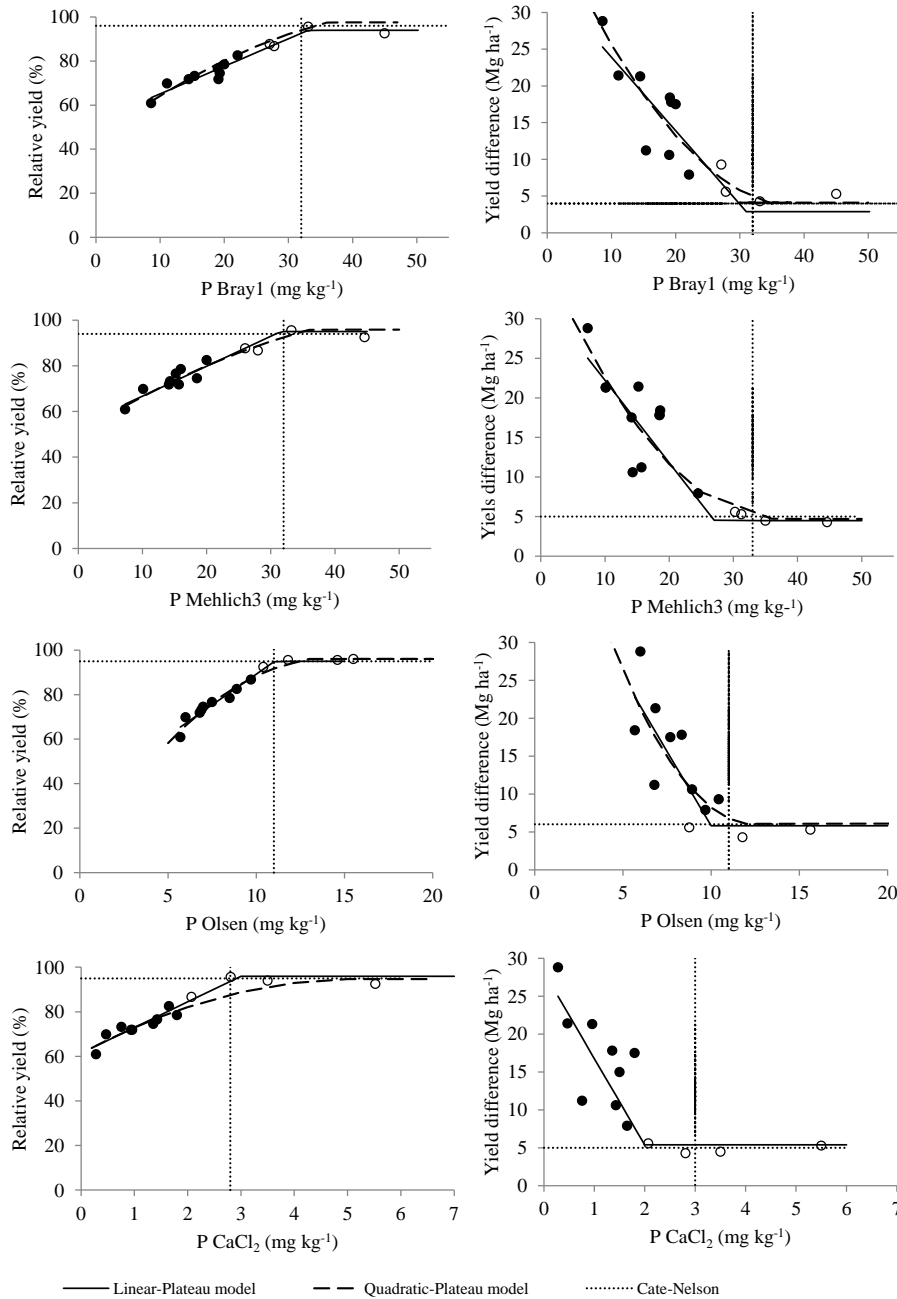


Figure 3.1: Relationships between extractable soil P determined before crop planting for different tests (Bray 1, Mehlich 3, Olsen and CaCl₂) and the differences in yield (yield of the fertilized treatment with the highest yield and that for the unfertilized plot) and the relative yield. Solid symbols indicate trials in which the effects of fertilization on yield were statistically significant.

3.4.2 The P rate for maximum yield

The total potato dry biomass (tuber + aerial biomass) at 104 days after planting ranged from 9.62 to 32.06 Mg ha⁻¹, and P concentration for shoots and tubers ranged from 1.44 g kg⁻¹ to 3.59 g kg⁻¹ depending on the P rate and trial (data not shown). Total amount of P uptake by potato crop varied from 14.04 to 45.53 kg ha⁻¹ (Figure 3.2). The initial soil Pav index (Table 3.3), the quantity of P uptake by the crop for a specific yield (Figure 3.2), and the quantity of P required to change the initial soil P to Pt, were used to estimate P rates for maximum yield of irrigated potato crops (Table 3.4).

Table 3.4: Recommended phosphorus rates (kg P ha⁻¹) for irrigated potato crops with different goal yields and initial available P indexes (Pav index).

Goal yield (Mg ha ⁻¹)	Initial Pav index					
	Bray1-Mehlich3 ^a	10	20	30	32-39	>40
	Olsen	5	8	10	11-27	>27
	CaCl ₂	0.4	1.5	2.6	2.8-5.0	>5.0
30		106	65	24	15	0
50		116	75	34	26	0
70		127	85	44	36	0

[†] Soil P extracted with Bray1 or Mehlich3 in soil samples (0-20 cm) taken before crop planting.

3.5 DISCUSSION

3.5.1 Relationships between the potato yield response to P fertilization and soil extractable P

In the southeast region of Argentina, the average potato yield is about 40 Mg ha⁻¹, although yields can exceed 70 Mg ha⁻¹ (Caldiz, 2006). In our experiments, the average yields (56.3 Mg ha⁻¹) were higher than the regional average (Table 3.3.2). This may be explained by the fact that to calculate the average yield of the region, Caldiz (2006) used data relating to long, intermediate and short cycle cultivars (Di Benedetto, 2005). The environmental conditions of the region were probably not very favorable for expressing the yield potentials for all the cultivars (the thermal sum during the crop cycles for the southeast region was 1889.5 °Cd), but this is also appropriate for the cultivar grown in our experiments, which was an intermediate maturing cultivar.

Phosphorus fertilization increased the yield in most of the trials (Table 3.3.2). Increases in tuber yields have been associated with P fertilizer application, but the frequency and magnitude of these yield responses may be influenced by both soil and plant factors.

According to our results, positive yield responses with P applications were associated with low or medium soil test P levels, which was in agreement with several other reports (Eremeev et al., 2009; Rosen and Bierman, 2008; Sanderson et al., 2003; Hegney et al., 2000). On Prince Edward Island (Canada), P application always increased the total tuber yield for the Russet Burbank cultivar, but only for 1 in 3 years for the Shepody cultivar (Sanderson et al., 2003). However, none of these publications referred to the cultivar evaluated in the present study; this demonstrates the need for information regarding P responses in this cultivar.

In our case, all the Pav indexes were suitable for explaining variations in potato yield response in neutral to slightly acidic soils (Table 3.3, Figure 3.1). The amount of P removed varied widely with the extractant (Figure 3.1), with each one removing different portions of inorganic P. The greatest soil P concentration range (5-45 mg kg⁻¹) was determined with the Bray1 and Mehlich3 approach, while the lowest concentration was recorded with CaCl₂ (0.2-5.5 mg kg⁻¹). The Bray1 and Mehlich3 approaches are simple, rapid tests with similar mechanisms for P removal, as they both involve acidic solutions containing ammonium fluoride (Sims, 2009). The possibility of quantifying other nutrients besides P in a given chemical procedure (Schroder et al., 2009; Kulhánek et al., 2014) makes the Mehlich3 fertilization diagnostic methods more advantageous than the others. The Olsen test removes less P than the acidic extractants and is most appropriate for alkaline and calcareous soils (Sims, 2009). Since, only a relatively low proportion of soils in Argentina present slightly alkaline pHs (Sainz Rozas et al., 2011), it is important to have information available about Olsen's ability to predict potato crop response yield under these conditions. The CaCl₂ test is the one which removes the smallest quantities of P because this extractant only allows us to determine the P present in the soil solution (Pote et al., 1996). In soils with low P availability, the very low absorbance values obtained during P quantification often result in systematic errors in spectrophotometric measurement (Harris, 2007), so the use of cuvettes with longer optical paths were required to reduce errors (Atia and Mallarino, 2002; Paulter and Sims, 2000). The need for special action may, however, limit the use of this technique in routine laboratory analyses. Because P is directly associated with surface water quality degradation when runoff occurs, careful management of this nutrient has become increasingly important, this is a promising CaCl₂ test for making joint predictions of P availability for potato crops and environmental risk evaluations.

The coefficients of determination of the relationship between extractable P and YD were usually lower than those of the relationship extractable P and RY because the former does not take into account the variation between sites caused by climatic and soil conditions. On the basis of the analysis of the R² and the residues (Table 3.3), we think that the quadratic-plateau and linear-plateau models provide adequate explanations for the potato response to P addition under our soil conditions. In line with other reports (Mallarino, 2003), the Pt defined by the quadratic-plateau model was usually higher than those identified by the Cate-Nelson and linear-plateau approaches (Table 3.3, Figure 3.1). We prefer to use the Pt values obtained with the linear-plateau or Cate-Nelson models to assess fertilizer recommendations because these two methods are more conservative and allow lower rates of P fertilizer.

The effectiveness of the methodology used to estimate the Pt value was corroborated by the results from our field trials. However, in trials 2, 3, 8, and 10, in which there was no response to P fertilization (Table 3.2), the Bray1 model gave results that were closer to or higher than the Pt value (Table 3.3). The Pt value of 32 mg P kg⁻¹ determined by the Bray1 test could therefore serve as a useful diagnostic tool for predicting phosphate fertilization requirements for irrigated potato crops. Based on the linear-plateau and Cate-Nelson models, the Pt for the Mehlich3, Olsen and CaCl₂ tests should be approximately 31, 11, and 2.5 mg kg⁻¹, respectively (Table 3.3). Although a number of researchers have reported Pt values obtained using different tests and crops only a few of these were based on potato crops. Furthermore, many of these studies were conducted several years ago and with very different genetic materials and soil types, so the resulting Pt comparisons may not be appropriate.

In the soils in our area, the Pt (determined by the Bray1 test) was 15-16 mg kg⁻¹ for corn, 12-13 mg kg⁻¹ for soybean and 12 mg kg⁻¹ for sunflower (Garcia et al., 2015). Our results show that the Pt for potato was higher than for other summer crops and was associated with both the high P requirements of the crop and the characteristics of the potato root system (Fixen and Bruulsema, 2014; Hopkins et al., 2014). According to our results, potato exports less P per Mg of harvested product than cereals (about 2 kg P Mg⁻¹ on a dry basis). However, the total amount of P exported is greater for potato than for other crops when expressed in kg ha⁻¹, associated with its high fresh production per unit area (ha). The above mentioned crops normally extract up to 30 kg P ha⁻¹ (Ciampitti and Garcia, 2007) while the fertilized and irrigated potato crops remove up to 47 kg P ha⁻¹ (Figure 3.2).

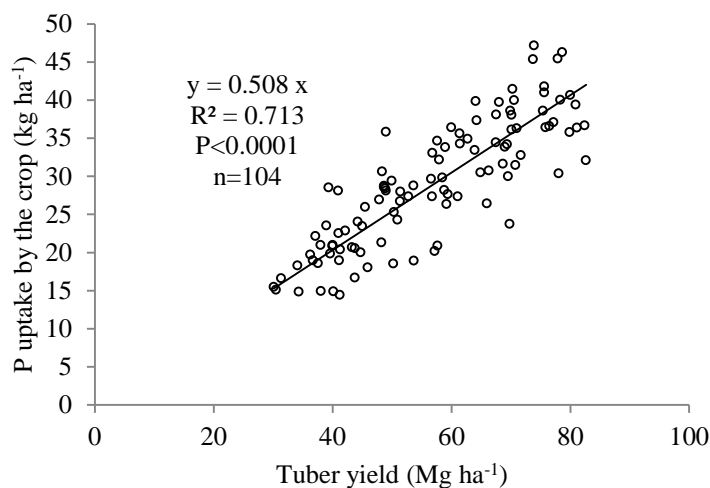


Figure 3.2: Relationship between fresh tuber yield and the maximum quantity of P uptake by the whole crop (aerial + tubers) at 104 days after planting).

3.5.2 The P rate for maximum yield

One important feature of a successful soil test is the ability to predict the amount of fertilizer that is needed to optimize crop yield (Table 3.4). The traditional approach, based only on an analysis of yield response to different P fertilizer rates, is only applicable to the region where the field experiments are conducted (Li et al., 2011). Regional differences in soil characteristics as well as differences in relative crop responses to P have contributed to divergent P fertility guidelines for different potato-growing areas and cultivars (Li et al., 2011; Stark et al., 2004). These P fertilizer recommendations are usually based on pre-season soil tests, plant requirements and yield goals. A combination of the nutrient sufficiency and build-maintenance approaches based on our information relating to the initial soil P_{av} index, the plant and soil requirements plus the yield goal was considered appropriate for defining adequate fertilizer recommendations for irrigated potatoes grown in our area. The objective of the P recommendation is to help move from either the P deficient level (very low P_{av} index) or environmental risk level (very high P_{av} index) to the P_t for a single-season crop. This approach is similar to that proposed by Li et al. (2011), but with some differences. Li et al. (2011) suggest increasing the size of the P fertilizer recommendation by 130–200% of the amount of the P taken up by the crop, under conditions of severe soil P deficiency, in order to build-up the soil P supply capacity. We also propose increasing the soil P content when the test value is less than the P_t . However, the recommended P rate is calculated by taking into account experimental information relating to both crop P requirements (Figure 3.2) and the amount of P required to build up the soil P_{av} index (Rubio et al., 2008). Similarly to what Li et al. (2011) observed, when the initial P_{av} index = P_t , the amount of P fertilizer applied should be equal to crop removal, in order to maintain the same soil P level. When soil P is too high, no P fertilizer should be applied if we want to reduce excessive soil P reserves. Even though P losses due to leaching are generally small in most non-sandy soils, they may have significant environmental consequences (Sharpley et al., 2003).

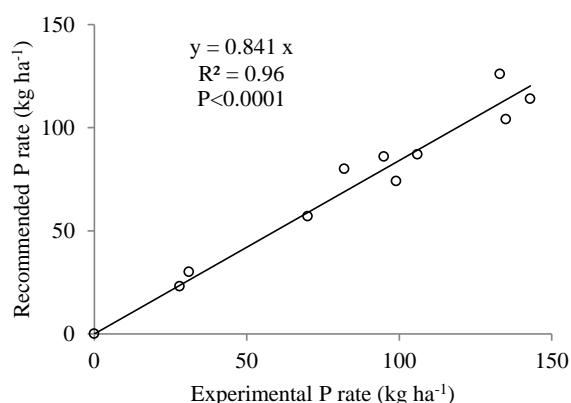


Figure 3.3: Relationship between experimental and recommended P rate needed to obtain a soil available P index Bray1=32.

Capítulo 3: *Diagnóstico de fertilización fosfatada*

x = Experimental P rate needed to obtain a soil P available index Bray1=32 on experimental data (Table 3.5); y = recommended P rate (Table 3.4).

Based on postharvest soil sampling, increasing P fertilizer rates resulted in a linear increase in the P Bray1 index, which varied from trial to trial (Table 3.5). Soil Bray1 determined at postharvest reflected the combined effect of crop yield, fertilizer efficiency and soil fertility, so it was used to check the P recommendation. The results of our research confirm that the methodology used for P recommendation is appropriate (Figure 3.3) because of the high R^2 values of the linear regression observed in our studies. This approach cannot be regarded as an agri-environmental model for the potato (Khiari and Parent, 2000; Sims et al., 2002) because no environmental risk measurements were performed, even though the bibliographic information about environmental P determinations was considered in the recommendation (Zamuner et al., 2015).

Table 3.5: Extractable phosphorus Bray1 after potato crops in soil samples (from depths of 0 to 20 cm).

Trial	Bray1 after potato crop											
	P fertilization rate (mg kg ⁻¹)						Linear regression †					P rate for Bray1=32
	0	25	50	100	150	200	a	b	Pr>F‡	R ²		
1	22.0	26.4	28.2	35.9	-	-	21.018± 0.131	0.132± .021	***	0.93	85	44
2	25.9	33.7	36.2	43.9	-	-	27.700±1.138	0.169±0.024	***	0.84	31	
3	27.8	28.5	39.8	40.5	-	-	27.847±0.167	0.142±0.038	**	0.59	28	
4	15.3	18.4	23.1	33.5	-	-	14.460± 0.956	0.185±0.017	***	0.92	95	
5	14.2	15.4	16.4	27.3	-	-	13.305±1.093	0.138±0.019	***	0.93	148	
6	21.3	22.3	32.9	35.4	-	-	21.280±1.894	0.153±0.033	***	0.68	70	
7	10.0	15.2	20.1	25.9	-	-	10.967±1.330	0.158±0.023	***	0.83	133	
9	16.3	16.3	15.2	18.9	-	44.0	11.477±2.156	0.143±0.021	***	0.78	143	
10	39.9	43.2	52.4	61.1	-	-	39.460±2.812	0.221±0.049	**	0.68	0	
11	16.5	14.6	14.6	22.7	28.5	69.3	7.147± 1.313	0.233±0.038	***	0.70	106	
12	18.2	18.3	24.8	21.4	34.4	52.1	18.84± 1.703	0.027±0.015	**	0.73	99	

† Coefficients for models describing relationships between P rate (x) and P Bray1 (y) determined at harvest (Depth: 0-20 cm); a: intercept; b: linear coefficient; R^2 : Coefficient of determination; ±Data represents Standard Error

‡ ns: not statistically significant; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$

3.6 CONCLUSIONS

The results of this research highlight the differences in the relationships between the potato yield response and the Pav indexes obtained using the Bray1, Mehlich3, Olsen and CaCl_2 approaches. Although all the P extractants were suitable for explaining variations in the potato yield response, the Pt soil test concentrations varied with the extractants; they were 32 mg kg^{-1} for Bray1 or Mehlich3, 11 mg kg^{-1} for Olsen, and 2.8 mg kg^{-1} for CaCl_2 . These different values could be used to establish whether soils are responsive to P fertilization. Moreover, the possibility of quantifying other nutrients besides P in only one procedure means that Mehlich3 offers advantages over other soil P extractant methods.

The experimental results allowed us to define recommended P fertilization rates according to initial soil fertility and yield goals. They showed that it is essential to carry out a soil analysis (assessed by any of the tests referred to) before planting the potato crop in order to define an appropriate P fertilization rate.

Acknowledgements

This paper presents partial results of the doctoral thesis (Universitat de Lleida) of Ing. Agr. Ester Zamuner and was financed with funds from research project of the National University of Mar del Plata AGR 447/14 and INTA Soil PN.

3.7 REFERENCES

- Atia, A.M., and A.P. Mallarino. 2002. Agronomic and environmental soil phosphorus testing in soils receiving liquid swine manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1696–1705.
- Caldiz, D.O. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. McCain Argentina SA, Balcarce-BASF Argentina SA, Capital Federal. Argentina. 226 p.
- Ciampitti, I.A., and F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. *Informaciones Agronómicas* N° 33, *Archivo Agronómico* N° 11. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. *Inf. agron. Cono Sur.* 33, 13-16.
- Cordell, D., and S. White. 2013. Sustainable Phosphorus Measures: Strategies and Technologies for Achieving Phosphorus Security. *Agronomy.* 3, 86-116.
- Echeverría, H. E. 2005. Papa. In: Echeverría, H. E., y García, F. O. (Eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Echeverría, H. E., and F.O. García, editors. 2015. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 1ra Edición. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, H.E., G. Ferraris, G. Gerster, F.H. Gutiérrez Boem, and F. Salvagiotti. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta a la fertilización en la región Pampeana. Resultados de la red de ensayos del proyecto Fertilizar – INTA. Fertilizar – INTA. Available at: www.fertilizar.org.ar
- Eremeev, V., I. Keres, B. Tein, P. Laaniste, A. Selge, and A. Luik. 2009. Effect of different production systems on yield and quality of potato. *Agron. Res.* 7, 245-250.

- Fixen, P.E., and T.W. Bruulsema. 2014. Potato Management Challenges Created by Phosphorus Chemistry and Plant Roots. *Am. J. Potato Res.* 91, 121-13.
- Harris, D.C. 2007. *Quantitative Chemical Analysis*. 2001. W.H. Freeman and Co., New York and Basingstoke Ed. 41 Madison Avenue, New York (NY) USA. 532 p.
- He, Larkin, and Honeycutt, (eds.) 2012. *Sustainable Potato Production: Global Case Studies*, pp. 1-539. Springer, Amsterdam, Netherlands.
- Hegney, M. A., I. R. McPharlin, and R.C. Jeffery. 2000. Using soil testing and petiole analysis to determine phosphorus fertilizer requirements of potatoes (*Solanum tuberosum* L. cv. Delaware) in the Manjimup-Pemberton region of Western Australia. *Aust. J. Exp. Agric.* 40,107-117.
- Hopkins, B.G., D.A. Horneck, and A.E. Mac Guidwin. 2014. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension. *Am. J. 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.
- Johnston, A.E., P.R. Poulton, and R.P. 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 Manag.* 29,12-21.
- Khiari, L., and L.E. Parent. 2000. An agri-environmental model for potato phosphorus recommendations. *Better Crops.* 84, 16-17.
- Kulhánek, M., J. Balík, J. Černý, F. Vašák, and S. Shejbalová. 2014. Influence of long-term fertilizer application on changes. *Plant Soil Environ.* 60, 151-157.
- Li, H., G. Huang, Q. Meng, L. Ma, L. Yuan, F. Wang, W. Zhang, Z. Cui, J. Shen, X. Chen, R. Jiang, and F. Zhang. 2011. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: A review. *Plant Soil.* 349, 157-167.
- Mallarino, A. 2003. Field calibration for corn of the Mehlich-3 soil phosphorus test with colorimetric and inductively coupled plasma emission spectroscopy determination methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1928-1934.
- Mohr, R.M., and J. Tomaszewicz. 2011. Effect of phosphorus fertilizer rate on irrigated Russet Burbank potato. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42, 2284-2298.
- Murphy, J., and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chemical Acta* 27, 31-36.
- Pautler, MC and J T Sims. 2000. Relationships between soil test phosphorus, soluble phosphorus and phosphorus saturation in Delaware Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:765–773.
- Pote, D.H., T.C. Daniel, P.A. Moore Jr, D.J. Nichols, A.N. Sharpley, and D.R. Edwards. 1996. Relating soil tests to runoff concentrations across five soil series. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 855-859.
- Rosen, C. J., and P.M. Bierman. 2008. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. *Am. J. Potato Res.* 85, 110-120.
- Rosen, C.J., K.A. Kelling, J.C. Stark, and G.A. Porter. 2014. Optimizing phosphorus fertilizer management in potato production. *Am. J. Potato Res.* 91, 145-160.

- Ruark, MD; KA Kelling and L Ward Good. 2014. Environmental Concerns of Phosphorus Management in Potato Production. *American Journal of Potato Research*. 91:132-144.
- Rubio, G., M.J. Cabello, F.H. Gutiérrez Boem, and E. Munaro. 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1721-1727.
- Sainz Rozas, H., H.E. Echeverría, and H. Angelini H. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las Regiones pampeana y extrapampeana argentina (In Spanish with English abstract). *Ciencia del Suelo*. 29, 29-37.
- Sanderson, J.B., J.A. MacLeod, B. Douglas, R. Coffin, and T. Bruulsema. 2003. Phosphorus research on potato in PEI. *Acta Horticulturae*. 619, 409-417.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release version 9.1. SAS Inst., Cary, NC.
- Saunders, W.M.H., and E.G. Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *Journal of Soil Science* 6: 254-267
- Schroder, JL; H Zhang and 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, A.N., T.C. Daniel, J. Sims, R. Lemunyon, R. Stevens, and R. Parry. 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service. ARS-149. 38 p. Available online: <http://www.ars.usda.gov/is/np/phos&eutro2/agphoseutro2ed.pdf>
- Sims, J. T., Maguire, R. O., Leytem, A. B., Gartley, K. L., and M.C. Pautler. 2002. Evaluation of Mehlich 3 as an agri-environmental soil phosphorus test for the Mid-Atlantic United States of America. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 2016-2032.
- Sims, J.T. 2009. Soil test phosphorus: principles and methods, in: *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residual and waters*. J.L. Kovar and G.M. Pierzynski (Eds.). Southern Cooperative Series Bulletin Nº 408. Available in: http://www.sera17.ext.vt.edu/Documents/P_Methods2ndEdition2009.pdf
- Stark, J., D. Westermann, and B. Hopkins. 2004. Nutrient management guidelines for Russet Burbank potatoes. University of Idaho College of Agricultural and Life Sciences. Available online <http://info.ag.uidaho.edu/pdf/BUL/BUL0840.pdf>
- Suero, E.E., J.N. Santa Cruz, A. Silva Busso, A. DellaMaggiara, A.I. Irigoyen, J.L. Costa, and J.M. Gardiol. 2001. Caracterización de los recursos naturales en sistemas bajo riego del sudeste bonaerense. Bases para propuestas de aplicación sustentable del riego. (In Spanish with English abstract). *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*. 30, 71-90.
- Van Vuuren, D.P., B. Bouwmana, and A.H.W. Beusen. 2010. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change* 20, 428-439.
- Zamuner, E.C., J. Lloveras, and H.E. Echeverria. 2015. Métodos agronómicos y ambientales de determinación de fosforo en Argiudoles del sudeste bonaerense. (In Spanish with English abstract). *Ciencia del Suelo*. 33:55-63.

CAPÍTULO 4:
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA
FERTILIZACIÓN FOSFATADA EN PAPA

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

Este Capítulo se basa en dos artículos: El primero, "Fertilización en papa: evaluación del agregado de un polímero al superfosfato", tiene como objetivo central obtener información de base (ensayos de macetas y a campo) que permita evaluar el efecto del tiempo, dosis y tipo de fertilizante (superfosfato triple de calcio sin y con agregado del polímero Avail) sobre la disponibilidad de P en el suelo a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo de papa. Dado que los resultados obtenidos en este trabajo provenían de un año de investigación, el segundo trabajo "Dosis óptima económica de fósforo en el cultivo de papa en el sudeste bonaerense", tuvo como objetivos confirmar la información obtenida y avanzar en la evaluación económica de la fertilización fosfatada del cultivo de papa.

4.1 FERTILIZACIÓN EN PAPA: EVALUACIÓN DEL AGREGADO DE UN POLIMERO AL SUPERFOSFATO

Zamuner, E.C.^{1*}; Alejandro, A.¹; Giletto, C.M.¹; Lloveras, J² y Echeverría, H.E.¹

¹Unidad Integrada Balcarce (Fac. Ciencias Agrarias-UNMdP - EEA INTA Balcarce)

² Departament Producció Vegetal i Ciència Forestal Universitat / Centre d'Investigació Universitat de Lleida.España.

* Autor de contacto: zamuner.ester@inta.gov.ar; C.C. 276, 7620-Balcarce (BA): 02266-439100 interno 317.

4.1.1 RESUMEN

Asegurar una buena disponibilidad de fósforo (P) en etapas tempranas del desarrollo es esencial para el cultivo de papa, dado su escaso desarrollo radicular y altos requerimientos. Cuando el fertilizante es agregado al suelo, los iones fosfato liberados reaccionan rápidamente con los componentes del suelo volviéndose menos disponibles para las plantas; haciendo que la eficiencia de uso de los fertilizantes fosfatados sea baja. En los últimos años se han producido aditivos para los fertilizantes, como el polímero denominado AVAIL que ha demostrado aumentar la eficiencia de uso en diversos cultivos, pero sin resultados consistentes en papa. Los objetivos de esta experiencia fueron 1) comparar el rendimiento del cultivo de papa fertilizado con dosis variables de superfosfato triple de calcio (SFT) sin y con agregado de Avail y 2) evaluar las diferencias en disponibilidad de P en el suelo por la aplicación de SFT y Avail. Se realizaron 2 ensayos: uno a campo y otro en macetas. Se compararon tres dosis de P (25, 50 y 100 kg ha⁻¹) y dos fuentes (SFT y Avail). A campo, se determinó rendimiento y concentración de P en tubérculo y en el ensayo en macetas, se determinó P-Bray1 a los 7, 14, 21, 42 y 60 días después de la fertilización. La fertilización incrementó el rendimiento con valores promedio de 45 Mg ha⁻¹ para el testigo y 57-71 Mg ha⁻¹ para los tratamientos fertilizados, respectivamente. No se registraron diferencias significativas debidas al tipo de fertilizante. La concentración de P en los tubérculos a la cosecha no varió significativamente debido a la fertilización ni al fertilizante empleado siendo, en promedio, del 0,20%. El rendimiento por kilogramo de P aplicado (factor de productividad parcial) disminuyó con la dosis, siendo los valores promedio de 2,3 y 0,7 Mg tubérculo kg P⁻¹ cuando se aplican 25 y 100 kg ha⁻¹, respectivamente. La eficiencia agronómica también disminuyó con la dosis (0,5 y

Presentado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional de "Materia orgánica y sustancias húmicas" Bahía Blanca, Bs. As., 5 al 9 de mayo de 2014.

0,3 Mg tubérculo kgP^{-1} para las dosis de 25 y 100 kg ha^{-1} , respectivamente) y tampoco mostró diferencias debidas al tipo de fertilizante. La eficiencia de recuperación del P aplicado, evaluada a través del presupuesto parcial de fósforo, no fue afectada por el tipo de fertilizante y disminuyó con la dosis de P (0,8-0,3 $\text{kg P extraído por el cultivo kg P aplicado}^{-1}$ para las dosis de 25 y 100 kg ha^{-1} , respectivamente). No se determinaron diferencias por el tipo de fertilizante en el P-Bray1 en el ensayo en macetas. La disponibilidad de P fue mayor cuando se fertilizó con 100 kg ha^{-1} que con 25 kg ha^{-1} , asegurando una mejor provisión de P en los primeros 60 días de desarrollo vegetativo del cultivo, que es una etapa muy sensible a la deficiencia de P. En síntesis, si bien la fertilización fosfatada fue una herramienta fundamental para incrementar el rendimiento, el uso de Avail no se muestra como una innovación promisoría en el cultivo de papa bajo riego.

Palabras clave: Avail; papa; polímero

4.1.2 INTRODUCCIÓN

Una de las limitaciones para la producción agrícola en el sudeste de la provincia de Buenos Aires es la baja disponibilidad de fósforo (Sainz Rozas et al., 2012), por lo que la fertilización es una práctica fundamental para obtener altos rendimientos. En la actualidad se propone al productor agregar la cantidad suficiente de nutriente para producir el 90% del rendimiento máximo (criterio de suficiencia) y/o tratando de incrementar el nivel de fósforo (P) del suelo (criterio de recomposición) en situaciones de suelos con bajo fósforo (P) (Echeverría & García, 2005).

Cuando el fertilizante fosfatado es agregado al suelo, el P liberado reacciona fácilmente con los cationes para producir diversos compuestos de limitada solubilidad. Como consecuencia, la concentración de P en la solución del suelo en principio se incrementa y luego disminuye, en proporción variable según las propiedades del suelo y factores ambientales. La baja solubilidad de los compuestos formados hace que el P sea poco móvil en la mayoría de los suelos y las raíces de la plantas deban crecer activamente para interceptarlo. Por esta razón, las deficiencias de P son relativamente más frecuentes en las primeras etapas de desarrollo, cuando las raíces no son abundantes, y especialmente en especies con sistemas radiculares poco profundos y eficientes (Muñoz et al, 2005; Pack et al, 2006) y con demanda relativamente alta de nutrientes (Hopkins et al, 2008; Westermann, 2005) como la papa.

Recientemente, se ha desarrollado y patentado un polímero dicarboxílico, comercializado por JR Simplot Company denominado Avail® (Tindall, 2007), que se puede utilizar como un revestimiento sobre fertilizantes fosfatados granulares o mezclar en fertilizantes líquidos. Teóricamente, el polímero tiene una alta capacidad de intercambio catiónico que permite secuestrar cationes de la solución del suelo minimizando la precipitación y manteniendo así el P del fertilizante en una forma disponible para absorción de las plantas (Dunn & Stevens, 2008). Los resultados en papa no son consistentes ya que se han reportado incrementos significativos de rendimiento en algunas situaciones (Hopkins, 2010; Repking, 2008) y no en otras (Repking, 2007), respecto al fertilizante sin polímero. En el sudeste bonaerense no hay información del efecto de fertilizantes fosforados mejorados sobre el rendimiento en papa, ni su dinámica en el suelo.

Presentado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional de "Materia orgánica y sustancias húmicas" Bahía Blanca, Bs. As., 5 al 9 de mayo de 2014.

Capítulo 4: *Evaluación económica de la fertilización fosfatada*

El objetivo de esta experiencia fue comparar el rendimiento, eficiencia de uso y disponibilidad de P en el suelo, cuando se agregan cantidades variables de superfosfato triple de calcio (SFT) con y sin agregado del Avail.

4.1.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayo a campo

La experiencia se realizó en un lote de producción de Balcarce, provincia de Buenos Aires, en la campaña 2012-13. Las características del suelo a la plantación fueron: pH = 6,6; materia orgánica = 3,8 g 100 g⁻¹; N-NO₃ = 5,5 mg kg⁻¹ y P Bray1 = 11,1 mg kg⁻¹. Los tratamientos consistieron en 4 dosis de P (0, 25, 50 y 100 kg P ha⁻¹) y 2 fertilizantes (SFT y SFT recubierto con Avail (Avail)). El Avail se preparó siguiendo las recomendaciones del proveedor (105 ml de Avail cada 50 kg de SFT). Se mantuvo el nivel de nitrógeno no limitante para el cultivo aplicando urea. Se cosechó en forma manual un metro de los dos surcos centrales de cada parcela y se realizaron estimaciones del rendimiento en peso fresco (Mg ha⁻¹), peso seco (Mg ha⁻¹) y concentración de P en tubérculo (%). La respuesta en rendimiento del cultivo fertilizado se expresó como Rendimiento Relativo (RR%) que se calculó como (rendimiento del testigo/rendimiento del tratamiento fertilizado)*100. Se calcularon 3 eficiencias de uso de P (Snyder and Bruulsema 2007):

- 1) Factor Parcial de Productividad = rendimiento / dosis de P,
- 2) Eficiencia Agronómica = (rendimiento del tratamiento fertilizado – rendimiento del testigo) / dosis de P y,
- 3) Presupuesto Parcial de P = P extraído a cosecha / dosis de P.

51

Ensayo en macetas

Se evaluaron 3 dosis de P (25, 50 y 100 kg P ha⁻¹) y 2 fuentes de P (SFT y Avail). Se fertilizó homogéneamente suelo proveniente de los 20 cm superiores de un Argiudol típico, con la cantidad de P equivalente a cada una de las dosis y fertilizantes mencionados. Se colocó en macetas de aproximadamente 2000 cm³ que se mantuvieron a capacidad de campo y temperatura constante (25°C). A los 7, 14, 21, 42 y 60 días se tomaron muestras de 100 g de suelo y se determinó P-Bray 1 (Bray & Kurtz, 1945).

Empleando los procedimientos proporcionados por el Statistical Analysis System (SAS Institute, 2002) se realizó el análisis de la varianza y la comparación entre los tratamientos seleccionados mediante contrastes ortogonales para un diseño en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones y siete tratamientos. En el análisis estadístico se incluyeron contrastes que comparan SFT y Avail para igual dosis de P.

4.1.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fertilización fosfatada incrementó significativamente el rendimiento respecto del testigo, entre 12 y 26 Mg ha⁻¹ según la dosis, sin diferencias entre fuentes de P (Tabla 4.1.1). La relación entre el RR% y la dosis de P fue cuadrática ($y = -0,005x^2 + 0,73x + 71,63$; $R^2 = 0,38$), correspondiendo la máxima respuesta en rendimiento con una dosis aproximada de 73 kg P ha⁻¹. Echeverría (2005) recomiendan aplicar 50 kg P ha⁻¹ si el objetivo de rendimiento es de 60 Mg ha⁻¹ y el suelo tiene entre 6 y 11 mg kg⁻¹ de P-Bray a la siembra cuando se utilizan variedades de papa destinadas a consumo. Los resultados de esta experiencia indican que esta recomendación podría utilizarse también para Innovator, cultivar de uso industrial, ya que con la dosis de 50 kg P ha⁻¹ se obtiene rendimientos del orden de 64 Mg ha⁻¹ (Tabla 4.1.1), e incluso podría fertilizarse con dosis más altas dado el alto potencial de rendimiento de la variedad (70 Mg ha⁻¹).

Tabla 4.1.1: Rendimiento en peso fresco, concentración de P en tubérculo y P extraído por el cultivo de papa fertilizado con 0, 25, 50 o 100 kg P ha⁻¹ utilizando superfosfato triple de calcio (SFT) o SFT+Avail (Avail) como fuentes de P.

Tratamiento	Rendimiento Mg ha ⁻¹	Concentración de P en tubérculo (%)	P removido en tubérculo kg ha ⁻¹
Testigo	44,9	0,22	16,96
25-SFT	56,6	0,22	21,97
25- Avail	59,8	0,19	19,95
50-SFT	63,9	0,21	24,31
50- Avail	64,3	0,18	21,15
100-SFT	70,8	0,20	25,26
100- Avail	67,7	0,21	24,64
CONTRASTES	-----	Valor p	-----
Testigo vs. fertilizado	0,01	0,55	0,02
25-SFT vs 25- Avail	0,62	0,23	0,49
50-SFT vs 50- Avail	0,33	0,14	0,28
100-SFT vs 100- Avail	0,63	0,76	0,83

La concentración de P en los tubérculos a la cosecha no varió significativamente debido a la fertilización ni al tipo de fertilizante siendo, en promedio, del 0,20% (Tabla 4.1.1). Este valor de concentración es del orden al reportado por Maier et al. (2002) para el cultivar Russet Burbank *Presentado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional de "Materia orgánica y sustancias húmicas" Bahía Blanca, Bs. As., 5 al 9 de mayo de 2014.*

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

y por White et al. (2009) para cuatro cultivares de papa de Estados Unidos. Si bien la fertilización no modificó la concentración de P en los tubérculos, produjo incremento del rendimiento lo que trajo como consecuencia que los cultivos fertilizados extraigan más P del suelo que el testigo (Tabla 4.1.1). Los tratamientos fertilizados extrajeron entre 3 y 8 kg ha⁻¹ más P que el testigo, dependiendo de la dosis sin diferencias debidas al tipo de fertilizante.

Se calcularon 3 eficiencias de uso del fertilizante cuyos valores se muestran en la Figura 4.1.1. Los resultados confirman que no hay mejora en la eficiencia de uso del SFT en el cultivo de papa por el agregado de Avail.

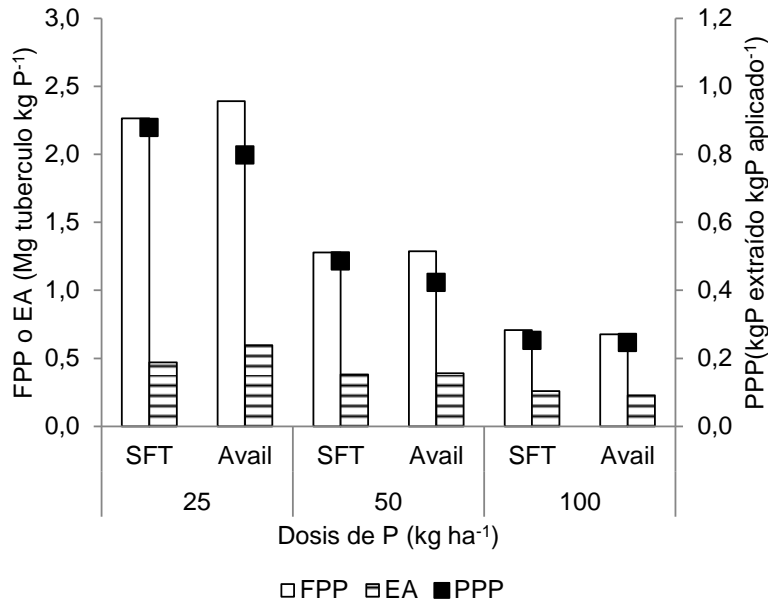


Figura 4.1.1: Eficiencia de uso del superfosfato triple de calcio (SFT) y SFT revestido con Avail (Avail) para el cultivo de papa expresada como factor parcial de productividad (FPP), eficiencia agronómica (EA) y presupuesto parcial de nutriente (PPN).

El factor de productividad parcial (FPP) refleja el impacto del fertilizante aplicado en la producción, y es una información valiosa al momento de realizar cálculos de costo de producción. El rendimiento obtenido por kilogramo de P aplicado disminuye hasta un 70% en la dosis mas alta, siendo los valores promedio de 2,3 y 0,7 Mg tubérculo kg P⁻¹ cuando se aplican 25 y 100 kg ha⁻¹ respectivamente. Valores similares de FPP fueron obtenidos, para el cultivar Russet Burbank, por Stark & Hopkinns (2013) y Sanders et al. (2012). La EA expresa la mejora de la productividad debido a la fertilización. Este indicador también disminuye con la dosis y tampoco muestra diferencias debidas al tipo de fertilizante. La mayor diferencia entre ambos fertilizantes se registró cuando se utilizaron dosis bajas (25 kg ha⁻¹) y la EA fue de 0,5 y 0,6 para SFT y Avail, respectivamente. El presupuesto parcial de fósforo (PPF), que es una manera de medir la eficiencia de recuperación del P aplicado, no varió por efecto del tipo de fertilizante y disminuyó con la dosis de P. Snyder et al. (2007) indicaron que cuando el valor de PPN es cercano a 1 la oportunidad de pérdida de P sería mínima y, por el contrario, si el índice es menor que 1, estaría indicando que parte del P no fue recuperado por el cultivo y sería

Presentado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional de "Materia orgánica y sustancias húmicas" Bahía Blanca, Bs. As., 5 al 9 de mayo de 2014.

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

importante entender el destino del P aplicado para no producir daños al medio ambiente. En las condiciones evaluadas, la fertilización con dosis bajas, con PPN promedio de 0,84, sería la más segura desde el punto de vista ambiental; mientras que para las dosis mayores sería importante determinar el destino del P agregado en exceso.

En macetas no se determinó interacción fertilizante * dosis ni diferencias debidas al tipo de fertilizante (SFT o Avail), en ninguna fecha de muestreo. Las diferencias se deben a las dosis de P, existiendo en todos los casos una mayor disponibilidad cuando incrementa la dosis (Figura 4.1.2).

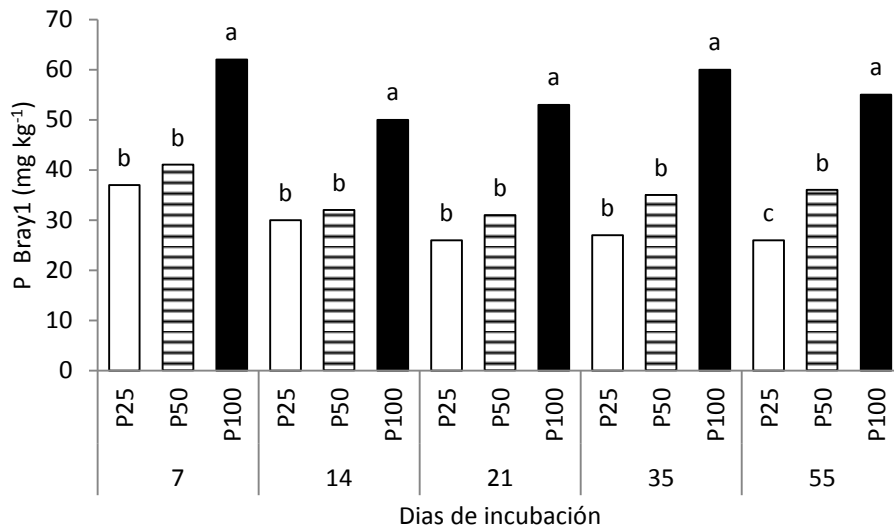


Figura 4.1.2: Fósforo extractable Bray1 en suelo fertilizado con diferentes dosis de P (25, 50 y 100 kg P ha⁻¹), Columnas con letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05) entre dosis de P dentro de cada muestreo (días de incubación)

Se determinó que la fertilización con dosis bajas (25 y 50 kg ha⁻¹) mantuvo la concentración de PBray1 entre 30 y 40 mg kg⁻¹ en todas las fechas de muestreo. Con la dosis más alta, la disponibilidad de P promedio de todo el período de incubación fue de 62 mg kg⁻¹. Por lo tanto, la fertilización con 100 kg ha⁻¹ aseguraría una mayor provisión de P en los primeros 60 días de desarrollo vegetativo del cultivo. Yu Duan et al. (2013) sostienen que las etapas tempranas de desarrollo del cultivo son críticas en términos de requerimientos de P, indicando que el periodo que va entre los 39 y 57 días después de plantación es de fundamental importancia.

Los resultados de esta experiencia muestran que no hubo diferencias en rendimiento, en eficiencia de uso del fertilizante, ni en disponibilidad de P en el suelo debido al uso de Avail, en un sitio que a la plantación tenía bajo contenido de PBray1 y que manifestó respuesta a la fertilización fosfatada en papa. En general, este producto no ha demostrado ser un aditivo eficaz para aumentar la absorción de P, la residualidad o el rendimiento del fertilizante (Ward, 2010). Los cálculos teóricos de Osmond et al. (2008) sobre el efecto del Avail en la CIC del suelo pueden ayudar a explicar la falta de respuesta observada. Sobre la base de la capacidad de intercambio del Avail (1800 mmol kg⁻¹; Karamanos and Puurveen, 2013) y la

cantidad de Avail agregada al SFT en cada tratamiento se calculó la cantidad teórica de calcio que podría ser fijado por el polímero del Avail. Se obtuvieron valores de 9,5; 18,9 y 37,8 g Ca ha⁻¹ para las dosis de 25, 50 y 100 kg P ha⁻¹, respectivamente. Los suelos del sudeste bonaerense tienen una alta capacidad de intercambio de cationes con alta proporción de calcio (alrededor de 17 cmol_c kg⁻¹ = 3,4 g Ca kg⁻¹ = 7820 kg Ca ha⁻¹), por lo que el agregado del Avail produciría una variación mínima en la capacidad de intercambio de calcio del suelo, que llegaría a ser del 16,999918 cmol_c kg⁻¹ cuando se aplica la dosis mas alta. Por lo tanto, la cantidad de Avail agregada sería insuficiente para producir un cambio importante en la reacción del P con el calcio del suelo y mejorar la eficiencia de uso del SFT (Ward, 2010; Osmond et al., 2008).

4.1.5 CONCLUSIÓN

El rendimiento y la disponibilidad de P en el suelo en etapas tempranas del cultivo se incrementaron con la fertilización fosfatada, sin embargo no hubo diferencias significativas debidas al tipo de fertilizante. Por lo tanto, en el cultivo de papa bajo riego el uso de Avail no se muestra como una innovación promisoría en suelos con baja disponibilidad de P.

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 N° AGR 329/10, AGR 383/12 e INTA AERN 295561.

4.1.6 BIBLIOGRAFÍA

- Dunn D.J., Stevens G.. 2008. Response of rice yields to phosphorus fertilizer rates and polymer coating. <http://www.plantmanagementnetwork.org/cm/element>.
- Echeverría, H.E. 2005. Papa. Pages: 365-378. In: H.E. Echeverría and F.O. García eds. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría H.E., Sainz Rozas, H. 2005. Nitrógeno. Pages: 69-97. In: H.E. Echeverría and F.O. García eds. Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Bray R.H., Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59, 39-45
- Hopkins B. G., Rosen C. J., Shiffler A. K., Taysom T. W. 2008. Enhanced efficiency fertilizers for improved nutrient management: Potato (*Solanum tuberosum*). Crop Management. <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/cm/symposium/enhanced/potato/>
- Hopkins, B. G., Ellsworth J. W., Bowen T. R., Cook A. G., Stephens S. C., Shiffler A. K., Eggett D.. 2010. Phosphorus fertilizer timing for Russet Burbank potato grown in calcareous soil. Journal of Plant Nutrition 33: 529–540.
- Karamanos R. E., Puurveen D.. 2013. Evaluation of a polymer treatment as enhancer of phosphorus fertilizer efficiency in wheat. Can. J. Soil Sci. (2011) 91: 123-125
- Maier N. A., McLaughlin M. J., Heap M., Butt M., Smart M. K. 2002. Effect of current-season Application of calcitic lime and phosphorus fertilization on soil pH, potato growth, yield, *Presentado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional de "Materia orgánica y sustancias húmicas" Bahía Blanca, Bs. As., 5 al 9 de mayo de 2014.*

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

- dry matter content, and cadmium concentration. Communications in Soil Science and Plant Analysis, Volume 33, Issue 13 & 14: 2145 – 2165.
- Munoz F., Mylavarapu R. S., Hutchinson C.M.. 2005. Environmentally responsible potato production systems: A review. Journal of Plant Nutrition 28: 1287–1309.
- Osmond D., C., Crozier J., Dunphy K., Edminsten L., Fisher R., Heiniger R., Weisz, Hardy D. 2008.. Caroline Cotton Notes. <http://www.cotton.ncsu.edu/ccn/2008/may20b.html>.
- Pack J. E., Hutchinson C. M., Simonne E. H.. 2006. Evaluation of controlled-release fertilizers for northeast Florida chip potato production. Journal of Plant Nutrition 29: 1301–1313.
- Repking M. J., Laboski C. A. M. 2007. Effects of phosphorus fertilizer rate, timing, and addition of fertilizer enhancer on potato yield and quality (296–6). In: 2007 A-C-S Annual Meeting Abstracts. Madison <http://a-c-s.confex.com/crops/2007am/techprogram>
- Repking M. J., Laboski C. A. M. 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. Available at <http://www.soils.wisc.edu/extension/wcmc/2008>.
- Sainz Rozas H., Echeverria, H.E. 2008. Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis. Argentina.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release version 9.0. SAS Inst., Cary, NC.
- Sanders J.L., L.S. Murphy, A. Noble, R.J. Melgar and J. Perkins. 2012. Improving Phosphorus use Efficiency with Polymer Technology. Procedia Engineering 46: 178 – 184.
- Snyder C.S., Bruulsema T.W. 2007. Nutrient use efficiency and effectiveness in North America: Indices of agronomic and environmental benefit. Ref # 07076. International Plant Nutrition Institute. Norcross, GA. Available at <http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/D58A3C2DECA9D7378525731E006066D5>
- Stark J.C. and B. G. Hopkins. 2013. Potato Response to Phosphorus Fertilizer Using a Dicarboxylic Acid Polymer. Better Crops. 97:7-10.
- Tindall T.A. 2007. Western Nutrient Management Conference. Salt Lake City, UT. Vol. 7. 106-110
- White P. J., Bradshaw J.E., Finlay M., Dale B., Ramsay G., Hammond J. P., Broadley M. R. 2009. Relationships between yield and mineral concentrations in potato tubers. Hortscience Vol. 44 (1)
- Yu Duan, De-bao Tuo, Pei-yi Zhao, Huan-chun Li, Shutian Li. 2013. Response of Potato Fertilizer Application and Nutrient Use Efficiency in Inner Mongolia. Better Crops. Vol. 97: 24-27.
- Ward N.C. 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/>
- Westermann D.T. 2005. Nutritional Requirements of Potatoes. Am. J. Potato Res. 82, 301-307.

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

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

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

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.gob.ar

4.2.1 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⁻¹ 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 (R²=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⁻¹) = 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

4.2.2 ABSTRACT

To ensure the phosphorus (P) availability in potato crop is important to adjust the fertilization strategy to achieve maximum yield with greater economic efficiency. Avail®, which it is an additive that can be used to coat phosphorus fertilizers, has proven to increase P efficiency fertilizers in various crops, but without consistent results in potato. For potato crops in the Southeast of Buenos Aires, the objectives of this research were: 1- to compare potato yield at

different rates of calcium triple superphosphate (SFT) with and without addition of Avail® and, 2- to establish the phosphorus fertilization rate that produces the maximum economic benefit (DOE). Information of nine P fertilization trials (2005-14) was used. Bray1 and Mehlich3 test in soil samples taken before crop planting and total yield were determined. The DOE were calculated for different fertilizer/tuber price relationships. Fertilization increased yields with average values of 44 Mg ha⁻¹ for the unfertilized plots and 52-69 Mg ha⁻¹ for the fertilized treatments. There were no significant differences in yield due to the use of different P sources (SFT or SFT+Avail®), for any of the rates tested. This result was consistent across all trials despite having different extractable P contents before planting. The DOE determined from Bray1 or Mehlich3 were similar ($R^2=0,8$). For both extractants, the DOE decreased with increasing P availability by: DOE P (kg ha⁻¹) = 176 (5*Bray1); 216 (6*Mehlich3). While both soil P availability and price relationships affect the DOE, the first is the determining factor to define the phosphorus fertilizer rate suitable for cost-effective production of potato crops.

Key words: Avail®; yield; Bray; Mehlich

4.2.3 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⁻¹; 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 polímero 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; Dudenhoefter et al., 2012). Para los suelos del sudeste bonaerense no se han reportado trabajos que evalúen el uso

Capítulo 4: *Evaluación económica de la fertilización fosfatada*

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 (Bray1), que es un extractante específico de P. Más recientemente, se ha propuesto el uso de soluciones extractoras denominadas “universales” como Mehlich3, con las cuales puede hacerse una evaluación más completa del suelo sin incrementar la complejidad del análisis. Además, Mehlich3, 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.

4.2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

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 Bray1 y Mehlich3 (Sims, 2009) previo a la siembra. Algunas características edáficas y de cultivo se muestran en la Tabla 4.2.1. 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 4.2.2).

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 4.2.2), que se repitieron por triplicado en un diseño de bloques completos al azar. Las parcelas tuvieron un tamaño de 102 m² (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 [(NH₂)₂CO] de acuerdo con el siguiente esquema: 120 kg ha⁻¹ 20-30 días antes de la siembra, 100 kg ha⁻¹ durante la siembra y 100 kg ha⁻¹ 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 [(C₄H₆MnN₂S₄) x (Zn) y], y el fungicida de contacto fue Clorotalonil (C₈Cl₄N₂).

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

Tabla 4.2.1: Algunas características edáficas (0-20 cm) de los sitios experimentales, previo a la siembra del cultivo de papa.

Table 4.2.1: Some soil characteristics (0-20 cm) before potato planting for the individual experimental sites.

Sitio	Estación de crecimiento	P extractable inicial ^a		pH ^b	Materia orgánica ^c	N-NO ₃ ^{-d}
		Bray1	Mehlich3			
		----- mg kg ⁻¹ -----		g 100 g ⁻¹		kg ha ⁻¹
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

^a Sims (2009); ^b Relación suelo:agua 1:2.5; ^c Walkley & Black (1934); ^d Bremner (1965), profundidad 0-60 cm. ± representa el Desvío Standard

Tabla 4.2.2: Información de condiciones climáticas y prácticas de manejo de cada sitio experimental.

Capítulo 4:

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

Tabla 4.2.2: Información de condiciones climáticas y prácticas de manejo de cada sitio experimental.

Table 4.2.2: Climatic conditions and management practices for individual experimental sites.

Sitio	Cultivo antecesor ^a	Fecha de		Fertilización ^c			
		Plantación	Cosecha	Temperatura	Precipitación	SFT	SFT+Avail [®]
				°C	mm	----- kg P ha ⁻¹ -----	
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	Gitasol	11/20/13	04/10/14	18,6	561	0,25,50,100,150,200	

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

62

A la madurez del cultivo, y una semana después de producir la desecación del cultivo con Paraquat (C₁₂H₁₄Cl₂N₂), 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⁻¹).

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

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

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

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

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

$$\text{Relación de precios} = \frac{\text{Precio P (US\$ kg}^{-1} \text{ P)}}{\text{Precio tubérculo (US\$ kg}^{-1} \text{)} + \text{costos adicionales}}$$

(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⁻¹ (<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 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⁻¹, siendo el valor de la mediana 0,25 US\$ kg⁻¹. 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 (R²) 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).

4.2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos con aplicaciones de SFT variaron entre 31 y 76 Mg ha⁻¹ (Tabla 4.2.3). Estos valores son similares a los presentados por Caldiz (2006) para cultivos de la región, con rendimientos promedio de 40 Mg ha⁻¹ y máximos de 70 Mg ha⁻¹. La fertilización con la mayor dosis de P (200 kg P ha⁻¹) produjo un incremento promedio en el rendimiento de 24 Mg ha⁻¹, 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 4.2.4. 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 consistente en todos los sitios evaluados a pesar que tenían contenidos variables de P extractable previo a la plantación (Tabla 4.2.1).

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

Tabla 4.2.3: Rendimiento en peso fresco de cultivos de papa fertilizados con superfosfato triple de calcio (SFT)

Table 4.2.3: Fresh weight yield of potato crops fertilized with calcium triple superphosphate (SFT)

Sitio	Promedio de rendimiento ^a						
	0	25	50	100	150	200	Pr> F
----- Mg ha ⁻¹ -----							
1	49,1c	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	59,2b	67,2 ab	75,3 a	-	-	0,021
4	37,1 b	39,9b	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	43,5c	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	

^a Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), de acuerdo al test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS).

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 intercambiable, 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 $17 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, 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 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 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

Aceptado en Ciencia del Suelo. 34(1): En prensa. ISSN: 0326-3169 (Print) 1850-2067 (Online)

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

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

Tabla 4.2.4 : Rendimiento promedio en peso fresco del cultivo de papa fertilizado con 25, 50 o 100 kg P ha⁻¹, utilizando superfosfato triple de calcio (SFT) o SFT+Avail® como fuentes de P.

Table 4.2.4: Mean fresh weight yield of the potato crop fertilized with 25, 50 or 100 kg P ha⁻¹ using calcium triple superphosphate (SFT) or SFT + Avail® as P sources.

Tratamiento	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)		
	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

^a Promedio de rendimiento entre tratamientos con igual dosis de P y diferente fertilizante; ± representa el Desvío Standard

El costo de la fertilización con SFT para el año promedio (costo del fertilizante 0,426 US\$ kg⁻¹) y una dosis de 100 kg P ha⁻¹, es de 213 US\$ ha⁻¹. El recubrimiento del SFT con Avail® incrementa el costo del SFT en 0,07 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

Evaluación económica de la fertilización fosfatada

cada sitio experimental, fue caracterizada con un modelo cuadrático-meseta (Tabla 4.2.3), 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 variabilidad, 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 (Figura 4.2.1) 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 (Figura 4.2.2). 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 P-Bray1 o P-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 (kg ha^{-1}) = 176 (5*P-Bray1); 216 (6*P-Mehlich3).

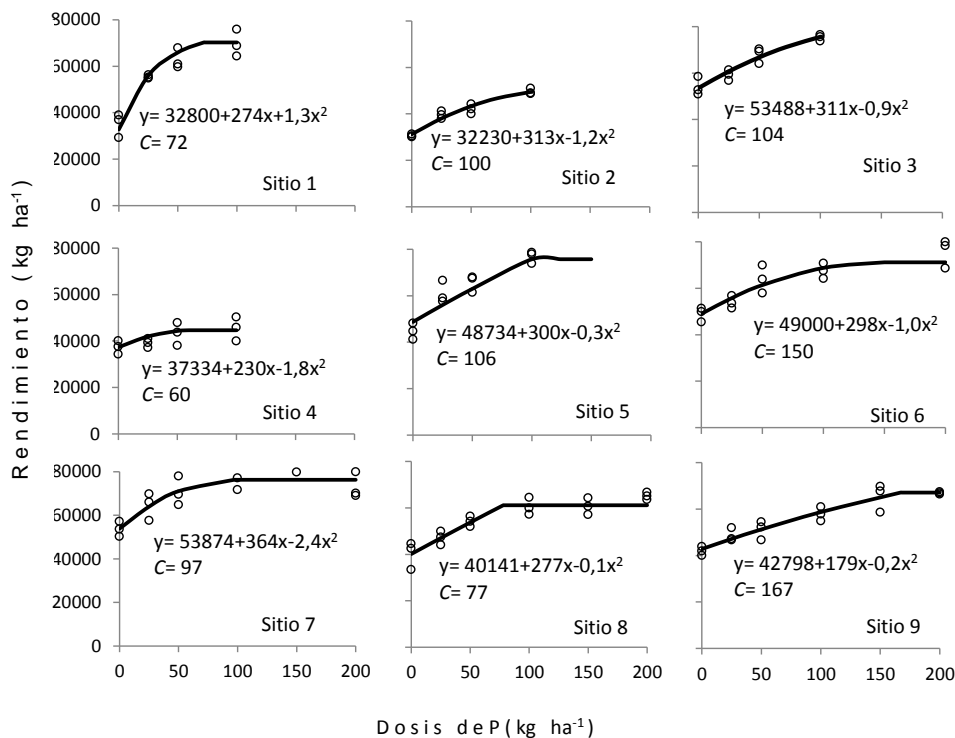


Figura 4.2.1: Ecuación cuadrática que relaciona rendimiento y dosis de P, para cada sitio experimental.

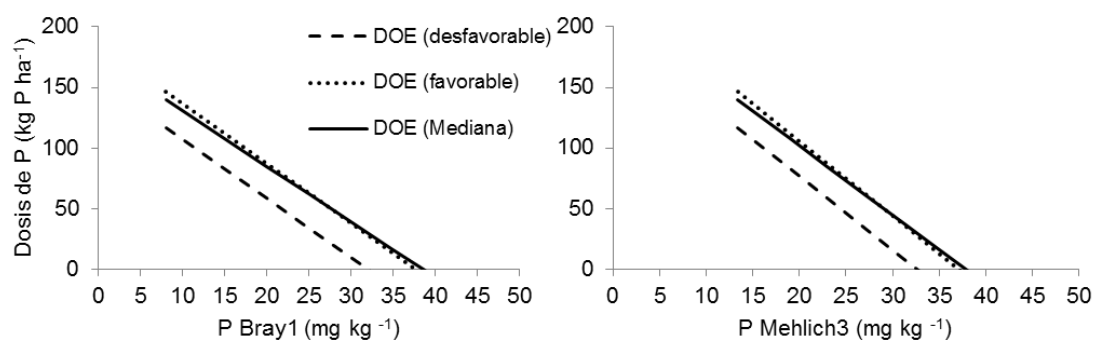
Ecuaciones de ajuste aplicable a los valores de dosis de P menores a la intersección con el valor crítico (C).

Capítulo 4: *Evaluación económica de la fertilización fosfatada*

Figure 4.2.1: 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).

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 mg kg⁻¹, la DOE es 85 y 87 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 mayoría 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 mg kg⁻¹ la DOE es 60 kg ha⁻¹) para obtener el máximo beneficio económico (Figura 4.2.2). Los costos de producción y comercialización de papa en el sudeste de la provincia de Buenos Aires indican que el gasto en papa semilla es el factor de mayor peso relativo dentro de los costos totales (Gonzalez & Rodriguez, 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 (Mosciaro, 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.

67



DOE desfavorable: Relación de precios = 81; DOE favorable: Relación de precios = 0,04; DOE mediana: Relación de precios = 10 (kg de tubérculo. kg P⁻¹).

Figura 4.2.2: 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 4.2.2: 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).

4.2.6 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.

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.

4.2.7 BIBLIOGRAFIA

- 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
- Dudenhoeffer, CJ; KA Nelson; PP Motavalli; D Dunn; WE Stevens; KW Goyne; 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: H.E. Echeverría y F.O. 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.

Capítulo 4: *Evaluación económica de la fertilización fosfatada*

- 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 & D Puurveen. 2011. Evaluation of a polymer treatment as enhancer of phosphorus fertilizer efficiency in wheat. *Can. J. Soil Sci.* 91: 123-125
- Khiari, 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. <http://a-c-s.confex.com/crops/2007am/techprogram>
- 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
- 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.

Capítulo 4: *Evaluación económica de la fertilización fosfatada*

- 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; A B 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 Nacional 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](file:///C:/Users/zamuner.ester/Downloads/2014%20Keys%20to%20Soil%20Taxonomy.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.

CAPÍTULO 5:
CURVA DE DILUCIÓN PARA EL
DIAGNÓSTICO DE DEFICIENCIA DE P

USE OF A CRITICAL PHOSPHORUS DILUTION CURVE TO IMPROVE POTATO CROP NUTRITIONAL MANAGEMENTEster C. Zamuner^{1*}, Jaume Lloveras² and Hernán E. Echeverría¹¹Unidad Integrada FCA UNMdP-INTA Balcarce, CC 276 B7620EMA Balcarce, Argentina.²Agrotecnio Center, University of Lleida (UdL), Av. RoviraRoure, 191, 25198, Lleida, Spain.*Corresponding author: Tel. +54-(0)2266-439100 int. 783; Fax +54-(0)2266-439101; e-mail: zamuner.ester@inta.gob.ar**5.1 ABSTRACT**

Plant diagnostic methods to determine P deficiencies needs the definition of a critical concentration value which represents the minimum P concentration required to achieve maximum growth. The critical P concentration (Pc) has not been determined for potato. We designed a five years experiment with the objective of using the relationship between P concentrations and total dry matter (TB) yield to determine and validated the Pc, expressed as a function of TB. The Pc was described by the model: $3.919 * TB^{-0.304}$ where total biomass (TB) ranged from 1 to 16 Mg ha⁻¹. The P nutritional index (PNI), which is the ratio between the measured whole plant P concentration and Pc, was associated with the relative tuber yield measured at harvest. The results from this study support the use of PNI from 60 to 80 days after planting to determine potato crop P nutritional status.

Additional key words: phosphorus nutrition index, *Solanum tuberosum* L., fertilization, total biomass, biomass partitioning

*Abbreviations*TB = Total biomass (Mg ha⁻¹); calculated as the sum of aerial and tuber dry matter.

Pc = Critical P concentration

5.2 INTRODUCTION

Phosphorus (P) fertilization is important for profitable potato (*Solanum tuberosum*) production because many soils lack sufficient available P to achieve optimum crop growth. Potato has a relatively high P requirement and is generally considered inefficient in soil P uptake (Rosen et al. 2014). Adequate P availability is therefore required from the earliest stages of growth through to maturity (McCollum 1978). Adequate plant P nutrition improves growth (canopy development, root cell division, tuber set, and starch synthesis), tuber yield, tuber quality (solids content, nutritional quality) and resistance to certain diseases (Rosen et al. 2014).

Soil testing is the most common method used for assessing the amount of plant-available P and determining P fertilizer rates. A crop response to P application is expected when soil test P levels are below an established threshold value (Zamuner et al. 2006; Jordan-Meille et al.

2012; Johnston et al. 2013; Rosen et al. 2014; Echeverria and Giletto 2015). These thresholds have been established for specific tests and crops through calibration experiments and are currently used to predict the rate of P fertilizer application required to optimize yield and economic return.

Several placement/timing options for P fertilizer application are available for potato, including: pre-plant broadcast, banding with (or near) the seed piece at planting and application with irrigation water during the growing season (Hopkins et al. 2010; Rosen et al. 2014). The use of in-season foliar P application to supplement pre-planting and/or at-planting fertilization is a common practice for correcting nutritional deficiencies in plants (Fageria et al. 2009). Foliar fertilization can be used from mid to late season, when the available plant leaf area can efficiently intercept the P fertilizer formulation applied (Hedley and McLaughlin, 2005).

An ideal indicator of crop P nutritional status should show P deficiencies and excesses, provide rapid diagnosis and allow correction during the growing season. The concentration of P in petioles has previously been used to assess the in-season P status of potato and as a predictor of tuber yield (Freeman et al. 1998; Hegney et al. 2000). This method has been questioned by Mac Kerron et al. (1995) who observed a great spatial and temporal variability of petiole sap [NO_3^-] and a lack of association between this variable and short-term or season-long potato N uptake. Moreover, no consistent relationship between petiole P concentration and relative yield has been reported in more recent studies (Rosen and Bierman 2008; Mohr and Tomasiewicz 2011).

Another approach for identifying and quantifying plant P deficiencies is based on determining the optimal or critical P concentration (P_c), which is the minimum P concentration in plants required to achieve maximum growth at a specific time and under local field conditions. This methodology has been widely used in plant-based approaches for diagnosing N in potato (Duchenne et al. 1997; Bélanger et al. 2001; Giletto and Echeverria 2012) and in other crops such as wheat (Ziadi et al. 2010; Belanger et al. 2015) and maize (Ziadi et al. 2008). The use of P_c as a function of plant biomass was described in Timothy (Belanger and Ziadi 2008) and spring wheat (Ziadi et al. 2008; Belanger et al. 2015). However, this approach of describing P_c as a function of biomass had not previously been evaluated for potato.

The P_c could potentially be used to predict the P nutritional status of a potato crop. Lemaire and Gastal (2009) proposed an N nutrition index (NNI) to quantify the intensity of both N deficiencies and the luxury consumption of a given crop. Similarly, a phosphorus nutrition index (PNI) for a given accumulated biomass could be estimated as the ratio between the actual P concentration in total biomass (TB) and the P_c . The determination of this index during the crop growth cycle could be a useful tool for monitoring potato P nutritional status and to determine the needs of in-season foliar P fertilizer applications.

Our objectives were: i) to determine and validate the critical P dilution curve for irrigated potato crops and, ii) to assess the possibility of using the PNI to estimate the P nutritional status and the yield of potato crops grown at different P rates.

5.3 MATERIALS AND METHODS**5.3.1 Field Experiments**

Five field experiments were carried out to evaluate the effect of phosphorus fertilization on potato yield in the south-eastern Pampas region of Argentina (37° 45'S, 58° 18'W to 38° 22'S, 58° 4'W). These experiments were conducted over the 2005-06, 2006-07, 2009-10, 2010-11 and 2012-13 potato growing seasons (from October to March).

The predominant soil at the experimental sites was a complex of a fine, mixed, thermic Typic Argiudoll and a fine, mixed, thermic Petrocalcic Paleudoll (USA soil classification). This soil has a thick mollic epipedon (0–23 cm) and a clay loam argillic horizon (31–33%). The experimental sites were located in a relatively low-lying area with an undulating landscape (30–600 m over sea level) and gentle slopes (0.5–2.5%). Several soil properties and some climatic data are presented in Table 5.1.

Table 5.1: Soil characteristics (0–20 cm) and cropping practices in the experimental sites evaluated.

Characteristics and practices	Growing season ^g				
	2005-06	2006-07	2009-10	2010-11	2012-13
Mean rainfall (mm) ^a	529.70	870.40	758.30	641.80	704.60
Mean air temperature (°C) ^a	17.43	18.27	18.58	18.89	18.57
Organic matter (g kg ⁻¹) ^b	51.45	42.33	54.50	53.80	38.45
pH (soil: water 1:2.5)	6.20	6.00	6.10	6.20	6.60
P- Bray1(mg kg ⁻¹) ^c	19.38	27.92	22.15	8.63	11.12
N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹) ^d	39.18	36.55	38.53	11.68	55.03
Recommended P rate (kg P ha ⁻¹) ^e	80	31	56	126	96
Previous crop ^f	Pasture	Soybean	Wheat/soybean	Pasture	Potato
Rainfall + irrigation (mm)	530	870	758	642	705
Planting date	10/20/05	11/05/06	11/01/09	11/12/10	11/01/12
Harvesting date	03/13/06	03/20/07	03/02/10	03/30/11	03/05/13

^a Calculated from planting to harvest.

^b Walkley and Black 1934.

^c Bray and Kurtz 1945.

^d Bremner 1965; Depth 0-60 cm

^e Echeverria and Giletto (2015)

^f Pasture (*Bromus* sp., *Stipa* sp., *Lolium multiflorum*, *Lotus tenuis*, *Paspalum dilatatum*), Soybean (*Glycine max*), Potato (*Solanum tuberosum*), Wheat (*Triticum aestivum*).

^g Trial number correspond to Zamuner et al. (2015) submitted

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

In each experiment, four different P rates were evaluated (0, 25, 50 and 100 kg P ha⁻¹). The management practices are summarized in Table 5.1. A randomized complete block design with three replicates was used for each trial (plot size 10.2 x 14 m). The soil was prepared for planting using a disk harrow, chisel and vibrocultivator. Planting was carried out using a two-row planter with a row width of 0.85 m and an average density of 5 potato pieces per metre of row. The cultivar used was Innovator (medium-late, 120–130 days). Phosphate fertilizer (Triple superphosphate, 44% P₂O₅) was applied in rows at planting (at about 10 cm from the central row and 4-6 cm below the seed piece). To ensure non-limiting N conditions, all plots were fertilized with urea [(NH₂)₂CO; 46% N] at the following rates: 100 kg N ha⁻¹ at planting and 100 kg N ha⁻¹ at hilling. N rate applied is the recommended under the cropping conditions. From tuber initiation to tuber bulking, sprinkler irrigation was applied when the soil moisture level in the soil profile (0-20 cm) was close to field capacity. On average, 20 mm of water were added at 5-7 day intervals. Pests and diseases were chemically controlled. Weed control was conducted using a combination of chemical and mechanical methods. Hilling was also performed before canopy closure. Paraquat (C₁₂H₁₄Cl₂N₂) was applied one week before harvest to kill the foliage.

5.3.2 Sampling and Laboratory Procedures

Shoot and tuber biomass were measured at four sampling dates ranging from around 40 days after planting (DAP) until senescence; this was done by harvesting a 4 m section of the central rows of each plot on each sampling date. Sampling was conducted at each of the following growth stages: vegetative, tuber initiation, tuber bulking and maturation (Stark et al. 2004). Whole plants were hand-harvested, and shoots and tubers were separated and weighed. Plant and tuber subsamples of approximately 200 g were dried at 60°C in a forced draft oven for 7 days and then weighed to determine their dry matter (DM) content. Total biomass (TB) was calculated as the sum of the DM of the shoots and tubers. Subsamples of the aerial and tuber fractions were then milled, passed through a 1 mm sieve and then stored at room temperature before laboratory analyses. The P concentration in each plant fraction (aerial and tuber) was determined in HNO₃-HClO₄ digests (Saunders and Williams 1955) by a colorimetric method (Murphy and Riley 1962). The P concentration in the total biomass was calculated by adding together the P contents of the shoots and tubers and then dividing by TB.

Tuber yields were evaluated by hand-harvesting a four-metre section of the two central rows of each plot, after previous haulm killing with Paraquat (C₁₂H₁₄Cl₂N₂). Samples from each plot were weighed separately to obtain the total fresh yield.

Data Analysis

The critical P dilution curve was determined using the results from the 2006-07, 2009-10 and 2010-11 growing seasons. The trials used to define the critical P dilution curve were selected to cover a wide range of initial soil P availability (Table 5.1). For each trial and sampling date, treatments were classified using Fisher's least significant difference (LSD) test. Significantly greater TB values (P≤0.05) and their corresponding P concentrations for any given P fertilizer

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

rate were identified (critical data points) and included in the database used to calculate P_c . When the greatest TB value was obtained in two or more different P fertilization treatments, the value associated with the lower P rate was selected. Treatments with TB values greater than those used to calculate P_c were considered to represent non-limiting P conditions, whereas treatments with lower TB values were considered to represent limiting P conditions.

The decrease in the P concentration observed in the experiment with increasing TB values (obtained for critical data points) was fitted to the following model, which has previously been used to define the critical nitrogen curve for potato crops (Greenwood et al. 1990; Duchenne et al. 1997; Bélanger et al. 2001; Giletto and Echeverria 2012):

$$P_c = a TB^{-b} \quad \text{Equation 1}$$

Where P_c is the critical P concentration ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ of DM), TB is expressed in Mg ha^{-1} , and a and b are fitting parameters. This model was developed using TB values ranging from 1 to 16 Mg DM ha^{-1} (Greenwood et al. 1990; Justes et al. 1994). Parameter a represents the P concentration when the TB is at least 1 Mg ha^{-1} . Parameter b is dimensionless and represents the coefficient of dilution, which describes the relationship between decreasing P concentrations and increasing TB values.

The TB value and P concentration from the TB data for the 2005-06 and 2012-13 seasons were used to validate the parameters of the critical P dilution curve. In each trial and for each sampling date, the treatments were classified using Fisher's LSD test. Treatments with significantly ($P \leq 0.05$) higher TB values (and corresponding P concentrations) were considered non-limiting P conditions, whereas treatments with significantly lower TB values (and corresponding P concentrations) were considered limiting P conditions.

The PNI was calculated by dividing the P concentration in the TB at each sampling date by the P_c (Bélanger et al. 2001). If $PNI = 1$, the P nutrition was considered optimal. If $PNI > 1$, then the P nutrition was considered excessive; whereas if $PNI < 1$ the P nutrition was considered insufficient. For all growing seasons, the relative yield (RY) was calculated as the ratio between the tuber yield obtained for a given P rate and the tuber yield obtained with the greatest P rate, multiplied by 100.

Statistical analyses were performed using Statistical Analysis Systems (SAS 9.1, 2002). The TB and P concentrations in the TB for the different P treatments and for each sampling date and trial were compared using Fisher's LSD test procedure of SAS ($P \leq 0.05$). The P dilution curve describing the relationship between the P concentration in the TB and the TB of the potato crop (for $TB \geq 1 \text{ Mg ha}^{-1}$) was fitted using the SAS NLIN procedure. The relationship between the P concentration in the TB and the TB (for $TB < 1 \text{ Mg ha}^{-1}$) was described by linear regression (REG). The relationship between relative tuber yields and PNI measured at 60–80 DAP in each of the five trials was adjusted using the Cate and Nelson (1971) procedure. A $PNI = 1$ and a $RY = 97\%$ were established as vertical and horizontal lines, respectively, to define four quadrants representing: 1) P-sufficient plants and a correct diagnosis (RY greater than 97% and

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

PNI above the P_c); 2) P-sufficient plants and an inadequate diagnosis (RY greater than 97% and PNI less than 1); 3) P-deficient plants and an incorrect diagnosis (RY less than 97% yield and PNI under 1); 4) P-deficient plants and an incorrect diagnosis (RY less than 97% and PNI greater than 1). PNI quadrants 1 and 3 were considered positive while 2 and 4 were considered negative (Figure 5.6).

5.4 RESULTS AND DISCUSSION

5.4.1 Yield response to P fertilization

Fresh potato yields ranged from 37 to 70 Mg ha⁻¹, across the trials and P rates (Table 5.5.2). These yields agree with those reported by Caldiz (2006) for industrially grown potatoes in the same region. The tuber yield was significantly affected by the trial, the P rate and the interaction between these two factors (Table 5.2). The RY of the unfertilized trials ranged from 66-87% of that obtained from the trials fertilized with the maximum P rate. Positive yield responses to P application were evident in all of the experiments except growing season 2006-07 (Table 5.2) in which P availability was close to the threshold value (32 mg kg⁻¹ for Bray1).

Table 5.2: Effect of P fertilizer rates on fresh tuber yield

Growing season	Potato yield at different P rates					
	0	25	50	100	Pr> F	Average
	-----Mg ha ⁻¹ -----					Mg ha ⁻¹
2005-06	49.18c	55.46 bc	62.83 ab	69.66 a	**	59.26
2006-07	36.57	39.35	39.09	42.20	ns	39.30
2009-10	37.15 b	39.90 b	53.89 a	55.92 a	*	46.71
2010-11	44.72 b	64.20 ab	65.68 a	73.42 a	**	62.07
2012-13	49.38 c	53.62 bc	64.00 b	67.51 a	**	58.63
Average	43.30	50.51	57.10	61.74		53.19
ANOVA	Effect	Pr>F				
	Trial	<0.0001				
	P rate	<0.0001				
	trail x P rate	0.0069				

Values followed by the same letter in the same row are not significantly different (P<0.05) according to the LSD test.

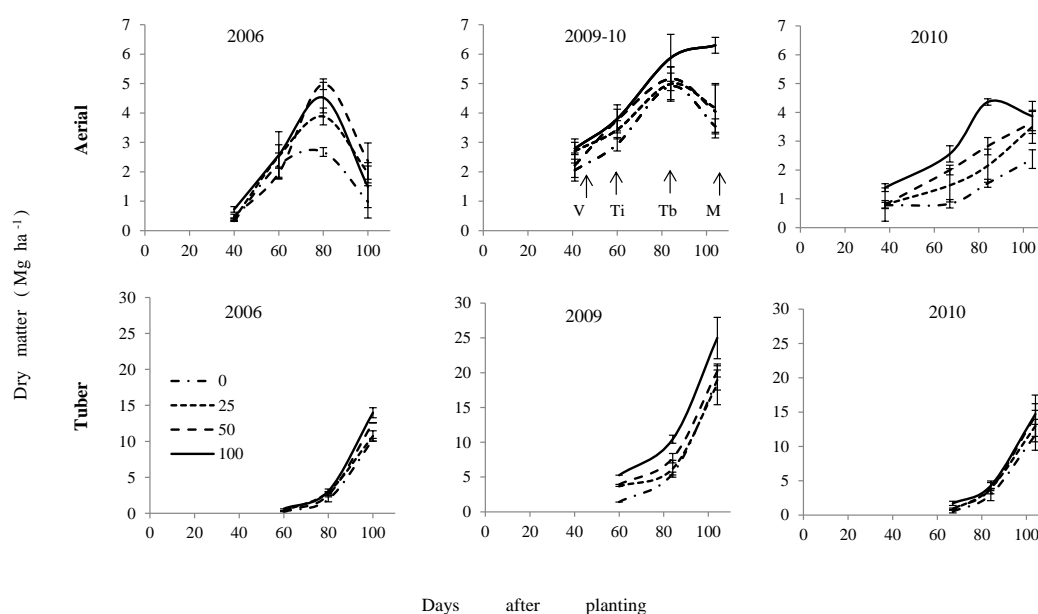
ns: not statistically significant; *P< 0.05; **P<0.01

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

5.4.2 Determination of P concentration in the whole plant

Dry matter accumulation

The distribution of DM between the aerial and tuber plant parts for each sample date and growing season used to define the P dilution curve is shown in Figure 5.1. According to Pereira and Shock (2006), potato plants have five growth stages: sprout development (I), vegetative growth (II), tuber initiation (III), tuber bulking (IV), and tuber maturation (V). Potato development in stages I and II lasts from 30 to 50 DAP. During these stages, roots and stolons are developed below ground, leaves and branches are developed on emerged sprouts, and photosynthesis begins. As a result, only aerial DM production was determined at the 40 DAP sampling date (Figure 5.1). At the tuber initiation stage, the aerial DM accumulation continues and tubers form on stolon tips but are not yet appreciably enlarged. Although tuber DM was determined at 60 DAP, the contribution of the aerial part of the plant to its total DM was still relatively great (Figure 5.1). At the tuber bulking stage (which began at around 80 DAP), the tubers become the dominant site for carbohydrate and inorganic nutrient storage and photosynthesis gradually decreases (Pereira and Shock 2006; Figure 5.1).



Crop growth stages: V= vegetative growth; Ti= tuber initiation; Tb= tuber bulking; M= maturation

Figure 5.1: Effect of P fertilization with 0, 25, 50 and 100 kg P ha⁻¹ on aerial and tuber dry matter accumulation during the 2006/07, 2009/10 and 2010/11 potato growing seasons.

Increasing P fertilization rates resulted in increased aerial and tuber DM values for all sampling dates and growing seasons, although this effect was not always significant (data not shown). At the tuber maturation stage, leaves turn yellow and vines die. In consequence, the aerial DM began to decrease while tuber growth continued to increase (Figure 5.1).

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

During the growing season, the TB ranged from 0.33 to 32.06 Mg ha⁻¹, depending on the P rate, sampling date and growing season (Table 5.3). The increase in the TB of potato cultivars due to P fertilization had also been reported by Dyson and Watson (1971) and Jenkins and Ali (1999). On the other hand, a reduction in the TB or growth rate under P deficient conditions had also previously been described (Dechassa et al. 2003; Covarrubias-Ramírez 2005; Zelalem, et al. 2009; Fleisher et al. 2013) and attributed to a limited amount of photosynthetically active radiation being absorbed (Colomb et al. 1995) and/or to a less efficient conversion of the intercepted radiation (Plenet et al. 2000). Fernandes et al. (2015) concluded that high soil P availability increases the P concentration and TB production in all potato organs. Jenkins and Mahmood (2003) and Fleisher et al. (2013) explained that TB production is associated with a greater development of lateral branches and the presence of a greater number of leaves and a greater photosynthetic leaf area, conditions promoted by the availability of adequate amounts of P.

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

Table 5.3: Average total biomass (TB) determined during the 2006-07, 2009-10 and 2010-11 growing seasons for the experimental potato fields.

Growing season	Days after Planting (DAP)	Applied P (kg ha ⁻¹)				Pr > F
		0	25	50	100	
		TB (Mg ha ⁻¹)				
2006-07	40	0.33 c	0.40 cb	0.49 b	0.72 a	**
	60	2.46 a	2.77 a	2.40 a	2.75 a	Ns
	80	4.62 b	6.88 a	7.53 a	7.61 a	*
	100	11.13 b	14.17 a	13.57 a	12.66 a	£
2009-10	40	2.06 b	2.9 b	2.22 b	2.79 a	£
	60	4.57 b	7.09 b	7.68 b	6.06 a	£
	80	10.52 b	11.17 b	12.91 b	21.09 a	£
	100	22.4 b	22.50 b	24.50 b	32.06 a	£
2010-11	40	0.78 b	0.80 c	0.69 c	1.39 a	**
	60	1.33 c	2.27 b	2.93 b	4.28 a	**
	80	4.53 c	6.06 bc	6.66 ab	7.97 a	£
	100	14.07 b	16.44 ab	17.42 ab	18.78 a	£
ANOVA	Effect	Pr>F				
	Trial	< 0.0001				
	P rate	< 0.0001				
	trial x P rate	0.2705				
	DAP	< 0.0001				
	trial x DAP	< 0.0001				
	DAP x P rate	0.0370				
	trial x P rate x DAP	0.3904				

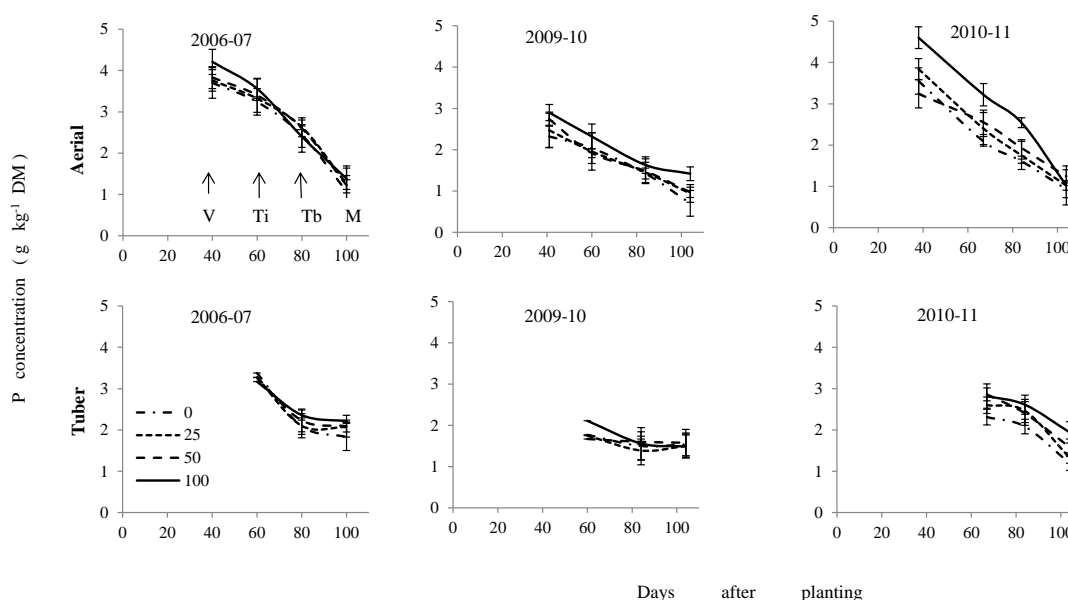
Values followed by the same letter in the same row are not significantly different (P<0.05) according to the LSD test.

ns: not statistically significant; £P< 0.1; *P< 0.05; **P<0.01

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

Phosphorus accumulation

Phosphorus concentration in aerial and tuber fractions (Figure 5.2) decreased as the growing season progressed and was always greater in the plots fertilized with 100 kg ha⁻¹ than in those that received other treatments (P<0.1; data not shown). Across the treatments and DAP, the aerial P concentration decreased over time from 4.7 to 0.7 g kg⁻¹ DM, whereas the tuber P concentration declined from 4.1 to 1.0 g kg⁻¹ DM. Similar P concentration values were reported by McCollum (1978) for aerial (3.5–1.0 g kg⁻¹ DM) and tuber (4.2–1.5 g kg⁻¹ DM) fractions of potato plants grown under different soil P availability conditions. The increase in tuber P concentration with the application of P fertilizers has also been reported by other researchers (Maier et al. 2002; Sanderson et al. 2003; Rosen and Bierman 2008; Mendoza-Cortez et al. 2012; Fernandes et al. 2015), with the magnitude varying according to the edaphic characteristics and the cultivars used.



Crop growth stages: V= vegetative growth; Ti= tuber initiation; Tb= tuber bulking; M= maturation

Figure 5.2: Effect of P fertilization with 0, 25, 50 and 100 kg P ha⁻¹ on P concentration in potato tissues (aerial and tuber) during the 2006/07, 2009/10 and 2010/11 growing seasons.

As a result of the decrease in the P concentration in aerial and tuber fractions associated with the dilution effect, the P concentration in the TB decreased for all the treatments as the growing season progressed from 40 to 100 DAP, with values ranging from 4.6 to 1.1 g kg⁻¹ DM (Table 5.4). The decline in the P concentration in the TB associated with increasing biomass is an ontogenetic process and its expression in terms of crop mass accumulation allows an overall simple representation of complex processes. In the vegetative growth stages, P uptake by roots is by far the most important P source for the plant. As root growth rates decline, the P remobilization process can provide significant amounts of P to new growth. This change from uptake-dominated P supply to remobilization-dominated P supply probably happens in the late vegetative or early reproductive stage of crop development. It is therefore important to

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

maintain an adequate level of P nutrition in the earlier stages of growth. As plants tend to remobilize at least 50% of their P from senescing leaves, and often much more (Aerts and Chaplin 2000), redistributed P is a quantitatively important P source for growth, especially during the later stages of plant development (Veneklaas et al. 2012).

Table 5.4: P concentration in the total biomass (aerial plant + tuber) (PC) during the 2006-07, 2009-10 and 2010-11 growing seasons for experimental potato fields.

Growing season	Days after planting	----- P applied (kg ha ⁻¹) -----				Pr> F
		0	25	50	100	
		PC (g kg ⁻¹ DM)				
2006-07	40	3.69 b	3.73 b	3.94 ab	4.23 a	**
	60	3.28 a	3.31 a	3.27 a	3.11 b	£
	80	2.51 a	2.39 a	2.52 a	2.33 b	£
	100	1.73 b	2.77 a	1.97 b	2.17 b	£
2009-10	40	2.32 b	2.42 b	2.74 ab	2.88 a	£
	60	1.92 b	1.84 b	1.83 b	2.30 a	£
	80	1.84 a	1.18 b	1.41 ab	1.68 ab	£
	100	1.48 a	1.38 a	1.48 a	1.47 a	Ns
2010-11	40	3.63 b	3.88 b	4.14 b	4.59 a	**
	60	2.17 b	2.49 b	2.64 b	3.04 a	**
	80	1.91 b	2.19 ab	2.21 ab	2.42 b	*
	100	1.14 b	1.20 b	1.58 a	1.68 a	**
ANOVA	Effect	Pr>F				
	Trial	0.001				
	P rate	< 0.0001				
	trial x P rate	0.1227				
	DAP	< 0.0001				
	trial x DAP	< 0.0001				
	DAP x P rate	0.0056				
	trial x P rate x DAP	0.2301				

Values followed by the same letter in the same row are not significantly different (P<0.05) according to the LSD test.

ns: not statistically significant; £P< 0.1; *P< 0.05; **P<0.01

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

5.4.3 Estimation of P dilution curve parameters

According to Alvarez (2102), Mourad et al. (2005) and Salama et al. (2012) only when the results are validated with other independent experiments, the regression models have good generalization ability. For this reason, only a subset of experiments to develop the P dilution curve was used for the validation of the model. The trials used to define the critical P dilution curve were selected to cover a wide range of initial soil P availability (low, medium and high initial soil available P) and an independent data set with medium and low initial soil available P (for the 2005-06 and 2012-13 seasons) were used to validate the parameters of the critical P dilution curve.

The critical P dilution curve was fitted (Figure 5.3) using critical data points obtained from the 2006-07, 2009-10 and 2010-11 growing seasons (Tables 3 and 4). When a dilution curve is used in the N diagnosis method of C3 and C4 crops and winter wheat, the critical N concentration (Nc) is obtained using TB information ranging from 1 to 16 Mg ha⁻¹ (Greenwood et al. 1990; Justes et al. 1994). For biomass values lower than 1 Mg ha⁻¹, Nc is given a constant value due to the small decline in Nc with increasing TB (Justes et al. 1994) caused by the lack of competition for light between isolated plants (Lemaire and Gastal 1997). Data points with TB <1 (Table 3) were used to establish the constant value of the critical P dilution curve. The mean P concentration in the TB was 3.894 g 100 g⁻¹ TB (± 0.332), which could be considered a constant critical value (Figure 5.3a).

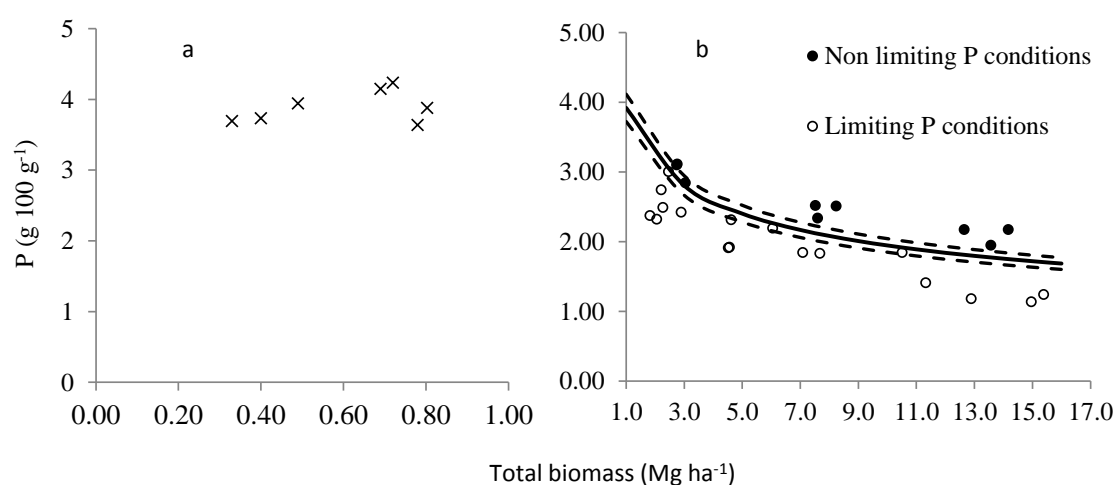


Figure 5.3: Relationships between P concentration and (a) Total biomass <1 Mg DM ha⁻¹ and (b) Total biomass >1 Mg DM ha⁻¹.

Solid line represents the critical P dilution curve [$P_c = 3.919 W^{-0.304}$] for potato crop growing under non-limiting N and water conditions. Dashed lines represent the confidence band (P=0.95)

Critical data points with TB ranging from 1 to 16 Mg ha⁻¹ were identified to determine the critical P dilution curve (Figure 5.3b); they were selected according to the statistical criteria previously defined to determine Pc. Equation 2 associates the decrease in P concentration in the TB with the increase in TB.

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

$$P_c (\text{g } 100\text{g}^{-1}) = 3.919 \text{ TB}^{-0.304} \quad (R^2 = 0.91, P = 0.0009) \text{ Equation 2}$$

Our results confirmed the strong relationship between P_c and TB, since the model explained 91% of the decrease in the P concentration associated with the increase in TB. It can be observed from Fig. 3b that all of the data points from the P-limiting treatment were close to, or below, the P_c , whereas those from the non-P-limiting treatment were close to, or above, the P_c dilution curve.

The a value for Equation 2 ($3.919 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TB}$) was very similar to the constant value obtained for biomass values of less than 1 Mg ha^{-1} ($3.902 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ TB}$). Combining both models, the critical P dilution curve for potato can be described by Equation 2 when the TB is between 1 and 16 Mg TB ha^{-1} and by the constant critical value $P_c = 3.902 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ DM}$, when the TB is $<1 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Although the P_c has never been tested in potato, the definition of P_c as a function of shoot biomass has been reported in Timothy (*Phleum pratense* L.; Belanger and Ziadi 2008) and wheat (*Triticum aestivum* sp.; Belanger et al. 2015). In Timothy, the P_c changes with sward age ($P_c = 3.27 \times W^{-0.20}$ and $P_c = 5.23 \times W^{-0.40}$ in older and younger swards, respectively). In wheat, the a value varies between 3.62 and $4.94 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ of DM while the b values vary from -0.21 to -0.49. Using these P_c values as a reference, it can be assumed that the values of coefficients a and b obtained for the potato crop (Equation 2) are within the same range as those obtained for other C3 species.

In a similar way to N_c (Lemaire and Gastal 2009), the critical P dilution curve identified three different types of P status. Data points below the curve indicate situations in which P availability limits potato growth, whereas data points above the curve indicate excessive P nutrition. Data points located on the curve correspond to conditions in which P is neither a limiting factor nor excessive. The P_c dilution curve was tested using independent data sets from two other experiments conducted in the 2005-06 and 2012-13 growing seasons. The results obtained show that the P_c was good at discriminating between P-limiting and non-P-limiting growth conditions (Figure 5.4): all the data points identified as limiting P conditions were located under the critical P dilution curve whereas all but one of those relating to non-limiting P conditions were located either above or near the critical P dilution curve. These results validate the use of this critical P dilution model as a tool for identifying the P nutritional status of a potato crop.

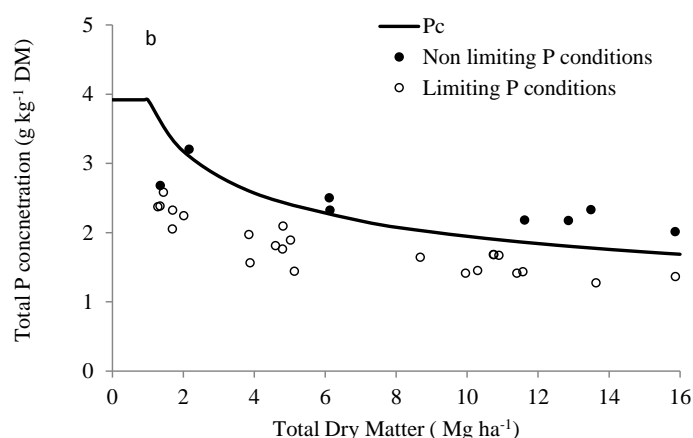
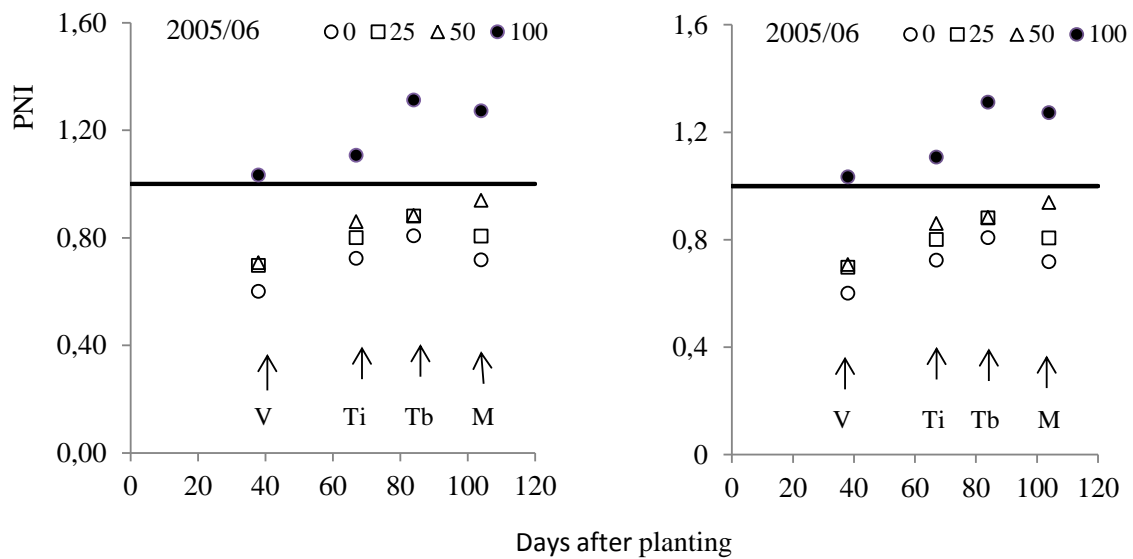
Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

Figure 5.4: Validation of the critical P dilution curve (Pc) for potato crop with data points corresponding to the 2005/06 and 2012/13 growing seasons.

5.4.4 P nutrition index (PNI)

The PNI for each sampling date was calculated based on data from the 2005-06 and 2012-13 growing seasons (which were used to validate Pc) (Figure 5.5). In both growing seasons, the application of P fertilizer at rates of 0, 25 and 50 kg ha⁻¹ was insufficient to cover the P requirements of the potato crops for maximum accumulations of TB in all the growing seasons (PNI <1), while 100 kg ha⁻¹ ensured adequate crop nutrition from tuber initiation onwards (60 DAP) (PNI >1). Based on the initial soil Bray1 concentration (Table 5.1) and on the maximum yield (Table 5.2) for each trial, Echeverria and Giletto (2015) recommended respective P application rates of 80 and 96 kg ha⁻¹ for the 2005-06 and 2012-13 trials to achieve maximum yields. These results are consistent with the values determined by PNI and would support the use of this last index as a guide for in-season P fertilization practices.

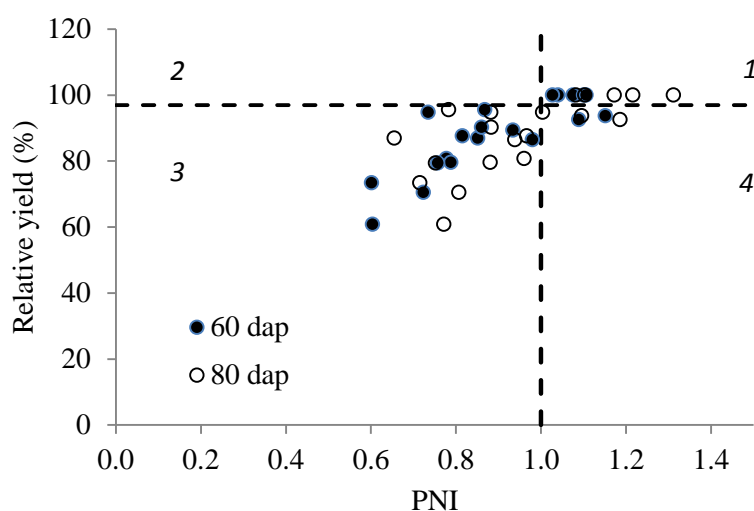
Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P



Crop growth stages: V= vegetative growth; Ti= tuber initiation; Tb= tuber bulking; M= maturation

Figure 5.5: Phosphorus nutrition index (PNI) of potato crops fertilized with 0, 25, 50 and 100 kg P ha⁻¹. The PNI is shown at different crop growth stages expressed in days after planting for the 2005/06 and 2012/13 growing seasons.

Figure 5.6 shows the relationship between relative tuber yield measured at harvest and PNI measured at 60 - 80 DAP, for all five trials. Using the Cate and Nelson (1965) procedure, it was determined that 88% of the data points were located in the positive quadrants (1 and 3) while only 12% were in the negative quadrants (2 and 4). These results confirm the possibilities of determining the nutritional status of the potato crop based on PNI at 60-80 DAP. These results are better than those obtained by other methods to estimate in-season P nutritional status. For example, Maier et al. (1989) found that the relative tuber yield increased with increasing total P concentrations in the petioles, with respective R² values of 0.73 and 0.62 for the Mitscherlich model and the Cate–Nelson separation. The Pc option could therefore help to adjust the traditional fertility management strategy for potato production (based on initial soil fertility) with in-season P fertilization (after tuber initiation). Furthermore, interest in P fertirrigation application via fertigation has increased due to the development of highly soluble fertilizers and to the possibility of applying P fertilizers while irrigating or spraying fungicides, herbicides, and insecticides. These combined applications would reduce the cost of crop production while maintaining soil quality and the health of the agro-ecosystem (Fageria et al. 2009).

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

1 and 3: positive quadrants; 2 and 4 negative quadrants (Cate and Nelson, 1965; Dow and Roberts 1982).

Figure 5.6: Relationship between the relative yield and phosphorus nutrition index (PNI) at 60 and 80 days after planting (dap). The PNI was calculated by dividing the P concentration in the total dry matter at each sampling date, fertilization rate and growing season by the P_c obtained from the critical P dilution curve (Figure 5.3).

However, the need to determine the actual crop biomass and its P concentration in order to calculate PNI values represents a major practical obstacle to using PNI at the farm level. Even so, this new methodology offers the only reliable way to correct P nutrition during the critical period of potato growth and to ensure maximum yields without having to apply large doses of P at planting. This strategy could help to achieve a much more efficient use of P fertilizer and to minimize the cost and environmental threat associated with applying P at high rates.

The usefulness of foliar P applications or through the irrigation system is contradictory in potato. Hiller (1995) and Rosen (2014) reported that foliar P applications increase yield as compared to the control treatments. On the other hand, Allison et al. (2001) found no effect of foliar P applications on tuber yield or number of tubers. Hopkins et al. (2010) evaluating the relative impact of three P fertilization strategies (pre-planting broadcast, in-season fertigation, and split applications) on potato yield concluded that P fertigation should be only used to correct in-season deficiencies (“rescue” situations). Even if in-season P fertilization can play an important role in potato production, the prediction of its potential benefits is difficult and they should be evaluated under different environmental conditions.

5.5 CONCLUSIONS

The P concentration in the TB decreased over the growing season, with a higher P application rate generally resulting in a greater plant P concentration. For the first time, a critical P dilution curve for an irrigated potato crop was plotted and validated using independent data sets. This

curve was used to estimate the PNI throughout the potato growing season based on different P application rates. Our results suggest that the PNI could be used as a reliable indicator of P stress levels during the growing season, since it reflects the nutritional status and yield response of the potato crop. The ability to determine the P nutritional status at relatively early periods during crop growth opens the possibility to correct the amount of P applied at planting through foliar fertilization.

Acknowledgements

This paper presents partial results of the doctoral thesis (Universitat de Lleida) of Ing. Agr. Ester Zamuner and was financed with funds from research project of the National University of Mar del Plata AGR 447/14 and INTA Soil PN.

5.6 REFERENCES

- Aerts R., and F.S. Chapin. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research* 30: 1–67.
- Allison, M. F., J. H. Fowler, and E. J. Allen. 2001. Effects of soil- and foliar-applied phosphorus fertilizers on the potato (*Solanum tuberosum*) crop. *The Journal of Agricultural Science* 137: 379–395.
- Alvarez, R. 2012. Métodos estadísticos usados para elaborar modelos de respuesta a la fertilización. In Álvarez R., Prystupa P., Rodrigues M.B. Álvarez C. (ed). *Fertilización de cultivos y pasturas Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana*. 1ª edición. Editorial Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Buenos Aires. Argentina. p. 89-99.
- Bélanger, G., and N. Ziadi. 2008. Phosphorus and nitrogen relationships during spring growth of an aging timothy sward. *Agronomy Journal* 100: 1757-1762.
- Belanger, G., and J.E. Richards. 1999. Relationship between P and N concentrations in timothy. *Canadian Journal Plant Science* 79:65–70.
- Bélanger, G., J.R. Walsh, J.E. Richards, P.H. Milburn, and N. Ziadi. 2001. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in eastern Canada. *American Journal of Potato Research* 78: 355–364.
- Bélanger, G., Ziadi, N., Pageau, D., Grant, C., Högnäsbacka, M., Virkajärvi, P., Z. Hu, J. Lu, J. Lafond, and J. Nyiraneza. 2015. A model of critical phosphorus concentration in the shoot biomass of wheat. *Agronomy Journal* 107:963–970.
- Bray, R.H. and L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J.M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. P. 1179-1237. In: C. A. Black et al (ed). *Methods of soil analysis*. Part 2. Agron. Monog 9 ASA and SSSA, Madison, WI.
- Caldiz, D.O. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. McCain Argentina SA, Balcarce-BASF Argentina SA, Capital Federal. Argentina. 226 p.
- Cate, R.B., and L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal* 35:658-660.

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

- Colomb, B., A. Bouniols, and C. Delpech. 1995. Effect of various phosphorus availabilities on radiation use efficiency in sunflower biomass until anthesis. *Journal of Plant nutrition* 18: 1649-1658
- Covarrubias-Ramírez, J.M., S. Castillo-Aguilar, J.A. Vera-Núñez, R. Núñez-Escobar, P. Sánchez-García, R. Aveldaño-Salazar, and J.J. Peña-Cabriales. 2005. Phosphorus uptake and use efficiency by potato cultivar alpha using ³²P. *Agrociencia* 39: 127-136.
- Dechassa, N., M.K. Schenk, N. Claassen, and B. Steingrobe. 2003. Phosphorus Efficiency of Cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata), Carrot (*Daucus carota* L.), and Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil* 250: 215-224.
- Duchenne, T., J.M. Machet, and M. Martin. 1997. Potatoes. In: *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, ed. G. Lemaire, 119–130. Berlin: Springer.
- Dyson, P.W., and D.J. Watson. 1971. An analysis of the effects of nutrient supply on the growth of potato crops. *Annals of Applied Biology* 69:47-63.
- Cate, R.B. Jr. and L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil test analyses with plant response data. North Carolina State University Agricultural Experiment Station, Int. Soil Testing Series Tech. Bull. 1.
- Ekelöf, J. E., H. Asp and E.S. Jensen. 2012. Potato yield response to foliar application of phosphorus as affected by soil moisture and available soil phosphorus. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B–Soil & Plant Science*,62(7), 637-643.
- Echeverría, H.E., and C.M. Giletto. 2015. Papa. In: H.E. Echeverría y F.O. García (Eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*, 585-608. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Fageria, N. K., Filho, M. B., Moreira, A., and C.M. Guimaraes. 2009. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of plant nutrition* 32: 1044-1064.
- Fernandes, A. M., Soratto, R. P., and C. Pilon. 2015. Soil phosphorus increases dry matter and nutrient accumulation and allocation in potato cultivars. *American Journal of Potato Research* 92:117-127.
- Fleisher, D.H.Q., D.J. Wang, J.A. Chun Timlin, and V.R. Reddy. 2013. Effects of carbon dioxide and phosphorus supply on potato dry matter allocation and canopy morphology. *Journal of Plant Nutrition* 36: 566–586.
- Freeman, K.L., Franz, P.R., and R.W. De Jong. 1998. Effect of phosphorus on the yield, quality and petiolar phosphorus concentrations of potatoes (cvv. Russet Burbank and Kennebec) grown in the krasnozem and duplex soils of Victoria. *Animal Production Science* 38: 83-93.
- Giletto, C. M., and H. E. Echeverría. 2012. Critical nitrogen dilution curve for processing potato in Argentinean humid pampas. *American Journal of Potato Research* 89: 102-110.
- Greenwood, D.J., G. Lemaire, G. Gosse, P. Cruz, A. Draycott, and J.J. Neeteson. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany* 66: 425–436.
- Hedley, M.J., and M.J. McLaughlin. 2005. Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soils. In 'Phosphorus: agriculture and the environment', 181–252. AN Sharpley Ed. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America: Madison, WI.
- Hegney, M. A., McPharlin, I. R., and Jeffery, R. C. 2000. Using soil testing and petiole analysis to determine phosphorus fertiliser requirements of potatoes (*Solanum tuberosum* L. cv.

- Delaware) in the Manjimup-Pemberton region of Western Australia. *Animal Production Science* 40: 107-117.
- Hopkins, B.G., J.W. Ellsworth, A.K. Shiffler, T.R. Bowen, and A.G. Cook. 2010. Pre-plant versus in-season application of phosphorus fertilizer for Russet Burbank potato grown in calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 33: 1026-1039.
- Jenkins, P. D., and H. Ali. 1999. Growth of potato cultivars in response to application of phosphate fertiliser. *Annals of Applied Biology* 135: 431-438.
- Jenkins, P.D., and S. Mahmood. 2003. Dry matter production and partitioning in potato plants subjected to combined deficiencies of nitrogen, phosphorus and potassium. *Annals of Applied Biology* 143: 215–229.
- Johnston, A., E. Poulton, P.R., and R.P. 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., Rubæk, G.H., Ehlert, P.A.I., Genot, V., Hofman, G., Goulding, K., Recknagel, J., Provolo, G., and P. Barraclough. 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28: 419-435.
- Justes, E., B. Mary, J.M. Meynard, J.M. Machet, and L. Thelier-Huché. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany* 74: 397–407.
- Lemaire, G., and F. Gastal. 2009. Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. In *Crop physiology*, 171–211. V.O. Sadras, and D.F. Calderini, Ed. Elsevier.
- Lemaire, G., and J. Salette. 1984. Relationship between growth and nitrogen uptake in a pure grass stand: I. Environmental effects. *Agronomie* 4: 423–430.
- Mac Kerron, D.K.L., M.W. Young and H.V. Davies. 1995. A critical assessment of the value of petiole sap analysis in optimizing the nitrogen nutrition of potato crop. *Plant and Soil* 172: 247-260.
- Maier, N.A., K.A. Potocky-Pacay, and C.M.J. Williams. 1989. Comparison of the use of total phosphorus concentration and acetic acid soluble phosphorus concentration in petioles for assessing the phosphorus status of potato crops. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 29:433–438.
- Maier, N. A., M.J. McLaughlin, M. Heap, M. Butt, and M.K. Smart. 2002. Effect of current-season application of calcitic lime and phosphorus fertilization on potato tuber phosphorus concentration and leaf chemical composition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33: 2167-2188.
- Maier, N. A., K.A. Potocky-Pacay, J. Jacka, and C. M. J. Williams. 1989. Effect of phosphorus fertiliser on the yield of potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) and the prediction of tuber yield response by soil analysis. *Animal Production Science* 29: 419-431.
- McCollum, R.E. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes, I: Tuber yields and allocation of dry matter and P. *Agronomy Journal* 70: 51-57.
- Mendoza-Cortez, J. W., A.B. Cecílio-Filho, M.O. Rosa, and C.S. Nascimento. 2013. Growth of Potato Plants of the 'Asterix' Cultivar and Accumulation of Nutrients. *Journal of Agricultural Science* 5: 217-226.

Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

- Mohr, R. M., and D.L. Tomasiewicz. 2011. Effect of phosphorus fertilizer rate on irrigated Russet Burbank potato. *Communications in Soil science and Plant Analysis* 42: 2284-2298.
- Mourad, M., Bertrand-Krajewski, J. L., and Chebbo, G. 2005. Calibration and validation of multiple regression models for stormwater quality prediction: data partitioning, effect of dataset size and characteristics. *Water Science and Technology* 52: 45-52.
- Murphy, J., and J.P Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chemical Acta* 27: 31-36.
- Pereira, A. B., and C.C. Shock. 2006. Chapter 13: A review of agrometeorology and potato production. 1-39. http://www.agrometeorology.org/files-folder/repository/gamp_chapter13e.pdf. Accessed 8 June 2015.
- Rosen, C. J., and P.M. Bierman. 2008. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. *American Journal Potato Research* 85: 110-120.
- Rosen, C.J., K.A. Kelling, J.C. Stark, and G.A. Porter. 2014. Optimizing phosphorus fertilizer management in potato production. *American Journal Potato Research* 91: 145-160.
- Salama, M. S., Velde, R., Van der Woerd, H. J., Kromkamp, J. C., Philippart, C. J. M., Joseph, A. T., P. E. O'Neill, R. H. Lang, T. Gish, P. J. Werdell and Su, Z. 2012. Technical Note: Calibration and validation of geophysical observation Models. *Biogeosciences* 9: 2195-2201.
- Sanderson, J.B., J.A. MacLeod, B. Douglas, R. Coffin, and T. Bruulsema. 2003. Phosphorus research on potato in PEI. *Acta Horticulturae* 619: 409-417.
- SAS Institute. 2002. The SAS system for Windows. Release version 9.1. SAS Inst., Cary, NC.
- Saunders, W.M.H., and E.G. Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. *Journal of Soil Science* 6: 254-267.
- Stark, J. C., D.T. Westermann, and B. Hopkins. 2004. Nutrient management guidelines for Russet Burbank potatoes. University of Idaho, College of Agricultural and Life Sciences. <http://www.extension.uidaho.edu/Nutrient/pdf/Potato/Nutrient%20Management%20Guidelines%20for%20Russet%20Burbank%20Potatoes.pdf>. Accessed 8 June 2015.
- Veneklaas, E. J., H. Lambers, J. Bragg, P.M. Finnegan, C.E. Lovelock, W.C. Plaxton, C.A. Price, W. Scheible, M.W. Shane, P.J. White, and J.A. Raven. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist* 195: 306-320.
- Walkley, A. and I.A. 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.
- Zamuner, E.C., L.I. Picone, and H.E. Echeverría. 2006. Comparison of phosphorus fertilization diagnostic methods for wheat under no-tillage. *Soil Tillage Research* 89: 70-77.
- Zelalem, A., T. Tekalign, and D. Nigussie. 2009. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to different rates of nitrogen and phosphorus fertilization on vertisols at DebreBerhan in the central highlands of Ethiopia. *African Journal of Plant Science* 3: 16-24.
- Ziadi, N., G. Bélanger, A. Claessens, L. Lefebvre, A.N. Cambouris, N. Tremblay, M.C. Nolin, and L. Étienne. 2010. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agronomy Journal* 102: 241-250.
- Ziadi, N., G. Belanger, A.N. Cambouris, N. Tremblay, M.C. Nolin, and A. Claessens. 2007. Relationship between P and N concentrations in corn. *Agronomy Journal* 99:833-841.

Capítulo 5:
Curva de dilución para el diagnóstico de deficiencia de P

Ziadi, N., M. Brassard, G. Bélanger, A.N. Cambouris, N. Tremblay, M. C. Nolin, A. Claessens, and L. Parent. 2008. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in Eastern Canada. *Agronomy Journal* 100: 271-276.

CAPÍTULO 6:

DISCUSIÓN GENERAL

6.1 Discusión General

La demanda social creciente de alimentos, fibras y combustibles y la preocupación por la calidad del agua y del aire ha hecho que la mejora de la productividad y la eficiencia de uso de los recursos sean objetivos esenciales y simultáneos para la agricultura. En el Año Internacional de la Papa (2008) se señaló la importancia de focalizar la atención mundial hacia soluciones que permitan intensificar en forma sostenible los sistemas agrícolas y frenar o invertir la pérdida de recursos naturales. En este contexto, se planteó como **objetivo central de la tesis, generar información que permita definir pautas de manejo de la fertilización fosfatada del cultivo de papa regado tendiente a lograr alta productividad, económicamente viable y con mínimo impacto ambiental**. Para abordar esta temática, se plantearon diferentes ejes temáticos que se desarrollaron en 4 Capítulos.

En primera instancia se indagó sobre la problemática ambiental de la producción de papa (**Capítulo 2**). Se determinó el valor concentración de P en el suelo a partir del cual puede existir riesgo de pérdida de P desde el suelo hacia cuerpos de agua (**P crítico ambiental**) y se examinaron los cambios en la concentración de P en el suelo a lo largo del ciclo de crecimiento de cultivos de papa fertilizados. El P crítico ambiental varió con la técnica analítica utilizada para determinarlo siendo de **39, 34 y 27 mg kg⁻¹ para Bray1, Mehlich3 y Olsen**, respectivamente (Figura 2.2). En los suelos de la región, los valores de P-Bray1 en muestras superficiales de suelo raramente superan los 39 mg kg⁻¹ (Sainz Rozas et al., 2012), por lo que podría pensarse que no existe riesgo generalizado de pérdida de P. Sin embargo, los resultados obtenidos demostraron que la fertilización fosfatada puede elevar los niveles de P en el suelo por sobre el P crítico ambiental en los primeros 60 días después de la plantación del cultivo de papa (Figura 2.3).

Posteriormente, se centró la atención en la problemática agronómica de la fertilización fosfatada del cultivo de papa (**Capítulo 3**). Se analizó la respuesta en rendimiento en función de la concentración de P en el suelo con los métodos analíticos evaluados en el Capítulo 2, utilizando diferentes modelos matemáticos y expresiones de respuesta en rendimiento. Luego de discutir respecto a las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, se determinó que el valor de **P crítico agronómico es 32, 11 y 2,8 mg kg⁻¹ para Bray1, Mehlich3, Olsen y CaCl₂**, respectivamente. Por lo tanto, si el análisis de muestras de suelo de 0-20 cm de profundidad tomadas previo a la siembra del cultivo arroja un valor de concentración mayor al P crítico agronómico, la fertilización fosfatada no producirá respuesta en rendimiento significativa y causará la acumulación de P en el suelo.

El aumento del P del suelo conlleva riesgo ambiental solo si se sobrepasa el P crítico ambiental. Como puede observarse en la Figura 6.1, realizada a partir de la información del **Capítulo 2 y 3** (Figura 2.2; Figura 3.1, Tabla 3.3), el valor de P crítico ambiental es mayor al P crítico agronómico. Los gráficos de P crítico para Mehlich3, Olsen y CaCl₂ no se muestran puesto que siguen la misma tendencia (P crítico ambiental mayor a P crítico agronómico). De manera similar, Bai et al. (2013) determinaron que los valores de P crítico agronómico (determinado por el método Olsen) para maíz, trigo y arroz en diferentes suelos de China, son más bajos que los valores críticos ambientales determinados con CaCl₂. Estos autores concluyen que, por esta

razón, los valores críticos para el rendimiento del cultivo pueden ser considerados valores umbrales máximos para la seguridad de P en el suelo.

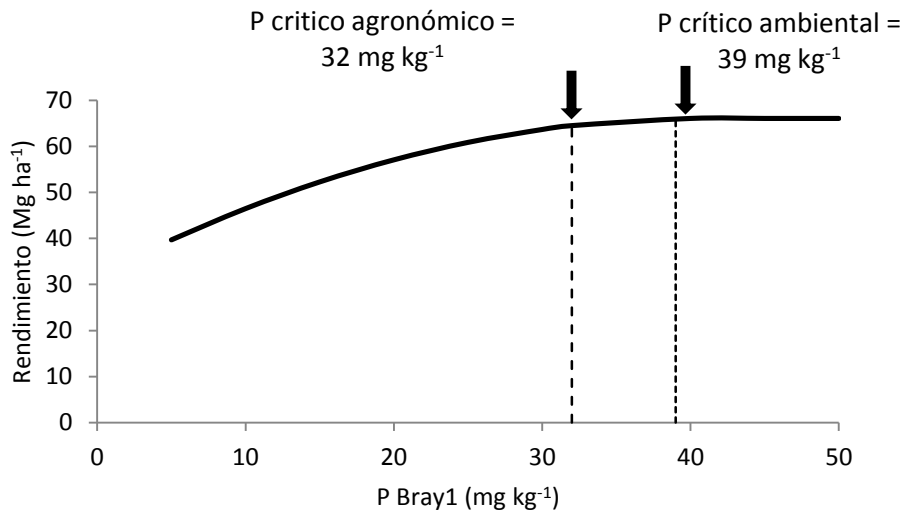


Figura 6.1: Relación entre P extractable Bray1 (P-Bray1) previo a la plantación (0-20 cm de profundidad) y rendimiento del cultivo de papa. P crítico agronómico = concentración de P en el suelo para obtener el máximo rendimiento; P crítico ambiental = concentración de P en el suelo a partir de la cual existe riesgo ambiental de pérdida de P).

Posteriormente se definió la dosis de P recomendable aplicar al cultivo de papa regada para optimizar el rendimiento y reducir el riesgo ambiental asociado a la fertilización (Tabla 3.4). En la Figura 6.2 se sintetizan los principios utilizados en el Capítulo III para definir las dosis de P recomendadas. El objetivo es moverse desde valores de concentración de P en el suelo que representan riesgo ambiental (muy alta disponibilidad de P) o niveles de deficiencia (muy baja disponibilidad) hacia un nivel de P en el suelo que asegure una producción estable (P crítico agronómico). Cuando la disponibilidad de P está por encima del P crítico ambiental, la fertilización se debe suspender, para disminuir el uso de los recursos limitados (fertilizantes) y los riesgos de pérdidas por lixiviación y escorrentía. La realización de experiencias a campo durante 9 años y en condiciones variables de fertilidad de suelos, confirmaron que la metodología empleada para la recomendación es adecuada para lograr el incremento, mantenimiento o disminución del P del suelo según corresponda. Li et al. (2011) utilizaron un esquema teórico de fertilización similar para trigo en China e informan que reduce la demanda de fertilizante respecto al enfoque tradicional utilizado en ese país, basado en la respuesta en rendimiento.

Criterios	Recomendación de fertilización	Nivel de P en el suelo	
Control	No fertilizar	Muy alto	
	Dosis de P < Absorción P	Alto	
Suficiencia	Dosis de P = Absorción P	Medio	
Reconstrucción y mantenimiento	Dosis de P > Absorción P	Bajo	
	Dosis de P > Absorción P	Muy bajo	
	Dosis de P > Absorción P	Muy bajo	

Figura 6.2. Modelo teórico para el diagnóstico de los requerimientos de fertilización fosfatada en el cultivo de papa. Adaptado de Li et al. (2011).

Ruark et al. (2014) sostienen que la renuencia de los productores a seguir las sugerencias de prácticas de manejo que impliquen el cuidado del medio ambiente, está asociado a las diferentes recomendaciones que reciben desde la Universidad y desde la industria. En el caso particular de Argentina, se suma la característica de los productores que arriendan campos quienes tienen un menor sentido de pertenencia al tejido social en el que está ubicado el establecimiento, lo que significa un desincentivo para la implementación de prácticas agrícolas que tiendan a minimizar la contaminación (González and Rodriguez, 2011). Entendiendo que la problemática económica tiene un alto impacto en el productor agropecuario al momento de decidir la estrategia de fertilización, se plantearon como objetivos del **Capítulo 4**, evaluar la ventaja de utilizar un recubrimiento del superfosfato triple de calcio (polímero Avail) y establecer la Dosis óptima económica (DOE) en situaciones con diferentes relaciones de precios fertilizante/tubérculo. Los cálculos teóricos y la evidencia derivada de ensayos de campo y macetas demostraron que la cantidad de recubrimiento recomendada comercialmente no produce ningún efecto significativo sobre los procesos de retención de P en un suelo *Argiudol típico* (Figura 4.1.2) por lo que no mejora el rendimiento ni la eficiencia de uso del P (Tabla 4.1.1, Figura 4.1.2, Tabla 4.2.4). Además se demostró que la disponibilidad de P en el suelo previo a la siembra es el factor más importante en la determinación de la DOE (Figura 4.2.2).

Una característica importante del análisis de suelo exitoso es la predicción de la cantidad de fertilizante que se necesita para optimizar el rendimiento y/o el retorno económico, en la Figura 6.3 se integran la dosis de fertilizante que produce el máximo rendimiento (información generada en el **Capítulo 3**) junto con la que produce el máximo beneficio económico

(información generada en el **Capítulo 4**). Se muestra solamente la relación para P-Bray1, ya que la correspondiente a P-Mehlich3 es similar. Cuando la disponibilidad de P en el suelo previo a la siembra del cultivo es menor o igual al P crítico agronómico, la dosis de P que es recomendada para obtener el máximo rendimiento y minimizar el riesgo ambiental de pérdida de P (metodología propuesta en Capítulo 3) es también la adecuada para tener el máximo beneficio económico. Esta situación es consecuencia del bajo costo que representa la fertilización respecto al costo total de producción del cultivo de papa (Constantino 2005; González y Rodríguez 2011).

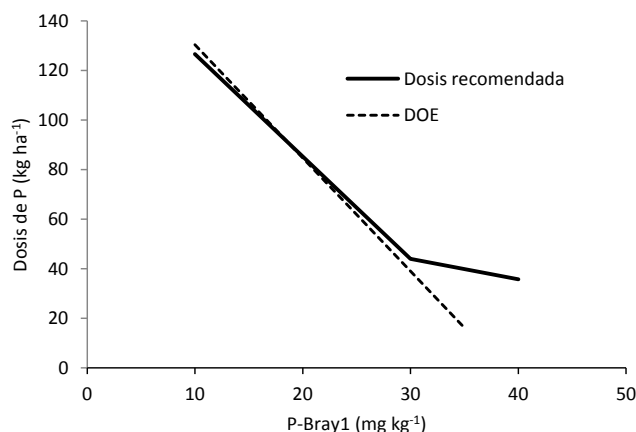


Figura 6.3. Dosis de P recomendada (calculada teniendo en cuenta el P crítico agronómico y ambiental, el P requerido por el cultivo para un rendimiento específico y el P necesario para aumentar o mantener la concentración de P del suelo, Capítulo 3) y dosis óptima económica (DOE) para relación de precios P/tubérculo mediana (Capítulo 4).

Una vez aplicado el fertilizante en la dosis apropiada desde el punto de vista ambiental, agronómico y económico, es importante monitorear el estado nutricional del cultivo para asegurar que el P esté disponible en la cantidad suficiente y el momento más beneficioso para el crecimiento óptimo de los tubérculos. Por esta razón, en el **Capítulo 4** se investigaron aspectos relacionados a la nutrición fosfatada del cultivo de papa. Se determinó y validó la curva de dilución de P para el cultivo de papa y se comprobó la utilidad del Índice de nutrición fosfatada para estimar el estado nutricional y el rendimiento. La falta de investigación previa respecto a la evaluación de la nutrición fosfatada en papa a través de la curva de dilución de P, hace que este sea un aporte original a los métodos de diagnóstico de deficiencias de P en el cultivo de papa basados en análisis de planta. La información generada permitirá individualizar situaciones de deficiencia o excesos de P durante la estación de crecimiento, que podrán ser corregidas con fertilizaciones fosfatadas aplicadas junto con los pesticidas, manteniendo la calidad del suelo y la salud del sistema productivo.

6.2 Conclusión general

En la presente investigación se pudieron determinar los valores de concentración de P en el suelo críticos desde el punto de vista ambiental y agronómico. Utilizando estos umbrales como referencia, se propuso y validó con información de campo, una metodología que permite definir la dosis de fertilización fosfatada que maximiza el rendimiento y el beneficio económico y minimiza el riesgo ambiental. Además, se ajustó la ecuación empírica para la curva de dilución de P en planta, y se comprobó que el índice de nutrición fosfatada es un indicador adecuado del estado nutricional fosfatado y del rendimiento del cultivo de papa. La integración de esta información permitió cumplir con el objetivo general de esta tesis, que fue generar información que permita definir pautas de manejo de la fertilización fosfatada del cultivo de papa regado tendiente a lograr alta productividad, económicamente viable y con mínimo impacto ambiental.

6.3 Bibliografía general

En esta sección se incluye la bibliografía citada en la Introducción general, Discusión general y Anexos.

- Alexandratos, N. and J. Bruinsma. 2012. World Agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- Alvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century model. *Soil Use and Management* 17:62-66.
- Atia, A.M. and A.P. 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 and 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.
- Bélanger, G., N. Ziadi; D. Pageau; C. Grant; M. Högnäsbacka; P. Virkajärvi; Z. Hu; J. Lu; J. Lafond; and J. Nyiraneza. 2015. A model of critical phosphorus concentration in the shoot biomass of wheat. *Agronomy Journal*, 107: 963-970.
- Buczko, U., and R. Kuchenbuch. 2007. Phosphorus indices as risk-assessment tools in the USA and Europe—a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170: 445-460.
- Cabria, F.N., Calandroni, M.B. 2011. El recurso suelo en el Partido de General Pueyrredón. En *Habitando el Partido de General Pueyrredon. Territorio, población, localidad y desarrollo local. Desafíos para el siglo XXI* (Provincia de Buenos Aires, Argentina). J. M. Mantobani. Ediciones Suárez. ISBN: 978- 987-1732-37-1.
- Caldiz, D.O. 2006. Producción, cosecha y almacenamiento de papa en la Argentina. McCain Argentina SA, Balcarce-BASF Argentina SA, Capital Federal. Argentina. 226 p.
- Chien, S.H.; D. Edmeades; R. McBride and K.L. Sahrawat. 2014. Review of Maleic-Itaconic Acid Copolymer Purported as Urease Inhibitor and Phosphorus Enhancer Soils. *Agron. J.* 106:423-430

- Constantino, S. 2005. Costo de producción de papa. Disponible en: <http://www.biblioteca.org.ar/libros/210318.pdf>
- Delgado, A.; M.D.C Del Campillo and J. Torrent. 2010. Limitations of the Olsen method to assess plant-available phosphorus in reclaimed marsh soils. *Soil use and management* 26: 133-140.
- Della Maggiora, A.I. 1996. Estimación de la Evapotranspiración. Aplicación para la programación de riego en el cultivo de papa. Tesis *Magister Scientiae*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina. 111p.
- Echeverría, H.E. y F.O. García. 2005. Papa. In Echeverría and García (ed.) *Soil fertility and fertilization of crops*. Buenos Aires (Argentina) p. 365–378.
- Fabrizzi, K.P.; L. Picone; A. Berardo y F.O. García. 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en las propiedades químicas de un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo* 16: 71-76.
- Fixen, P.E., and T.W. Bruulsema. 2014. Potato Management Challenges Created by Phosphorus Chemistry and Plant Roots. *Am. J. Potato Res.* 91: 121-13.
- Freeman, K.L., P.R. Franz; and R.W. De Jong. 1998. Effect of phosphorus on the yield, quality and petiolar phosphorus concentrations of potatoes (cvv. Russet Burbank and Kennebec) grown in the krasnozem and duplex soils of Victoria. *Animal Production Science* 38: 83-93.
- Gonzalez, J. and E. Rodríguez. 2011. Limitantes para la implementación de buenas prácticas agrícolas en la producción de papa en argentina. *Agroalimentaria* 17: 63-84.
- Havlin, J.L.; J.D. Beaton; S.L. Tisdale and W.L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (6th Edition). Pearson Prentice Hall (ed). 514 pp.
- Hopkins, B.G.; D.A. Horneck and A.E. Mac Guidwin. 2014. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension. *American Journal of Potato Res.* 91:161-174.
- Indiati, R. 2000. Addition of phosphorus to soils with low to medium phosphorus retention capacities. II. Effect on soil phosphorus extractability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31: 2591-2606.
- Iwama, K. 2008. *Physiology of the Potato: New Insights into Root System and Repercussions for Crop Management*. *Potato Res.* 51:333–353.
- Jordan-Meille L.; G.H. Rubæk; P.A.I. Ehlert; V. Genot; G. Hofman; K. Goulding; J. Recknagel; G. Provolò and P. Barraclough. 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. *Soil Use and Management* 28: 419–435.
- Khiari, L., L.E. Parent, A. Pellerin, A.R.A. Alimi, C. Tremblay, R.R. Simard, and J. Fortin. 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. Envir.Quality* 29: 1561–1567.
- Laboski, C. A. and T.W. Andraski 2009. Potato response to phosphorus fertilizers: 2008 results. *Proceedings 2009 Wisconsin's Annual Potato Meeting*. 22:139–154.
- Laboski, C. A., Peters, J. B. and L.G. Bundy. 2006. Nutrient application guidelines for field, vegetable, and fruit crops in Wisconsin. Division of Cooperative Extension of the University of Wisconsin-Extension.
- Lavado, R.S., F.H. Alvarez; R. Steinbach y Haydée, S. 2006. *Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Editorial Facultad de Agronomía, 206 p.

- Li, H.; G. Huang; Q. Meng; L. Ma; L. Yuan; F. Wang and R. Jiang. 2011. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review. *Plant and Soil*, 349: 157-167.
- Maier, N.A.; K.A. Potocky-Pacay and C.M.J. Williams. 1989. Comparison of the use of total phosphorus concentration and acetic acid soluble phosphorus concentration in petioles for assessing the phosphorus status of potato crops. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 29:433–438.
- Maier, N.A.; K.A. Potocky-Pacay; J. Jacka and C.M.J. Williams. 1989b. Effect of phosphorus fertiliser on the yield of potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) and the prediction of tuber yield response by soil analysis. *Animal Production Science* 29: 419-431.
- Mikkelsen, R. and B. Hopkins. 2006. Fertilizer Management Practices for Potato Production in the Pacific Northwest. International Plant Nutrition Institute (IPNI), 1-8.
- Mohr, R.M. and J. Tomasiewicz. 2011. Effect of phosphorus fertilizer rate on irrigated Russet Burbank potato. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42: 2284-2298.
- Pierzynski, G.M.; W.R. McDowell and 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 Nº 46. p. 53-86.
- Pöthig, R; H. Behrendt; D. Opitz and 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.
- Repking M.J. and C.A.M Laboski. 2008. Effectiveness of AVAIL for improving potato yield. In: Proceedings of the 2008 Wisconsin Fertilizer, Aglime and Pest Management Conference, 47th, pp. 133–142. Madison, WI: University of Wisconsin. Available at <http://www.soils.wisc.edu/extension/wcmc/2008>.
- Rosen, C.J. and P.M. Bierman. 2008. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. *Am. J. Potato Res.* 85: 110-120.
- Rosen, C.J.; K.A. Kelling; J.C. Stark and G.A. Porter. 2014. Optimizing Phosphorus Fertilizer Management in Potato Production. *Am.J.Potato Res.* 91: 145-160
- Ruark, M.D.; K.A. Kelling and L. Ward Good. 2014. Environmental Concerns of Phosphorus Management in Potato Production. *American Journal of Potato Research.* 91:132-144.
- Sainz Rozas, H., H.E. Echeverría y H. Angelini H. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las Regiones pampeana y extrapampeana argentina (In Spanish with English abstract). *Ciencia del Suelo.* 29: 29-37.
- Sainz Rozas, H.; H.E. Echeverría y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra-pampeana Argentina. *RIA* 38: 33-39.
- Sanders J.L., L.S. Murphy, A. Noble, R.J. Melgar and J. Perkins. 2012. Improving Phosphorus use Efficiency with Polymer Technology. *Procedia Engineering* 46: 178 – 184.
- Sanderson, J.B.; J.A. MacLeod; B. Douglas; R. Coffin and T. Bruulsema. 2003. Phosphorus research on potato in PEI. *Acta Horticulturae.* 619: 409-417.
- Sharpley, A.N.; S. Herronn, and T. Daniel. 2007. Overcoming the challenges of phosphorus-based management in poultry farming. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62: 375-389.

- Sharpley, A.N.; T. Daniel; T. Sims; J. Lemunyon; R. Stevens and 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, J.T. and 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.
- Stark J.C. and B.G. Hopkins. 2013. Potato Response to Phosphorus Fertilizer Using a Dicarboxylic Acid Polymer. *Better Crops*. 97:7-10.
- Stark, J.C.; D.T. Westermann and B. Hopkins. 2004. Nutrient management guidelines for Russet Burbank potatoes. University of Idaho, College of Agricultural and Life Sciences. <http://www.extension.uidaho.edu/Nutrient/pdf/Potato/Nutrient%20Management%20Guidelines%20for%20Russet%20Burbank%20Potatoes.pdf> . Accessed 8 June 2015.
- Steinbach, H.S. and R. Alvarez. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 35:3-13.
- Studdert, G. y H. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., and B.L. Befort. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Torrent, J. and A. Delgado. 2001. Using phosphorus concentration in the soil solution to predict phosphorus desorption to water. *J. Environ. Qual.* 30: 1829-1835.
- Tóth, G.; R.A. Guicharnaud; B. Tóth and T. Hermann. 2014. Phosphorus levels in croplands of the European Union with implications for P fertilizer use. *European Journal of Agronomy* 55: 42-52.
- Viglizzo, E.; A.J. Pordomingo; M.G. Castro y F.A. Lértora. 2002. La Sustentabilidad ambiental del agro pampeano=. *The Environmental sustainability of agriculture in the Argentine pampas/*. Programa Nacional de Gestión Ambiental Agropecuaria. Editorial INTA Buenos Aires, Argentina. 84 p.
- Westermann, D.T. and G.E. Kleinkopf. 1985. Phosphorus relationships in potato plants. *Agronomy Journal* 77: 490-494.
- Wingeyer, A.B.; T.J. Amado; M. Pérez-Bidegain; G.A. Studdert; C.H.P. Varela; F.O. Garcia and D.L. Karlen. 2015. Soil quality impacts of current South American agricultural practices. *Sustainability*, 7:2213-2242.
- Zamuner, E.C. y J. Ph. Culot. 1999. Efecto de la fertilización en la capacidad de sorción de fosforo. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 14: 107-116.

CAPÍTULO 7:

CONSIDERACIONES FINALES

7. 1 Síntesis de los principales hallazgos e implicancias prácticas

Uno de los resultados originales de esta investigación fue la determinación del P crítico ambiental para los suelos de la región sudeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina), determinados con diferentes metodologías analíticas (Bray1, Mehlich3 y Olsen). Esta información tiene una gran implicancia práctica puesto que alerta sobre la importancia de controlar los factores que pudieran favorecer el transporte del P hacia aguas superficiales y subsuperficiales, como el exceso de riego en lotes con pendiente. Asimismo, la obtención de valores de P críticos ambientales podrán ser utilizados para evaluar situaciones de riesgo ambiental de pérdida de P debidas a la fertilización en cualquier cultivo de la región.

No menos importante es haber obtenido los valores de P crítico agronómico para el cultivo de papa utilizando varias técnicas analíticas. Además se desarrolló y validó una metodología para realizar recomendaciones de fertilización fosfatada para el cultivo de papa en nuestros suelos que suma los valores de P crítico ambiental y agronómico a la demanda del cultivo y disponibilidad inicial de P en el suelo, utilizados tradicionalmente en la región. Los conceptos básicos de esta metodología de recomendación podrán ser utilizados en otros cultivos, de manera de asegurar que la fertilización no produzca un impacto negativo en el ambiente a la vez que permita obtener altos rendimientos.

Los resultados de ensayos en macetas y de campo pusieron en evidencia que no hubo diferencias en rendimiento, en eficiencia de uso del fertilizante, ni en disponibilidad de P en el suelo debido al uso de Avail®, en el cultivo de papa. La alta saturación de bases y porcentaje de calcio intercambiable que caracterizan a los suelos de la región pampeana probablemente sean los responsables de que el recubrimiento no produzca un cambio importante en la reacción del P con el suelo y no mejore la eficiencia de uso del P.

Una vez ajustada la metodología de diagnóstico de requerimientos de fertilización con P, se definió la DOE para diferentes situaciones de precios y disponibilidad de P en el suelo. En base a estos resultados se demostró que la fertilización con dosis mayores a las recomendadas no genera ningún beneficio económico. Se espera que la divulgación de esta información entre productores y asesores desaliente la realización de fertilizaciones excesivas y de esta manera se favorezca la protección ambiental.

La determinación y validación de la curva de dilución de P en la papa es otro resultado original. Esta información abre las puertas a la utilización de la fertilización foliar como práctica que permitirá corregir la fertilización fosfatada inicial, mejorando la eficiencia de uso del P en el cultivo de papa. Otra aplicación de la curva de dilución de P y el Índice de nutrición fosfatada es que pueden ser desarrollados para otros cultivos e integrados al análisis de suelo para conformar una metodología integral de diagnóstico de requerimientos de fertilización.

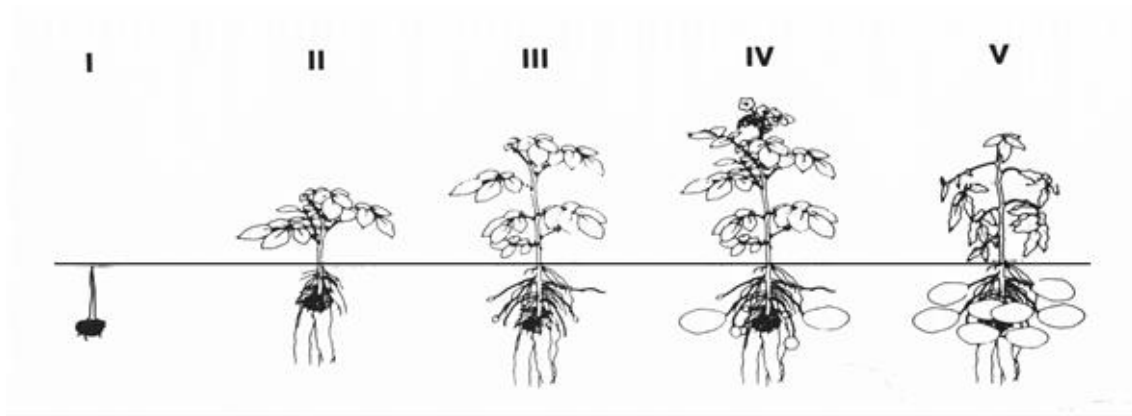
Por último, la divulgación de la información generada entre instituciones públicas y privadas ayudará a concienciar los participantes de la cadena productiva respecto de la importancia y factibilidad de utilizar una estrategia de fertilización fosfatada que contribuya a la producción de papa de alto rendimiento, económicamente conveniente al tiempo que garantice el cuidado de los recursos naturales.

7.2 Futuras líneas de investigación

La obtención del P crítico ambiental para los suelos de la región es uno de los resultados originales de este trabajo. Aunque los experimentos de campo se llevaron a cabo en suelo con amplio rango de disponibilidad de P, los resultados de este estudio deberían ser validados a partir de mediciones de pérdida de P por erosión, escurrimiento y lixiviación. El empleo de nuestros resultados en futuros modelos de simulación de predicción de riesgo ambiental sería una interesante opción para ampliar y ajustar el manejo adecuado del P en sistemas de producción ambientalmente sustentables de papa y otros cultivos.

La determinación y validación de la curva de dilución de P es otro resultados original por lo cual sería promisorio evaluar la capacidad predictiva de la curva de dilución de P en otros cultivos de papa y cultivos (trigo, maíz, soja, etc.). Otra línea de investigación que podría generarse en torno a esta información es la evaluación del efecto de la fertilización foliar fosfatada como complemento de la fertilización tradicional del cultivo de papa.

Anexos

*Estadios de crecimiento y desarrollo de la planta de papa***ANEXO I: ESTADIOS DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA PLANTA DE PAPA***(Adaptado de Echeverría y Giletto, 2015)*

Estadio I / Brotación: el tubérculo semilla de papa es la única fuente de energía para la planta y no el aporte extra de nutrientes.

Estadio II / Crecimiento vegetativo: La fotosíntesis provee la energía para el desarrollo de la planta y las raíces se expanden rápidamente en el suelo tomando agua y nutrientes. La producción de materia seca está estrechamente relacionada con la cantidad de radiación interceptada. Por lo tanto, a medida que el cultivo produce hojas, cubre el suelo y dure más esta cobertura, aumenta la radiación interceptada y es mayor la producción final de materia seca. Las etapas de crecimiento I y II pueden extenderse de 30 a 70 días, dependiendo de la fecha de plantación, variedad y condiciones climáticas, temperatura del suelo y edad fisiológica de la semilla.

Estadio III / Inicio de tuberización: se producen cambios en las señales hormonales de la planta, donde el exceso de carbohidratos de las partes vegetativas y raíces son utilizados para comenzar a formar los tubérculos. Esta etapa de desarrollo es corta pudiendo durar de 10 a 14 días y en muchos cultivares coincide el final de este período con el inicio de floración (Pereira y Shock, 2006).

Estadio IV / Llenado de tubérculos: los tubérculos son el destino más importante de carbohidratos y nutrientes de la planta. La sacarosa es transportada a los tubérculos y acumulada como almidón, lo que permite aumentar la materia seca de los mismos. El llenado de tubérculos puede durar aproximadamente tres meses en función de las condiciones climáticas y de la variedad. En este período se produce la máxima absorción de nutrientes. Para el cultivar Russet Burbank se ha determinado de acumulación de nutrientes de 4,8 a 8,4 kg ha⁻¹ de N, 0,48 a 1,08 kg ha⁻¹ de P y 6,0 a 16,8 kg ha⁻¹ de K, 0,12 a 0,72 kg ha⁻¹ de S (Horneck y Rosen, 2008).

Estadio V / Madurez: la absorción de nutrientes desde el suelo cesa en esta etapa de crecimiento y los tubérculos llegan al máximo contenido de materia seca, que dependiendo de los cultivares puede variar de 17 a 23% (Caldiz 2006). Los nutrientes de la parte aérea y raíces son solubilizados y transportados a los tubérculos, conteniendo más del 90% de los nutrientes móviles y sólo un 10-20% de los inmóviles (Westermann, 1993).

ANEXO II: DESCRIPCION DE LOS SUELOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS

(Fuente: CARTAS DE SUELOS DE LA REPUBLICA ARGENTINA: Provincia de Buenos Aires

<http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>)

II.1. SERIE BALSARCE

<http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Balsarce.htm>

Es un suelo muy oscuro, moderadamente profundo y de aptitud agrícola, se encuentra en un paisaje de relieve suave a ondulado en posición de lomas y pendientes de la Subregión Sierras y Pedemonte del Sistema de Tandilia, bien drenado, formado en sedimentos loésicos franco fino, no alcalino, no salino, pendiente 1 a 3 %.

Clasificación taxonómica: Argiudol Petrocálcico, Limosa Fina, mixta, moderadamente profunda, térmica (Soil Taxonomy 2014) Argiudol Típico, Limosa fina, mixta, moderadamente somera, térmica (USDA-Soil Taxonomy V.1975).

Descripción del perfil típico: 4/963 C. Fecha de extracción de muestras: Junio de 1970.

Ap	0-23 cm; negro (10YR 2/1) en húmedo; gris oscuro (10YR 4/1) en seco; franco; migajosa muy fina, moderada y granular fina; blando; muy friable; no plástico, ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite inferior claro, suave.
BA	23-31 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en seco; franco arcillo arenoso; bloques subangulares medios moderados que rompe a granular; duro; muy friable; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; raíces comunes; límite inferior claro, suave.
Bt1	31-54 cm; pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; pardo (7,5YR 5/1) en seco; franco arcilloso; prismas compuestos regulares, medios, moderados que rompe en prismas subangulares medios, débiles y finos; duro; muy firme; muy plástico, adhesivo; barnices "clayskins" abundantes; raíces escasas; límite inferior claro y suave.
Bt2	54-70 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; pardo (7,5YR 5/4) en seco; franco arcilloso; prismas compuestos regulares medios, moderados que rompe en bloques angulares y subangulares, medios, moderados; muy duro; ligeramente firme; plástico, adhesivo; barnices "clayskins" comunes; límite inferior abrupto y ondulado.
2Ckkm	70 cm a +; tosca en plancha.

Observaciones: Espesor del horizonte argílico, 31 cm. de profundidad.

ANEXO II: Cartas de suelo

Ubicación del Perfil: Latitud: S 37° 49' 18". Longitud: W 58° 01' 20". Altitud 97 m.s.n.m. a 17,6 km. al este del cruce de las rutas 226 y 55 (Ea. El Volcán), partido de Balcarce, provincia de Buenos Aires. Hoja I.G.M. 3757-31-2, Sierra Bachicha.

Variabilidad de las características: Variaciones en el espesor de los horizontes Ap-BA; color negro (10YR 2/1) a pardo oscuro (10YR 3/2) en húmedo; materia orgánica de 7,06 a 4,0 %. Espesor del Bt1-Bt2, de 30 a 40 cm. de profundidad, solum 65 a 85 cm, contenido de arcilla (Bt1) entre 27 y 31.3 %, discontinuidad del 2Cckm.

Fases: Por pendiente en sus distintos grados y susceptibilidad a la erosión hídrica potencial.

Distribución geográfica: Partidos de Balcarce, Gral. Pueyrredón, Gral. Alvarado, Lobería, Olavarría, Azul, Tandil, Juárez, Coronel Pringles, Necochea. Hojas I.G.M. 3757-25, 31, 32, 33; 3760-8, 9, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 34, 35; 3957-1, 2, 7, 8; 3960-4, 5, 6, 12.

Drenaje y permeabilidad: Bien drenado, escurrimiento medio, permeabilidad moderada, capa freática profunda.

Uso y vegetación: Agrícola, puede usarse para cultivos labrados. Implantación de pasturas: *Trifolium repens* (Trébol blanco), *Lolium multiflorum* (Rye grass), *Festuca arundinacea* (Festuca), *Medicago sativa* (Alfalfa).

Limitaciones de uso: Profundidad de la tosca. Leve susceptibilidad a la erosión hídrica.

Rasgos diagnósticos: Régimen de humedad údico, epipedón mólico (Ap-BA), horizontes petrocálcico antes del metro de profundidad (tosca en plancha) y argílico (Bt1-Bt2), rel. % arc. > 1.2; saturación de bases, supera el 50 % en todo el perfil.

Datos Analíticos:

Horizontes	Ap	BA	Bt1	Bt2	2Cckm
Profundidad (cm)	5-15	25-30	35-50	60-70	70 a +
Mat. orgánica (%)	7,06	4,54	2,06	1,10	NA
Carbono total (%)	4,11	2,64	1,20	0,64	NA
Nitrógeno (%)	0,364	0,242	0,114	0,071	NA
Relación C/N	11	11	10	9	NA
Arcilla < 2 μ (%)	25,7	27,8	31,3	29,3	NA
Limo 2-20 μ (%)	13,0	12,1	15,5	13,6	NA
Limo 2-50 μ (%)	31,5	27,3	28,3	35,0	NA
AMF 50-75 μ (%)	0	0	0	0	NA
AMF 75-100 μ (%)	0	0	0	0	NA

ANEXO II:
Cartas de suelo

AMF 50-100 μ (%)	41,6	43,2	39,0	34,8	NA
AF 100-250 μ (%)	1,2	1,7	1,4	0,9	NA
AM 250-500 μ (%)	0	0	0	0	NA
AG 500-1000 μ (%)	0	0	0	0	NA
AMG 1-2 mm (%)	0	0	0	0	NA
Calcáreo (%)	0	0	0	0	NA
Eq.humedad (%)	27,8	29,4	32,9	30,7	NA
Re. pasta Ohms	4370	5060	3634	3680	NA
Cond. mmhos/cm	S/D	S/D	S/D	S/D	NA
pH en pasta	5,8	6,3	6,5	6,7	NA
pH H ₂ O 1:2,5	7,0	7,4	7,4	7,8	NA
pH KCL 1:2,5	5,5	5,9	6,1	6,0	NA

Datos Analíticos (Continuación)					
CATIONES DE CAMBIO					
Ca ⁺⁺ m.eq./100gr	17,9	18,5	19,6	18,5	NA
Mg ⁺⁺ m.eq./100gr	1,7	1,1	2,9	3,5	NA
Na ⁺ m.eq./100gr	0,3	0,4	0,5	0,7	NA
K m.eq./100gr	2,3	1,9	1,4	0,9	NA
H m.eq./100gr	9,3	5,3	6,0	6,0	NA
Na (% de T)	1,02	1,59	1,71	2,87	NA
Suma de Bases	22,2	21,9	24,4	23,6	NA
CIC m.eq./100gr	29,4	25,1	29,2	24,4	NA
95	76	88	84	97	NA
NA: No analizado S/D: Sin datos					

II.2. SERIE MAR DEL PLATA

http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Mar_del_Plata.htm

Es un suelo oscuro, profundo, con fuerte desarrollo, su aptitud es agrícola, se encuentra en un área de paisaje serrano en posición de loma y pendiente dentro de la Subregión Pampa Austral Interserrana, bien drenado, desarrollado sobre sedimentos loésicos franco limosos, no salino, no alcalino, en pendientes de 1 a 3 %.

Clasificación taxonómica: Argiudol Típico, Limosa fina, mixta, muy profunda, térmica. (USDA-Soil Taxonomy V. 2006).

Descripción del perfil típico: 5/1005 C. Fecha de extracción de muestras: 24 de Marzo de 1970.

Ap	0-15 cm; pardo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco; bloques subangulares medios moderados que rompe a granular y migajosa fina, fuerte; muy friable; raíces abundantes; límite inferior abrupto suave.
A	15-29 cm; negro (10YR 2/1) en húmedo; franco; bloques subangulares finos, fuertes; friable; raíces abundantes; límite inferior claro y suave.
AB	29-39 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco; bloques subangulares medios moderados que rompe a granular medios, fuertes; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite inferior claro y suave.
Bt1	39-58 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/2) en húmedo; franco arcilloso; prismas compuestos irregulares, gruesos, fuertes, que rompe a bloques subangulares medios, fuertes y a prismas menores finos; ligeramente firme; plástico, adhesivo; barnices húmico-arcillosos comunes; raíces comunes; límite inferior claro y suave.
Bt2	58-76 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; franco arcilloso; prismas irregulares gruesos que rompe en prismas moderados y prismas menores; ligeramente firme; plástico, adhesivo; barnices húmico-arcillosos escasos; raíces escasas; límite inferior claro y suave.
BC	76-110 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; pardo claro (7,5YR 6/4) en seco; franco; prismas compuestos irregulares medios, débiles que rompe a bloques subangulares; firme; ligeramente plástico, no adhesivo; barnices húmico-arcillosos escasos; raíces escasas; límite gradual y suave.
C	110-160 cm a +; pardo (7,5YR 5/4) en húmedo; pardo claro (7,5YR 6/4) en seco; franco arenoso; masivo; muy firme; raíces escasas.

Observaciones: El estado de humedad es fresco en todos los horizontes del perfil descripto.

Ubicación del Perfil: Latitud S 37° 57' 16" y Longitud W 57° 55' 07". Altitud 90 m.s.n.m. a 9,3 km. al sur sureste del Paraje El Dorado, partido de Gral. Pueyrredón, provincia de Buenos Aires. Hoja I.G.M. 3757-32-3, Sierra De Los Padres.

Variabilidad de las características: Espesor de horizontes: el A, de 29 a 33 cm., franco limoso a franco, el Bt1-Bt2 de franco arcilloso a franco arcillo limoso, solum de 130 a 150 cm.

Fases: Por pendiente, erosión, drenaje y engrosada en distintos grados.

Distribución geográfica: Partidos de Gral. Pueyrredón, Balcarce, Mar Chiquita, Gral. Alvarado, Necochea, Lobería, Tres Arroyos, Olavarría, Azul, Juárez, Tandil, Azul, Maipú. Fotomosaicos: 3760-14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 27 y 28; 3957-1, 7 y 8, 3960-5, y 6.

Drenaje y permeabilidad: Bien drenado, escurrimiento medio, permeabilidad moderada, nivel freático profundo.

Uso y vegetación: Agrícola. Campo arado.

Limitaciones de uso: Pendiente, peligro de erosión hídrica.

Rasgos diagnósticos: Epipedón mólico, incluye un Ap1 - Ap2 - AB; régimen de humedad údico; horizonte argílico (relación de arcilla B/A: 1.5) entre los 48 a 78 cm. de profundidad.

Datos Analíticos

Horizontes	Ap	A	AB	Bt1	Bt2	BC	C
Profundidad (cm)	3-9	22-28	29-31	45-50	65-70	85-91	128-150
Mat. orgánica (%)	6,94	5,27	2,99	2,34	0,99	0,49	0,26
Carbono total (%)	4,03	3,06	1,74	1,36	0,58	0,29	0,04
Nitrógeno (%)	0,342	0,249	0,151	0,119	0,068	NA	NA
Relación C/N	12	12	11	11	9	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	23,1	22,4	23,6	33,3	31,4	19,6	13,7
Limo 2-20 μ (%)	13,4	12,7	13,5	14,1	16,9	11,2	7,8
Limo 2-50 μ (%)	35,8	33,6	36,3	29,2	34,4	31,3	33,4
AMF 50-75 μ (%)	0	0	0	0	0	0	0
AMF 75-100 μ (%)	0	0	0	0	0	0	0
AMF 50-100 μ (%)	39,4	42,5	38,8	35,7	37,5	46,0	50,4
AF 100-250 μ (%)	1,7	1,5	1,3	1,8	1,7	3,1	2,2
AM 250-500 μ (%)	0	0	0	0	0	0	0
AG 500-1000 μ (%)	0	0	0	0	0	0	0
AMG 1-2 mm (%)	0	0	0	0	0	0	0

ANEXO II:
Cartas de suelo

Calcáreo (%)	0	0	0	0	0	0	0
Eq.humedad (%)	30,1	28,8	39,8	37,8	37,5	23,6	15,8
Re. pasta Ohms	2958	3654	3480	2784	2610	4045	6090
Cond. mmhos/cm	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH en pasta	5,2	5,4	5,8	6,1	6,3	6,5	7,0
pH H ₂ O 1:2,5	5,9	6,1	6,3	6,7	7,0	7,2	7,6
Datos Analíticos (Continuación)							
pH KCL 1:2,5	4,8	5,0	5,5	5,5	5,7	5,6	5,9
CATIONES DE CAMBIO							
Ca ⁺⁺ m.eq./100gr	11,6	11,9	14,6	17,8	15,5	11,3	9,3
Mg ⁺⁺ m.eq./100gr	1,9	3,3	3,6	5,8	7,3	5,2	4,7
Na ⁺ m.eq./100gr	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,5	0,6
K m.eq./100gr	2,7	1,9	1,2	1,4	1,3	1,1	1,0
H m.eq./100gr	11,5	9,2	6,3	6,5	5,1	3,3	1,8
SOMAS DE CATIONES							
Na (% de T)	1,26	1,78	1,74	1,98	2,82	2,74	3,97
Suma de Bases	16,5	17,5	19,8	25,6	24,8	18,1	15,6
CIC m.eq./100gr	23,7	22,4	22,9	30,3	27,1	18,2	15,1
Sat. con bases (%)	70	78	87	85	91	99	100

II.3. SERIE TANDIL

<http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Tandil.htm>

Es un suelo oscuro, profundo, con fuerte desarrollo, su aptitud es agrícola, se encuentra en un área de paisaje serrano ondulado con pendientes suaves, medias y largas de la Subregión Pampa Austral Interserrana, ocupando la media loma, bien drenado, desarrollado en sedimentos loésicos franco fino sobre una costra calcárea de extensión regional, no salino, no alcalino en pendientes de 1-3 %.

Clasificación taxonómica: Argiudol Típico, Fina, illítica, térmica. (USDA-Soil Taxonomy V. 2006).

Descripción del perfil típico: 12/2427 C. Fecha de extracción de muestras,

ANEXO II: *Cartas de suelo*

Ap	0-25 cm; negro (10YR 2/1) en húmedo; gris oscuro (10YR 4/1) en seco; franco arcilloso; bloques subangulares medios moderados que rompe a bloques angulares finos y granular; duro; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite inferior claro suave.
BA	25-36 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco; franco arcilloso; bloques subangulares gruesos medios que rompe a bloques subangulares finos; duro; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; barnices de complejo húmico-arcillosos escasos; raíces comunes; límite inferior claro suave.
Bt	36-83 cm; pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; pardo grisáceo (7,5YR 5/2) en seco; arcilloso; prismas gruesos fuertes que rompe a prismas medios finos y a bloques angulares; extremadamente duro; firme; plástico, adhesivo; barnices de complejos húmico-arcillosos abundantes; raíces escasas; límite inferior claro
BC	83-108 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; pardo claro (7,5YR 6/4) en seco; franco arcilloso; bloques subangulares gruesos moderados a débiles que rompe a bloques gruesos y granos simples; duro; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; barnices de complejos húmico-arcillosos comunes; límite inferior claro suave.
C	108-135 cm; pardo a pardo oscuro en húmedo; pardo claro en seco; franco; masivo que rompe en granos simple; ligeramente duro; friable; raíces escasas.

Observaciones: En algunos perfiles aparece un horizonte cálcico no consolidado (165-170 cm. de profundidad).

113

Ubicación del Perfil: Latitud: S 37° 17' 00". Longitud: W 59° 28' 21". Altitud: 250 m.s.n.m. a 10 km. al este de la localidad de Gardey (Ea. El Perdido), partido Tandil, provincia de Buenos Aires. Hoja I.G.M. 3760-23-3, Gardey.

Variabilidad de las características: El horizonte Ap es franco, con 25 a 27 % de arcilla, bloques angulares y subangulares más granular, espesor de 25 a 30 cm. de profundidad, pardo oscuro (10 YR 2/2) en húmedo y pardo grisáceo claro (10YR4/2) en seco. El BA, 30-35 % de arcilla, pardo grisáceo claro (10YR5/2) en seco, horizonte argílico, incluye techo del BA (25 cm.), hasta el piso (36 cm.), relación % de arcilla > 1.2. El Bt, franco arcilloso con 35 a 40 % arcilla, espesor del argílico de 50 a 58 cm. (rel.% arc. >1.4). La profundidad del "Solum" (Ap-BA-Bts-BC) varía entre 105 a 112 cm. El material parental (C), es franco con 20 a 25 % de arcilla.

Fases: Por pendiente, erosión, drenaje, anegabilidad y engrosada en distintos grados.

Distribución geográfica: Partidos de Tandil, Azul, Mar del Plata, Balcarce, Olavarría, Tres Arroyos, Lobería, Chacabuco. Fotomosaicos: 3757-31; 3760-8, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 35, 36; 3763-36; 3957-1, 2, 7, 8; 3960-6.

Drenaje y permeabilidad: Bien drenado, escurrimiento medio, permeabilidad moderada, capa freática (mayor a 100 cm. de profundidad).

ANEXO II: *Cartas de suelo*

Uso y vegetación: Agrícola. Vegetación natural: Trébol blanco, (*Trifolium repens*), *Stipa* sp, Cardo negro, (*Cirsium vulgare*).

Limitaciones de uso: Climática (leve), fuertemente textural (Bts) , susceptibilidad a la erosión hídrica.

Rasgos diagnósticos: Régimen de humedad údico, epipedón mólico, horizonte argílico (relación de arcilla B/A: >1.2) entre los 25 a 83 cm. de profundidad.

Datos Analíticos

Horizontes	Ap	BA	Bt	BC	C
Profundidad (cm)	4-20	28-34	40-80	88-100	115-135
Mat. orgánica (%)	6,74	2,99	1,27	0,31	NA
Carbono total (%)	3,92	1,74	0,74	0,18	NA
Nitrógeno (%)	0,322	0,146	0,067	NA	NA
Relación C/N	12	12	11	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	29,4	38,3	42,1	30,2	24,4
Limo 2-20 μ (%)	26,1	21,6	17,1	20,1	14,8
Limo 2-50 μ (%)	41,8	39,7	35,3	37,1	35,3
AMF 50-75 μ (%)	0	0	0	0	0
AMF 75-100 μ (%)	0	0	0	0	0
AMF 50-100 μ (%)	28,2	21,5	22,4	32,0	38,8
AF 100-250 μ (%)	0,6	0,5	0,2	0,7	1,5
AM 250-500 μ (%)	0	0	0	0	0
AG 500-1000 μ (%)	0	0	0	0	0
AMG 1-2 mm (%)	0	0	0	0	0
Calcáreo (%)	0	0	0	0	0
Eq.humedad (%)	29,1	27,2	27,9	26,4	22,7
Re. pasta Ohms	3940	5629	4979	4979	6495
Cond. mmhos/cm	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
pH en pasta	6,0	6,2	6,5	6,5	6,8
pH H ₂ O 1:2,5	6,9	7,0	7,3	7,5	7,5

ANEXO II:
Cartas de suelo

pH KCL 1:2,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,1
CATIONES DE CAMBIO					
Ca++ m.eq./100gr	19,0	15,8	13,8	12,0	10,7
Mg++ m.eq./100gr	6,1	5,2	8,4	7,3	6,8
Na+ m.eq./100gr	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4
K m.eq./100gr	2,2	1,7	1,7	1,8	1,8
H m.eq./100gr	10,3	6,5	4,7	3,6	2,5
Na (% de T)	1,3	1,2	1,8	2,0	2,3
Suma de Bases	27,7	23,0	24,3	21,5	19,7
CIC m.eq./100gr	29,1	23,2	21,4	19,5	17,3
95	95	99	100	100	100
NA: No analizado S/D: Sin datos					

II.4. SERIE COMANDANTE NICANOR OTAMENDI

115

http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Cmte_Nicanor_Otamendi.htm

Es un suelo gris oscuro y profundo, su aptitud es ganadera, se encuentra en la subregión geomorfológica "Pampa Interserrana", ocupa los planos cóncavos de cauces y cursos de agua incipientes; en posición de bajos, cubetas y vías de escurrimiento; algo pobremente drenado; desarrollado en sedimentos loésicos pampeanos finos; no salino; con alcalinidad sódica desde los 20 cm. en pendientes de 0-0,5 %.

Clasificación taxonómica: Natralbol típico, fina, illítica, térmica. (USDA- Soil Taxonomy V. 2010).

Descripción del perfil típico: 5-251/C. Fecha de extracción de muestras, diciembre de 1980.

Ap	0-20 cm; gris oscuro (10YR 3/1) en húmedo; franco; bloques subangulares gruesos y medios, moderados, que rompe a bloques subangulares menores; muy friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite inferior abrupto, suave.
En	20-27 cm; gris parduzco claro (10YR 4/2) en húmedo; pardo grisáceo (10YR 6/2) en seco; bloques angulares gruesos moderados, que rompe a bloques angulares

ANEXO II:
Cartas de suelo

	medios y finos débiles; friable; no plástico, no adhesivo; moteados escasos, finos, precisos; raíces comunes; límite inferior abrupto, suave.
Btcn	27-60 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 3/2) en húmedo; arcilloso; prismas compuestos regulares, gruesos, fuertes, que rompe a prismas medios y bloques angulares; extremadamente duro; firme; muy plástico, adhesivo; concreciones de hierro-manganeso abundantes; barnices húmico-arcillosos muy abundantes; moteados comunes, medios, precisos; formaciones especiales: escasas microconcreciones de carbonato de calcio; límite inferior claro suave.
Btkn	60-84 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; franco arcilloso; prismas regulares, medios fuertes, que rompe a bloques angulares, medios, fuertes; firme; plástico, adhesivo; abundantes concreciones de hierro-manganeso y de calcáreo; abundantes barnices húmico-arcilloso; abundantes carbonatos de calcio libre en la masa; moteados de hierro abundantes, medios y sobresalientes; límite inferior claro, suave.
BCtkn	84-100 a + cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/4) en húmedo; franco arcilloso; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; abundantes concreciones de carbonatos de calcio; escasas concreciones de hierro-manganeso; escasos barnices húmico-arcilloso; moteados escasos; límite inferior, gradual, suave.

Observaciones: Profundidad de la napa freática 0,63 m.

Ubicación del Perfil: Latitud S: 38° 08' 36", longitud W: 57° 55' 09". Altitud 53 m.s.n.m. a 7,5 km. al sudoeste de la localidad de Comandante Nicanor Otamendi (Estancia Itá Curá), partido Gral. Alvarado, provincia de Buenos Aires. Mosaico I.G.M. 3960-2-1, Comandante Nicanor Otamendi.

Variabilidad de las características: Epipedón mólico Ap, entre 18 y 25 cm. de espesor, contenido de materia orgánica (M.O) 5.5-1.0, horizonte argílico, Btcn-Btkn-BCtkn de fuerte desarrollo 70-80 cm. de profundidad y se extiende desde el techo del Btcn hasta el piso del BCtkn con más del 30 a 45 % de contenido de arcilla aluvial.

Fases: No se reconocieron.

Distribución geográfica: Partidos de General Alvarado, General Pueyrredón, Lobería, Necochea, San Cayetano, provincia de Buenos Aires. En las cartas I.G.M. 3957-1, 2, 7, 8; 3960-6, 11, 12, 17.

Drenaje y permeabilidad: Algo pobremente drenado, escurrimiento lento, permeabilidad lenta. El nivel de la capa freática alcanza a menos de 100 cm.

Uso y vegetación: Ganadero. Pasturas artificiales: Agropiro (*Agropyron elongatum*). Vegetación natural: Ciperáceas (*Cyperus* sp), Duraznillo blanco (*Solanum glaucophyllum*), Verbena (*Phyla canescens*), Lengua de vaca (*Rumex crispus* L.). Cobertura vegetal: 100 %.

Limitaciones de uso: Drenaje y alcalinidad sódica, textura del horizonte B fuertemente textural.

ANEXO II: *Cartas de suelo*

Rasgos diagnósticos: Epipedón mólico, régimen de humedad ácuico, horizonte "E" álbico desde los 30 cm, horizonte argílico de fuerte desarrollo (Rel. arc.% B/A >1.2 a 1,8), horizonte nátrico con más de 15 % de PSI.

Datos Analíticos:

Horizontes	Ap	Em	Btcn	Btkn	BCtkn
Profundidad (cm)	5-15	21-26	30-55	65-80	90-100
Mat. orgánica (%)	5.65	1.41	1.25	0.55	0.34
Carbono total (%)	3.28	0.83	0.73	0.32	0.20
Nitrógeno (%)	0.293	0.071	0.069	0.036	S/D
Relación C/N	11.2	11.7	10.6	8.9	S/D
Arcilla < 2 μ (%)	15.9	9.2	41.1	36.4	28.2
Limo 2-20 μ (%)	24.2	19.4	13.3	14.0	18.1
Limo 2-50 μ (%)	43.8	40.4	31.3	28.4	36.2
AMF 50-75 μ (%)	23.1	28.8	20.7	21.1	22.3
AMF 75-100 μ (%)	9.3	16.4	5.1	12.0	7.1
AMF 50-100 μ (%)	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
AF 100-250 μ (%)	7.9	5.2	1.8	2.1	6.2
AM 250-500 μ (%)	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
AG 500-1000 μ (%)	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
AMG 1-2 mm (%)	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Calcáreo (%)	0	0	0	0	vestigios
Eq.humedad (%)	24.6	16.5	42.5	37.4	32.6
Re. pasta Ohms	1382	4252	1169	1382	1488
Cond. mmhos/cm	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
pH en pasta	5.9	6.8	7.2	7.1	8.0
pH H ₂ O 1:2,5	6.3	7.2	7.7	8.1	8.4
pH KCL 1:2,5	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D

ANEXO II:
Cartas de suelo

Datos Analíticos (Continuación)					
CATIONES DE CAMBIO					
Ca++ m.eq./100gr	12.7	15.9	16.0	13.6	S/D
Mg++ m.eq./100gr	2.7	2.0	9.2	10.0	S/D
Na+ m.eq./100gr	0.3	1.4	5.6	6.4	6.0
K m.eq./100gr	0.9	0.5	1.5	1.5	1.5
Datos Analíticos (Continuación)					
H m.eq./100gr	6.7	1.8	4.7	3.0	S/D
Na (% de T)	1.5	14.0	16.0	20.0	23.0
Suma de Bases	16.0	9.8	32.3	31.5	S/D
CIC m.eq./100gr	20.2	10.1	33.8	31.6	26.0
Sat. con bases (%)	82	97	95	99	S/D
S/D: Sin Datos					

ANEXO III: *Características agro-climáticas de la Región estudiada*

Para esta caracterización se utilizó información generada en la Estación Meteorológica de la Estación Agropecuaria Balcarce del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria ($37^{\circ} 45'S$, $58^{\circ} 18'O$ msnm). La serie de tiempo utilizada es 1985-2014.

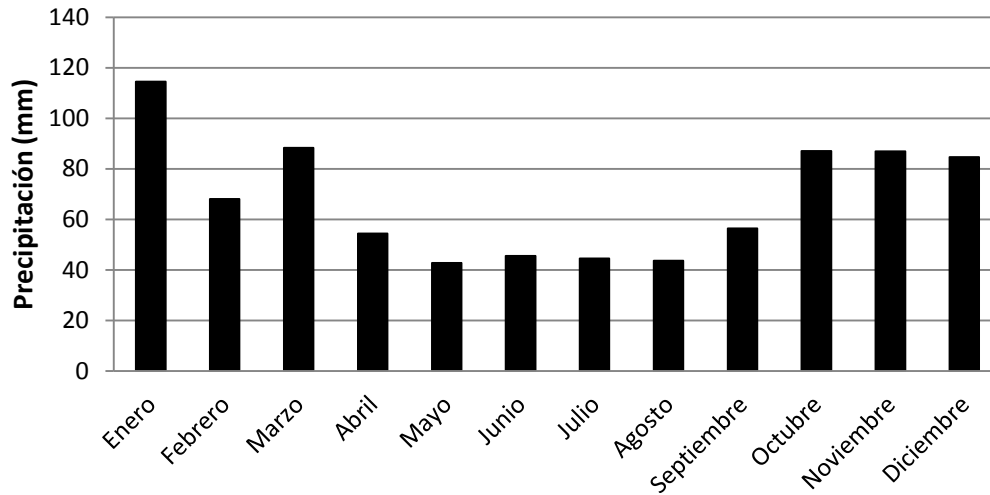


Figura III.1: Mediana de la precipitación mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el periodo 1985-2014. Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA ($37^{\circ} 45'S$, $58^{\circ} 18'O$, 130msnm).

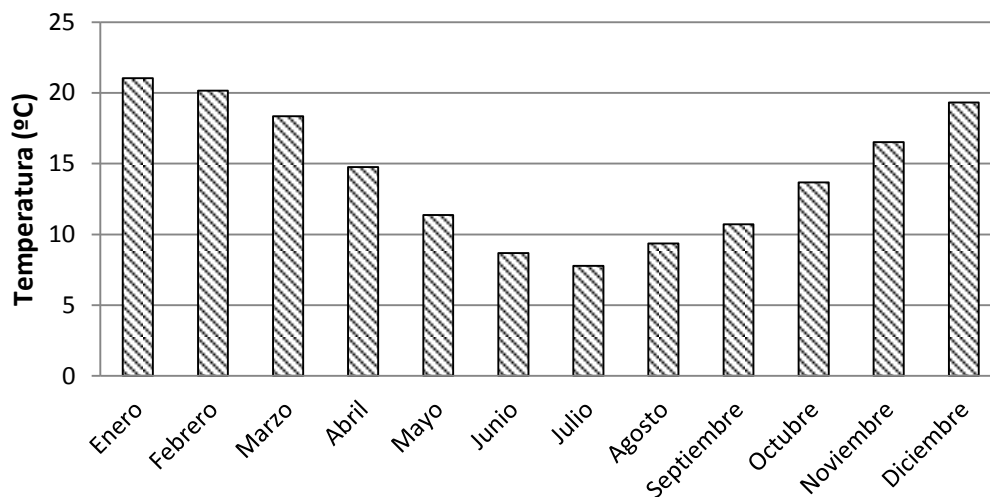


Figura III.2: Mediana de la temperatura mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el periodo 1985-2014. Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA ($37^{\circ} 45'S$, $58^{\circ} 18'O$, 130msnm).

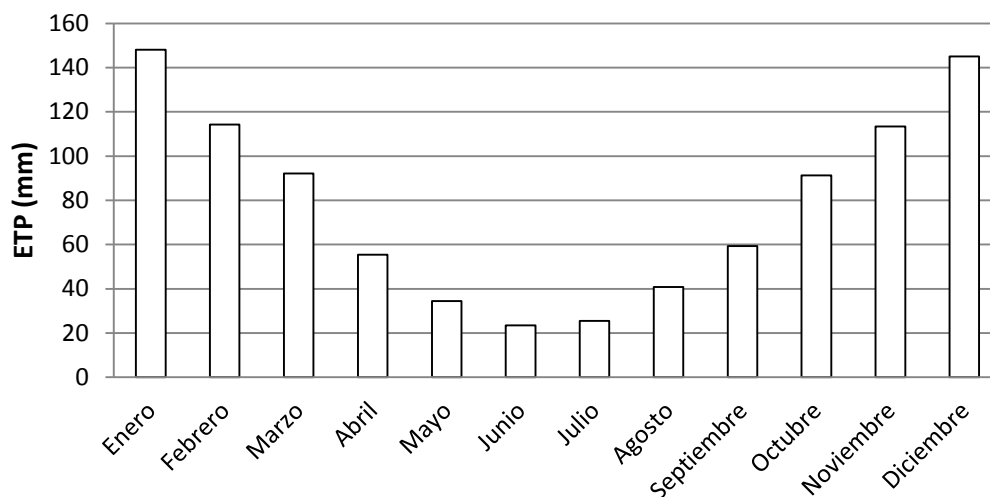
Características agro-climáticas de la Región estudiada

Figura III.3: Mediana de la evapotranspiración potencial (ETP) mensual del partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) para el periodo 1985-2014. Estación Meteorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, INTA ($37^{\circ} 45'S$, $58^{\circ} 18'O$, 130msnm).

Se calcularon balances hídricos decádicos (Figura III.4) utilizando la metodología propuesta por Della Maggiora *et al.* (1996). 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 (K_c) estimado según la metodología de Doorenbos and Pruitt (1997).

120

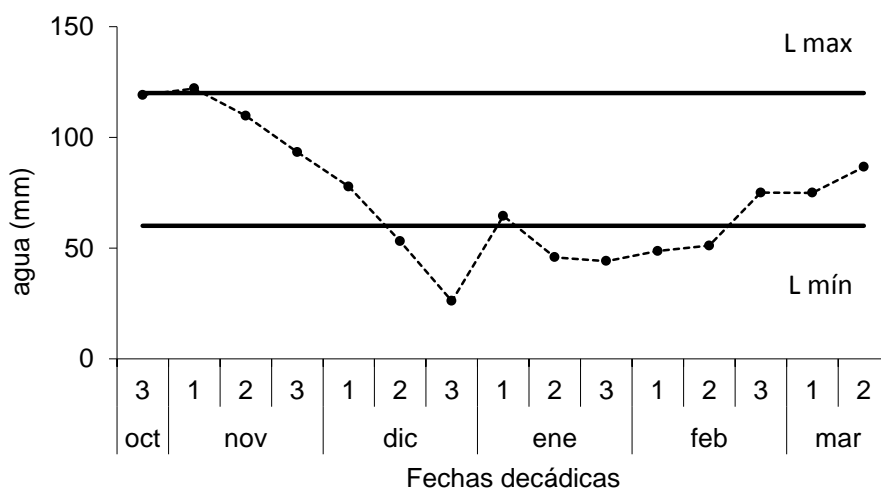


Figura III.4: Evolución del balance hídrico (en mm) durante la estación de crecimiento del cultivo, expresada cada 10 días. Lmín = Límite mínimo de almacenaje de agua, Lmáx = Límite máximo de almacenaje de agua