



## **Calculador de aplicación de fósforo para el cultivo de maíz en la región pampeana norte de Argentina**

*Trabajo Final para optar al título de Especialista de la Universidad de Buenos Aires,*

*Área Fertilidad de Suelos y Fertilización*

**Alumno: Ing. Agr. Carlos L. Michiels**

**Director: Ing. Agr. Dr. Pablo Prystupa**

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fernando O. García (IPNI) por el soporte, la visión y la generosidad para compartir bases de datos, así como para la discusión y recomendaciones para la mejora del calculador.

Al Dr. Matias L. Ruffo por el soporte en el desarrollo de la idea y su visión sobre los alcances de la misma.

Al Dr. Pablo Prystupa (FAUBA) por la guía y consejos en la preparación y revisión del trabajo.

A los investigadores que publicaron los trabajos, de los cuales se han extractado datos, análisis e interpretaciones, así como conclusiones o recomendaciones de uso.

A Mosaic de Argentina SA por el soporte en cuanto a tiempo y recursos que nos facilitaron la concreción y el desarrollo de la herramienta.

## INDICE

<b>Resumen.....</b>	<b>pág. 3</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>pág. 3</b>
<b>Objetivo.....</b>	<b>pág. 8</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>pág. 9</b>
<b>Fuentes de información.....</b>	<b>pág. 10</b>
<b>El calculador de fósforo (P).....</b>	<b>pág. 12</b>
<b>Usos del calculador.....</b>	<b>pág. 16</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>pág. 22</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>pág. 23</b>

## RESUMEN

Existen distintos enfoques para abordar la nutrición con P y, en la actualidad, muchos de ellos coexisten sin estar definidos claramente cuál es su objetivo. En la región pampeana norte de Argentina no se encuentra disponible una herramienta que integre la información disponible y permita realizar una recomendación de fertilización con P en el cultivo de maíz. Se decidió integrar los diferentes resultados científicos publicados para desarrollar una herramienta que ayude en la toma de decisiones de un plan de fertilización con P, teniendo en cuenta no solo las cuestiones agronómicas, una u otra filosofía, sino también las condiciones económicas y empresariales. Se desarrollaron ecuaciones en base a esa información científica y ajustes para que el calculador tuviese además un entorno sencillo de manejo y cálculos económicos para evaluar rentabilidad en función del criterio de aplicación de P seleccionado. Con las funciones proporcionadas por las fuentes consultadas se construyó un Calculador de P que estima la dosis de fertilizante a utilizar según el nivel actual de P Bray1 del suelo y el criterio de fertilización que se desee utilizar. De acuerdo a la función ajustada, se requiere un valor de P-Bray1 de 20 ppm, para que este nutriente no limite el rendimiento. Las bases de funcionamiento de la herramienta radican en información publicada, la cual puede ser revisada por cualquier interesado en el tema ya sea para perfeccionar la herramienta y generar un modelo superador o para interpretar lo realizado.

## ANTECEDENTES

Al inicio de la colonización agrícola, los suelos de la región pampeana de la Argentina poseían niveles variables de fósforo (P) extractable, siendo bajos hacia el sudeste de provincia de Buenos Aires y en la provincia de Entre Ríos, y medios a altos en muchas zonas como en el Oeste y Noroeste de la región (Darwich, 1983). Sin embargo, la intensificación agrícola, el aumento considerable de los rendimientos y el bajo empleo de fertilizantes, han generado y acentuado las deficiencias de este nutriente, en gran parte de la región, para la mayoría de los cultivos extensivos (Darwich, 1994; Vázquez, 2002; Sainz Rozas et al., 2012). A lo largo del tiempo se ha ido exportando el P de los suelos de la región pampeana, a través de las cosechas de los granos y de la extracción de este nutriente en productos ganaderos (carne, leche, lana, etc.), sin considerar el impacto de la extracción de este nutriente sobre la fertilidad química (reducción en la dotación del P extractable) y por consiguiente afectando la sustentabilidad en el manejo del recurso suelo.

Actualmente, los niveles de P disponible están, en general, por debajo de los considerados críticos para la producción de cultivos de grano y pasturas (Sainz Rozas y Echeverría, 2008). Se ha estimado que se ha perdido hasta el 90% del P que tenían los suelos y es frecuente encontrar lotes con contenidos menores a 5 ppm o  $\text{mg kg}^{-1}$  de P Bray1, considerados dentro de la categoría muy baja, la cual limita severamente la producción de cultivos. Es aceptado, a nivel internacional y nacional, que niveles con más de 20 ppm o  $\text{mg kg}^{-1}$  de P Bray1 son adecuados para sostener producciones de alto potencial, eficientes y agronómicamente sustentables (Mallarino, 2011).

En los últimos años se ha comenzado a tomar conciencia de la necesidad de utilizar fertilizantes: el consumo de los mismos ha pasado de menos de 200.000 toneladas (t) de

fertilizantes a principios de la década de los '90 a un record de 3.700.000 t de fertilizantes en el año 2007 (CIAFA, 2009), el cual fue igualado en el año 2011 para luego caer a cerca de 3.000.000 t de fertilizantes en 2012. Sin embargo, sigue existiendo un desbalance entre los nutrientes extraídos por los cultivos, comparado con lo repuesto por medio de la fertilización. Dependiendo de la campaña, los precios de los granos y los fertilizantes, la reposición de P promedio alcanza valores cercanos al 55% con fluctuaciones entre 50% y 60% (García y González Sanjuán, 2010). Este desbalance coloca a los agro-sistemas en situación de déficit en cuanto a este nutriente porque todas las regiones, pampeana o extra-pampeana sin excepción, están perdiendo P, con zonas con rangos de disponibilidad de P Bray 1 de muy bajos (hasta 5 ppm) a bajos (entre 5 y 10 ppm), por lo que este nutriente está siendo limitante para la producción de los cultivos (Sainz Rozas et al., 2011).

Existen distintos enfoques para abordar la fertilización con P y, en la actualidad, muchos de ellos coexisten sin estar definidos claramente cuál es su objetivo. El criterio de suficiencia se basa en la respuesta del cultivo y consiste en aplicar la cantidad de fertilizante que maximiza el retorno de la inversión en fertilizante en el corto plazo (García y Ciampitti, 2010). El sistema de recomendación alternativo es el criterio de construcción y mantenimiento (también denominado reconstrucción y mantenimiento). Consiste en fertilizar con el objetivo de subir el nivel de P extractable por arriba del nivel crítico y mantenerlo, de manera de evitar pérdidas de rendimiento por limitaciones de abastecimiento de P, maximizando la efectividad del sistema y la eficiencia de uso a mediano y largo plazo.

Las mejores prácticas de manejo indican que este nutriente debería manejarse bajo el concepto de construcción y mantenimiento (Cruzate y Casas, 2009). Sin embargo, la

fertilización fosfatada de los cultivos de grano en Argentina se ha realizado siguiendo un criterio de suficiencia (Berardo, 1994; Echeverría y García, 1998; Oliverio y López, 2008; Cruzate y Casas 2012) encontraron que los productores han estado fertilizando sus cultivos como trigo, maíz y soja con dosis menores a las extracciones y no en la totalidad de los lotes o sistemas de producción. Otros autores resaltan que muy pocos lotes son fertilizados para evitar balances negativos (Echeverría y García, 1998; García y Ciampitti, 2010). Es importante aclarar que entre las cuestiones que se esgrimen como causas de estas conductas, y que afectan negativamente a las mejores prácticas en el manejo de la fertilización fosfatada, se encuentran: el régimen de tenencia de la tierra (García, 2007), (en forma aproximada el 60% de la superficie cultivada en Argentina es bajo el sistema de arrendamiento y, en su mayoría, con contratos anuales), el cultivo de soja que ocupa el 65% de la superficie en agricultura extensiva, la ausencia de subsidios (comparativamente con EEUU y Europa), fuertes retenciones sobre los precios de los granos, la falta de rotaciones adecuadas de cultivos que permitan implementar criterios agronómicos como la reposición de nutrientes, etc. (Barbagelata y Melchiori, 2007; Oliveros y López, 2008; Caviglia, 2011).

En la Argentina no se encuentra disponible una herramienta que integre la información disponible y permita realizar una recomendación de fertilización con P en el cultivo de maíz. En los últimos años se han incrementado las consultas sobre cuál sería el método o modelo a seguir para realizar las mismas. El no seguir criterios adecuados conlleva el riesgo de estar fertilizando a dosis sub-óptimas que implican la degradación química del recurso suelo o fertilizando a dosis elevadas o sobre-fertilizando lo cual implicaría un riesgo para el ambiente. Además, en ambos casos, sub- o sobre-fertilización, se estaría incurriendo en una pérdida económica.

A raíz de lo expresado y teniendo en cuenta los distintos criterios que hoy coexisten para la toma de decisiones, se decidió integrar información de diferentes resultados publicados en literatura científica para desarrollar una herramienta que pudiera dar soporte en la toma de decisiones de un plan de fertilización con P, teniendo en cuenta no solo las cuestiones agronómicas, una u otra filosofía (criterios de fertilización fosfatada ya descritos anteriormente), sino también las condiciones económicas y empresariales del agricultor de la región pampeana norte.

## OBJETIVO

Desarrollar una herramienta que facilite la recomendación de la fertilización fosfatada en maíz a los asesores agronómicos y productores/agricultores integrando los diferentes enfoques que hoy coexisten en la región pampeana norte.



## METODOLOGÍA

Se generó una herramienta de gestión de la fertilización fosfatada, plasmada en una planilla de Excel. Para lograr tal propósito, se tuvieron en cuenta una serie de trabajos científicos publicados en el ámbito local de los cuales se extrajo información. La misma se describe en la sección “Fuentes de información”. De allí se derivaron las ecuaciones, las cuales fueron editadas, sin perder su objetivo y sin influenciar en los resultados. Se detallan “supuestos” o “advertencias” que puedan ser de interés para limitar los alcances y el tipo suelos y/o condiciones agro-ecológicas donde se debería utilizar esta herramienta. La población de referencia de esta herramienta es la zona Norte Pampeana, desde la zona Norte y Noroeste de la provincia de Buenos Aires hasta el Sudeste de Córdoba, pasando por el Sur y Centro de Santa Fe. Esta herramienta se realizó a partir de trabajos científicos donde se analizan experimentos a campo realizados en esta área geográfica y experimentos en condiciones controladas realizados en suelos de la región.

Es importante aclarar que en el trabajo de Rubio et al (2008), se analizaron ensayos en macetas en las que se realizó la mezcla de P con el suelo y, luego, se midió el contenido de P extractable a los 45 días posteriores. Si bien los suelos de referencia en la región son considerados “no fijadores de P” no se debería soslayar que más del 80% del área sembrada con maíz de la Región Pampeana se encuentra en siembra directa, donde habitualmente la implementación de éstos programas de fertilización pueden requerir, dependiendo del nivel de dosis de P, además de la colocación del P en bandas la aplicación al voleo en cobertura total. A modo de recomendación práctica, la gestión de la fertilización fosfatada en un esquema de mediano/largo plazo (i.e. modelo de construcción y mantenimiento) debería implicar también un sistema de monitoreo de la disponibilidad de P extractable mediante muestreo y análisis de suelo.

## FUENTES DE INFORMACION

Se empleó información publicada en el ámbito científico que estuviese disponible para cualquier potencial usuario de la herramienta. La información utilizada fue la siguiente:

### **a) Tabla de Requerimientos de Nutrientes por los Cultivos (IPNI, 2013)**

De allí se extrajo el valor de extracción de P por el cultivo de maíz (a humedad comercial) calculado en  $3.5 \text{ kg P t grano}^{-1}$

### **b) Relación balance de P en el suelo y P Bray 1 (Ciampitti et al., 2011)**

Brevemente, suelos con valores bajos de P Bray1 (<20 ppm) presentan una rápida capacidad de respuesta a la fertilización fosfatada, incrementando los niveles de P extractable del suelo con balances positivos; mientras que, por otro lado, presentan una baja o nula reducción en los valores de P extractable ante situaciones de balances negativos de P.

Por otro lado, en suelos con valores elevados de P Bray1 (> 40 ppm), los balances positivos de P producen respuestas erráticas en los niveles de P disponible y, por ende, en muchas situaciones no se observan cambios en los niveles de P extractable en el suelo; mientras que situaciones con balances negativos de P llevan a una disminución rápida y continua en los niveles de P disponible en el suelo.

De este trabajo se tomaron las ecuaciones que explican la relación entre el balance de P en el suelo y el P extractable Bray1. En base a las conclusiones y ecuaciones desarrolladas en este trabajo, asumimos que para suelos entre 20 y 40 ppm P Bray1 podíamos utilizar la ecuación de disminución de los suelos de 40 ppm y la ecuación de acumulación para aquellos suelos con contenidos de P Bray1 menores a 20 ppm.

**c) Relación entre Rendimiento – PBray 1 (Gutiérrez-Boem et al. ,2010).**

En este trabajo se describe la relación entre el rendimiento relativo y el P disponible (Bray1), para trigo, soja y maíz en suelos de la región pampeana central utilizando datos de la red desarrollada por CREA Región Sur de Santa Fe e IPNI (García, 2007) con una función de tipo Mitscherlich, con la restricción que el rendimiento relativo del tratamiento sin P tienda a 100. Esta función tiene dos parámetros: c y b

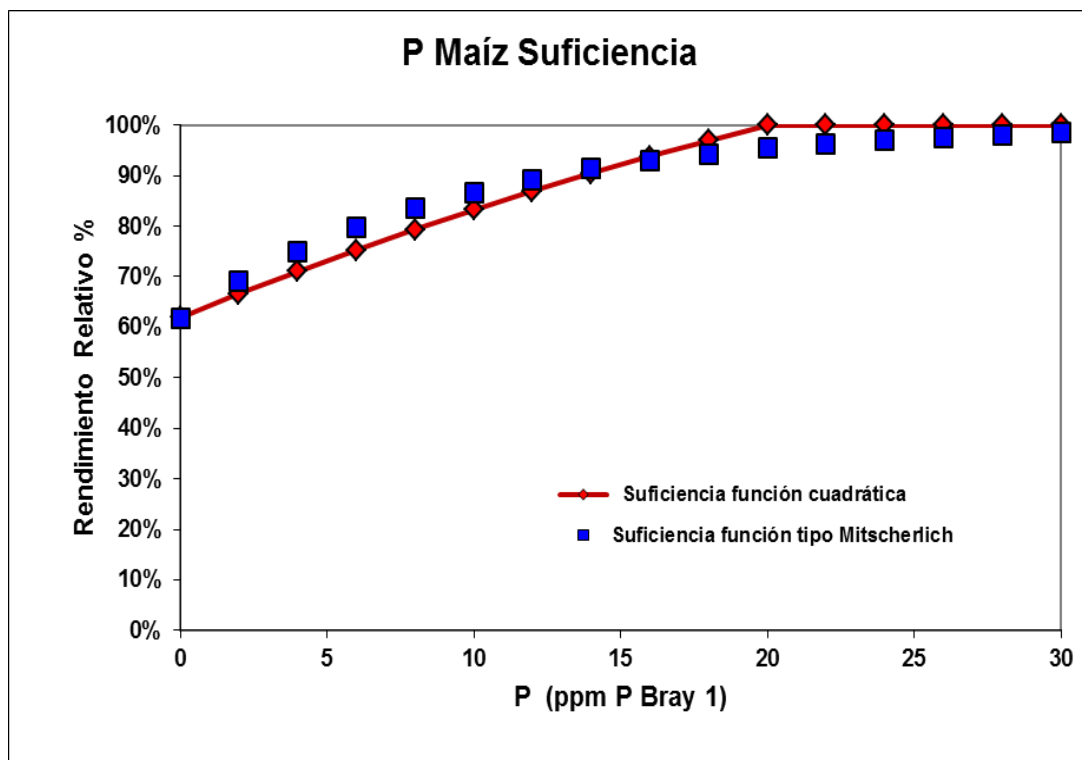
$$y = 100 (1 - e^{-c(x+b)})$$

donde 'y' es el rendimiento relativo del tratamiento sin P, y 'x' el nivel de P disponible en ese tratamiento. En la **Tabla 1**, se muestran los niveles críticos para los tres cultivos para dos valores de rendimiento relativo, calculados con las funciones ajustadas.

**Tabla 1.** Niveles críticos de P disponible (Bray1, ppm) para trigo, maíz y soja calculados con las funciones ajustadas por Gutiérrez-Boem et al. (2010).

Cultivo	Rendimiento relativo (%)	
	90	95
Trigo	18.6	24.4
Maíz	12.5	19.0
Soja	12.0	16.9

La ecuación ajustada en este trabajo es asintótica, es decir que no se alcanza el rendimiento relativo del 100%. Para utilizar esta información en el calculador, se reanalizaron los datos ajustando una ecuación cuadrática Plateau (Fig. 1). La nueva función alcanza un rendimiento relativo del 100% (con un P-Bray1 de 20 ppm). Este valor es considerado como objetivo para que los cultivos de maíz no sufran deficiencias de P.



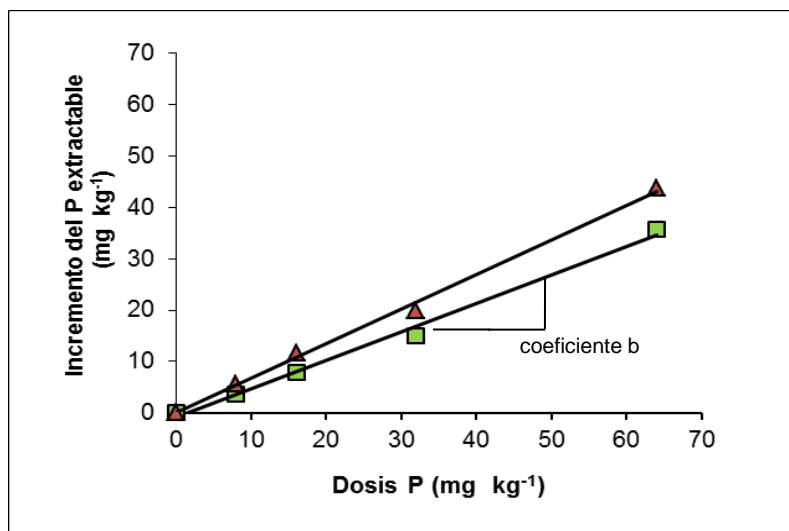
**Figura 1.** Rendimiento relativo ajustado para el calculador de dosis de P para maíz mediante función de tipo Mitscherlich en base a datos de Gutiérrez Boem et al. (2010) y función cuadrática-plateau.

**d) Incremento en el nivel de P extractable del suelo por kilogramo de P aplicado como fertilizante (Rubio et al., 2007; Rubio et al., 2008)**

En este trabajo se relaciona el aumento de P extractable en un suelo con la dosis de P aplicada. Experiencias en ambientes controlados (ensayos en maceta) permitieron determinar el incremento en el P extractable del suelo ante el agregado de una unidad de P en forma de fertilizante al suelo (coeficiente b). El coeficiente b es la pendiente de la recta de ajuste indicada en la **Figura 2** (Rubio et al., 2007). Este coeficiente “b” es función del porcentaje de arcilla y el valor inicial de P Bray1 del suelo, y se estima según la Ecuación 2, donde **z** es un factor de zona (variable *dummy*), Este valor **z** es 1 para la región pampeana norte.

## Ecuación 2

Coeficiente  $b = 0.45369 + 0.00356 P_{\text{Bray1}} + 0.16245 Z - 0.00344 \text{ arcilla}$ .



**Figura 2.** Relación entre el incremento en P extractable (diferencia entre el P extractable a los 45 días en cada dosis de fertilizante agregado y el P extractable del tratamiento sin agregado de P) y la dosis agregada de P para dos suelos. El coeficiente  $b$  es la pendiente de la recta (Rubio et al., 2007).

El coeficiente  $b$  permite calcular la dosis de P por unidad de superficie que es necesario aplicar para aumentar 1 ppm o  $\text{mg kg}^{-1}$  el P Bray1 del suelo (Ecuación 3) y a partir de ello se puede calcular la dosis necesaria para alcanzar el P nivel de disponible deseado (Ecuación 4).

## Ecuación 3

$\text{kg P para aumentar un ppm o } \text{mg kg}^{-1} (\text{kg ha}^{-1}) = 0.1 \times (\text{densidad aparente } (\text{ton m}^{-3}) \times \text{profundidad (cm)} / b$ .

Ecuación 4

Dosis de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) =  $[\text{P-Bray1 crítico (ppm o mg kg}^{-1}) - \text{P Bray1 del suelo (ppm o mg kg}^{-1})] \times \text{kg ha}^{-1}$  para aumento de 1 ppm o  $\text{mg kg}^{-1}$ .

#### EL CALCULADOR DE P: ESTIMACION DE LA DOSIS DE P REQUERIDA SEGÚN NIVEL DE P BRAY Y CRITERIO DE FERTILIZACION

Con las funciones proporcionadas por las fuentes consultadas se construyó un Calculador de P que estima la dosis de fertilizante a utilizar según el nivel actual de P Bray1 del suelo y el criterio de fertilización que se desee utilizar.

Se plantean tres criterios de fertilización que se detallan a continuación:

- *Dosis de Referencia*: se denomina así aquella dosis que habitualmente aplica el productor o recomienda el asesor con una mirada de corto plazo. Es un dato que el usuario debe suministrar al calculador (Entrada).

A partir del nivel actual de P Bray1, se estima el rendimiento relativo según la Ecuación

1. Con la dosis aplicada se estima el incremento de P Bray1 del suelo según las Ecuaciones 2 a 4.

- *Dosis de Suficiencia*: es la mínima dosis que asegura el máximo rendimiento relativo del cultivo. Implica una visión de corto plazo solo pensando en el rendimiento sin tener en cuenta que sucede con el P en el suelo después de ese cultivo.

De acuerdo a la función ajustada sobre los datos del trabajo de Gutiérrez Boem et al. (2010), se requiere un valor de P-Bray1 de 20 ppm, para que este nutriente no limite el rendimiento potencial. Entonces, según este criterio, se aplica una dosis que eleve el P-Bray1 del lote hasta dicho valor. Para calcular la dosis necesaria se emplea la ecuación 5 derivada del trabajo de Rubio et al. (2007).

#### Ecuación 5

Dosis P Suficiencia =  $P \text{ Objetivo (ppm o mg kg}^{-1}) - P \text{ Suelo (ppm o mg kg}^{-1})$  \* kg P para aumentar un  $\text{ppm o mg kg}^{-1} \text{ (kg ha}^{-1}) = ((0.1 * \text{Densidad del Suelo (t m}^{-3}) * \text{Profundidad de Muestreo (cm)) / b,$

- *Dosis Construcción y Mantenimiento*: dosis que tiene en cuenta el criterio de Construcción y Mantenimiento (visión de mediano-largo plazo). Además de asegurar el máximo rendimiento, la dosis aplicada determina que el P-Bray1 vaya creciendo hasta el alcanzar el nivel objetivo de al menos 20 ppm al cabo de un determinado número de años.

En cada año se aplica una dosis que equivale a la suma de la extracción del cultivo más una cantidad adicional de P para ir subiendo el P Bray1 en el suelo. La extracción se estima multiplicando el rendimiento (que el usuario indica al Calculador) por  $3,5 \text{ kg t}^{-1}$  que corresponde a la concentración de P en el grano (IPNI, 2013). La cantidad de fertilizante necesaria para elevar el P-Bray1 se calcula mediante la ecuación 5 dividido el número de años al término de los cuales se desea alcanzar el P Objetivo al finalizar el ciclo del cultivo.

Todos los cálculos realizados dentro del Calculador de P, fueron incluidos en una planilla de Excel ®, utilizando funciones y macros disponibles en este programa.

## **Desarrollo de los cálculos**

Como primera aproximación se calculan los Coeficientes de Suficiencia en función de adaptaciones de las ecuaciones de Gutiérrez Boem et al. (2010) (Fig. 1). Estos coeficientes nos indican el rendimiento relativo potencial logable con cada nivel de P Bray1 en el suelo, lo cual nos permite inferir una potencial pérdida de rendimiento relativo la cual podría ser revertida con una aplicación de P.

Considerando la dosis de fertilizante aplicado (de acuerdo a cada uno de los criterios de fertilización empleados) y a la exportación estimada de P por el cultivo se puede calcular un balance de P del suelo en cada año para cada criterio de fertilización. Con el balance obtenido y considerando las ecuaciones desarrolladas por Ciampitti (2009); Ciampitti et al. (2011; 2011 a; 2011 b), se pudo estimar de cuánto es la variación del P-Bray al finalizar el año considerado.

## **Cálculo de la rentabilidad de cada una de las opciones**

El calculador permite hacer un análisis económico preliminar de la aplicación según variabilidad en la dosis aplicada en función del rendimiento potencial buscado y del criterio seguido. Para ello utilizamos el rendimiento a la “dosis de suficiencia”, la cual posibilita maximizar el rendimiento, y le restamos el rendimiento sin aplicación de P. El siguiente paso es valorizar ese rendimiento por el precio de maíz y a ese se le resta el costo adicional del P aplicado para posibilitar maximizar el rendimiento. El resultado final en este caso es el ingreso neto potencial que genera la simulación de la práctica de fertilización a la “dosis de suficiencia”.

El calculador permite realizar, también, un cálculo de rentabilidad usando como variable en este caso la dosis de “construcción y mantenimiento”. La forma de hacerlo



es similar a la aplicada en el caso de la “dosis de suficiencia” valorizando el ingreso adicional en rendimiento por el precio del grano de maíz y restando a eso el costo del P como fertilizante para maximizar el rendimiento y a su vez lograr aumentar el P en el suelo. Si se sigue el ejemplo de lograr llegar al objetivo de 20 ppm P Bray1 en el suelo al termino de 5 años, el aumento anual del P disponible partiendo de un valor de 10 ppm P Bray1 es de 2 ppm de P Bray1 en este último caso, y ese es el número que se aplica para el cálculo del costo de la inversión en fertilización fosfatada, para lograr esos objetivos de rendimiento del cultivo y de mejoramiento del P disponible en el suelo. Es válido aclarar que no se tiene en cuenta un costo adicional por la aplicación del fertilizante fosfatado porque se asume que está considerado dentro de los costos operativos. A modo de ejemplo, se puede incurrir en un costo si se decide hacer una aplicación de fertilizante fosfatado previa a la siembra del cultivo y no junto a la operación de siembra.

## USOS DEL CALCULADOR

### **Entradas al Calculador**

Para comenzar a operar el mismo es necesario ingresar los datos que se muestran en la Tabla 2.

Los datos para inicio en el Calculador son:

1. Nivel de P Bray1 en el suelo (en ppm de P).
2. Ingresar número de años (ejemplos 5, 10, 15) ¿En cuántos años quiere subir su P en el suelo al nivel deseado para no perder potencialidad de rendimiento?

3. Rendimiento esperado para calcular el requerimiento de P ( en número de toneladas métricas por hectárea)
4. Precio del Maíz (U\$S t<sup>-1</sup>)
5. Precio de la unidad de P (U\$S kg de P<sup>-1</sup>)

Tabla 2. Entradas del Calculador. Las celdas en sombreado amarillo son las que se pueden modificar y constituyen los datos de entrada.

## Entradas

<b>Arcilla</b>	<b>25</b>	%
<b>Densidad Aparente</b>	<b>1,2</b>	t m <sup>-3</sup>
<b>Profundidad de Muestreo</b>	<b>20</b>	cm
<b>P Bray 1</b>	<b>10</b>	ppm
<b>Tiempo de Construcción</b>	<b>5</b>	Años
<b>Rendimiento</b>	<b>10</b>	t grano ha <sup>-1</sup>
<b>Precio Maiz</b>	<b>150</b>	U\$S t <sup>-1</sup>
<b>Precio P</b>	<b>2,6</b>	U\$S kg P <sup>-1</sup>

Se considera un valor promedio de arcilla de 25%. Sitios con porcentaje de arcilla significativamente diferentes a este promedio tendrán un desvío en los resultados. Lo mismo se asume para la densidad aparente del suelo que es de 1,2 t m<sup>-3</sup>.

Es válido aclarar que los coeficientes y por ende los resultados no cambian en forma significativa para desvíos normales de los datos dentro de la región considerada de aplicación para este calculador, zona norte de la región pampeana, ya que el rango de análisis de estos parámetros (porcentaje de arcilla y densidad aparente) donde se realizaron los experimentos desde donde se extrajo la información, fue bastante amplio.

Por ejemplo si se considera un porcentaje de arcilla mayor a 40% los resultados cambian y la tendencia es a necesitar más  $\text{kg ha}^{-1}$  de P aplicado para obtener los mismos resultados en termino de nivel de P disponible en el suelo, que para el promedio de 25%. No es tan importante el cambio cuando los porcentajes de arcilla son menores a 25%.

Una vez ingresados esos datos en la tabla Entradas, se pasa a la Tabla 3, la cual muestra donde se puede entrar la Dosis de Referencia elegida (en la primera celda de la misma sombreada en amarillo) para el cultivo actual (maíz) y el año en curso, y donde se simula el inicio del plan de fertilización (el resto de las celdas). Estas celdas del plan de fertilización constituyen las Salidas del Calculador.

Tabla 3. Entrada –Salidas del Calculador.

## Entradas - Salidas

<b>Dosis de P Referencia</b>	<b>12</b>	$\text{kg P ha}^{-1}$
<b>Dosis de P Suficiencia</b>	<b>42,4</b>	$\text{kg P ha}^{-1}$
<b>Dosis de P para Mantenimiento</b>	<b>43,5</b>	$\text{kg P ha}^{-1}$
<b>Extracción del Cultivo</b>	<b>35</b>	$\text{kg P ha}^{-1}$
<b>Rendimiento sin P</b>	<b>83,2%</b>	
<b>Rendimiento sin P</b>	<b>8,32</b>	$\text{t ha}^{-1}$
<b>Rendimiento a Dosis P Suficiencia</b>	<b>10,00</b>	$\text{t ha}^{-1}$
<b>Rendimiento a Dosis P Referencia</b>	<b>8,84</b>	$\text{t ha}^{-1}$
<b>Rendimiento a Dosis P Mantenimiento</b>	<b>10,00</b>	$\text{t ha}^{-1}$
<b>Retorno Marginal a Dosis P Suficiencia</b>	<b>\$141,47</b>	$\text{U\$S ha}^{-1}$
<b>Retorno Marginal a Dosis P Referencia</b>	<b>\$46,25</b>	$\text{U\$S ha}^{-1}$
<b>Retorno Marginal a Dosis P Mantenimiento</b>	<b>\$138,71</b>	$\text{U\$S ha}^{-1}$

La celda en sombreado amarillo es la que se puede modificar y constituye la continuidad de los datos de entrada del Calculador.

## Salidas del Calculador

A partir de los datos ingresados, el calculador genera la recomendación de acuerdo al criterio seleccionado por el usuario y en función de cuáles son sus objetivos de manejo del nutriente P, su modelo de producción y manejo económico. Se puede ver allí el rendimiento sin aplicación de P, el rendimiento con aplicación de P para cada criterio aplicado: i) Dosis de Referencia (decidida por el usuario), ii) Dosis de Suficiencia (calculada según la ecuación 5), y iii) Dosis de Construcción y Mantenimiento, así como los retornos económicos esperados para cada criterio utilizado (Tabla 3).

El Calculador también estima los resultados del programa de fertilización a largo plazo (Tabla 4), de acuerdo a que criterio fue elegido según la dosis efectivamente aplicada:

Tabla 4. Efectos Programa Fertilidad a Largo Plazo - Salidas.

Efectos del programa de fertilidad a largo plazo	Años siguiendo programa de fertilidad				
	1	2	3	5	10
	----- P Dosis Aplicada(kg P ha <sup>-1</sup> ) -----				
Dosis Suficiencia	37,6	35,5	35,5	35,2	35,1
Dosis Referencia	12	12	12	12	12
Dosis Mantenimiento	43,5	43,5	43,5	35,0	35,0
	----- P Bray P1 (ppm) Estimado -----				
Dosis Suficiencia	11,1	11,5	11,6	11,7	11,7
Dosis Referencia	9,8	9,6	9,5	9,1	8,2
Dosis Mantenimiento	12,0	14,0	16,0	20,0	20,0
	----- Rendimiento Estimado (t ha <sup>-1</sup> ) -----				
Dosis Suficiencia	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Dosis Referencia	8,81	8,77	8,74	8,67	8,51
Dosis Mantenimiento	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

## Gráficos de salida del Calculador

El Calculador genera cuatro gráficos de salida que se detallan a continuación.

- Los niveles de rendimiento relativo sin aplicación de P según el nivel de P disponible Bray1 del suelo (Figura 3).
- La recomendación de aplicación de P según el nivel de P disponible Bray1 del suelo (Figura 4), que varía según el criterio de fertilización considerado.
- La predicción del rendimiento relativo alcanzado según la dosis de P aplicado (Figura 5).

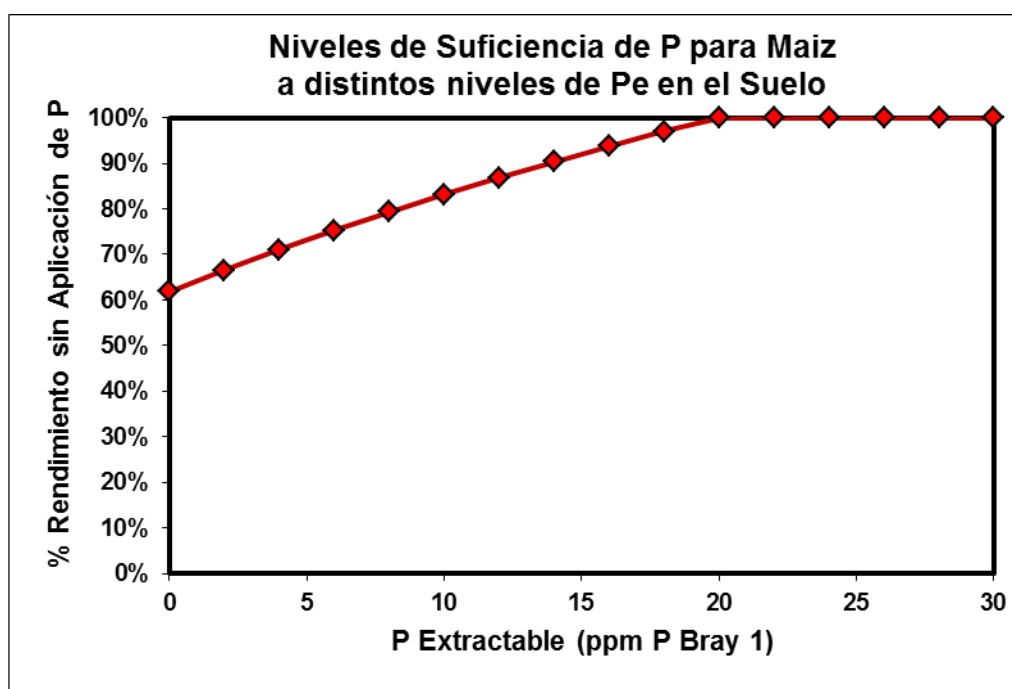


Figura 3. Rendimiento relativo de maíz sin aplicación de P en función del nivel de P extractable en el suelo.

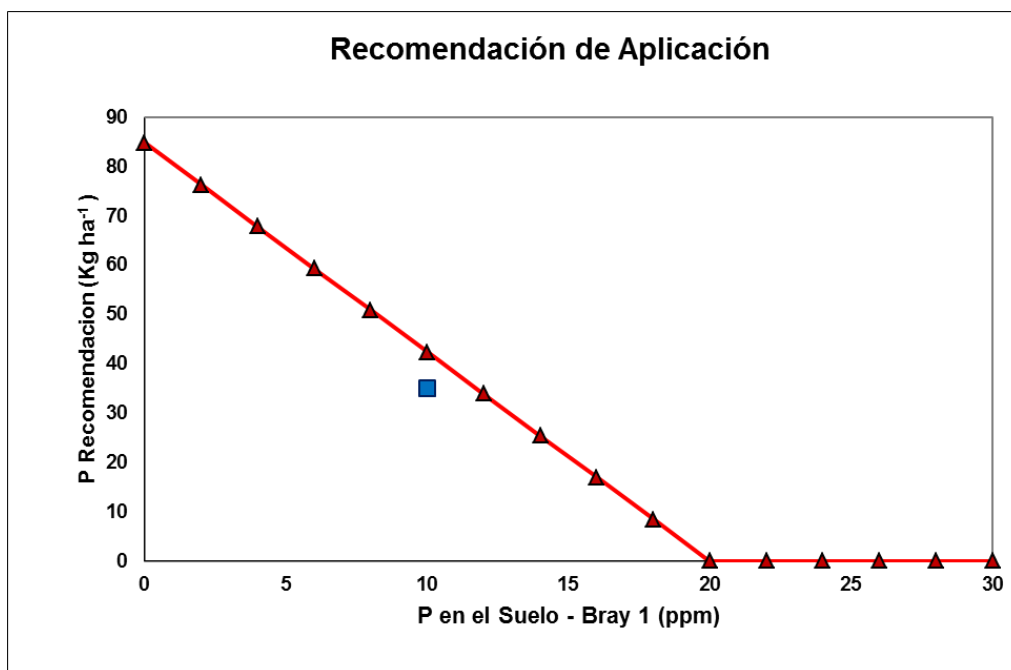


Figura 4. Recomendación de aplicación de P en función del nivel de P extractable en el suelo. El cuadrado azul indica la extracción de P del cultivo para los datos ingresados.

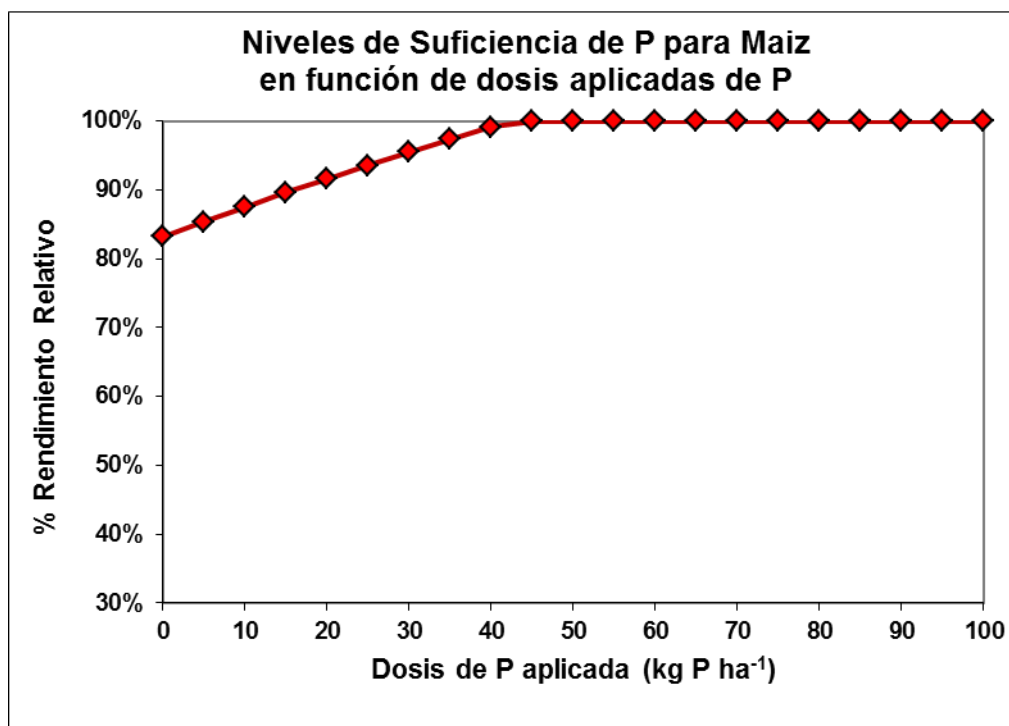


Figura 5. Predicción del rendimiento relativo de maíz (%) en función de la dosis de P aplicada (kg P ha<sup>-1</sup>).

Con los datos ingresados, el Calculador muestra en forma gráfica los cambios en los niveles de P extractable Bray 1 en el suelo en función de los diferentes criterios posibles de utilizar y las dosis de P aplicadas (Figura 6).

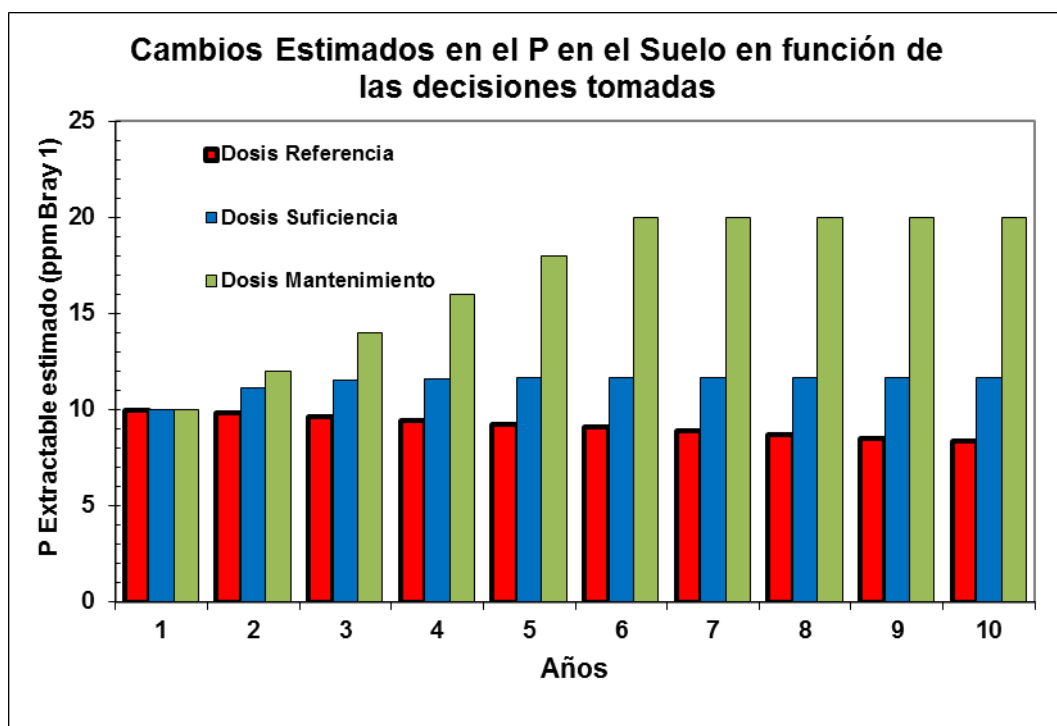


Figura 6. Predicción de los cambios en los niveles de P extractable para diferentes criterios de fertilización posibles.

## CONCLUSIONES

El trabajo realizado permitió utilizar y aplicar la información disponible publicada en la literatura científica en una herramienta práctica, de gran utilidad para la gestión de la fertilización fosfatada en agro-ecosistemas.

Las bases de funcionamiento de la herramienta radican en información publicada, la cual puede ser revisada por cualquier interesado en el tema, ya sea, para perfeccionar la herramienta y generar un modelo superador, o para interpretar lo realizado.

Las entradas al Calculador como las salidas tienen un entorno sencillo de operar y visualizar.

Bajo las premisas anteriores, el Calculador de P satisface el objetivo planteado.

## BIBLIOGRAFÍA

**Barbagelata P.A. y R.J.M. Melchiori 2007.** Balance de nutrientes en campos agrícolas de la provincia de Entre Ríos. En Caviglia O.P., Paparotti O.F., Sasal M.C. (Eds.). Agricultura Sustentable en Entre Ríos. Ediciones INTA. Buenos Aires. p. 89-94.

**Berardo, A. 1994.** Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA Balcarce. Boletín Técnico 128. EEA INTA-Balcarce. Buenos Aires. Argentina.

**Caviglia O. 2011.** Intensificación agrícola: un enfoque a nivel de sistema para mejorar la eficiencia en el uso de recursos y nutrientes y la sustentabilidad ambiental. INTA EEA Paraná- FCA (UNER) – CONICET. Presentado en Simposio de Fertilidad 2011. Rosario, Argentina.

**CIAFA. 2009.** Consumo de Fertilizantes 2007. <http://www.ciafa.org.ar/mercado.htm>

**Ciampitti I.A. 2009.** Tesis Magister Scientiae en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Capital Federal, Buenos Aires. 196 p.

**Ciampitti, I.A., F.O. García, L.I. Picone, y G. Rubio. 2008.** Phosphorus in field crop rotation of the Pampas of Argentina. Dynamics of Bray P, P Balance and Soil P fractions. Agronomy Abstracts. ASA-CSSA-SSSA-GSA International Annual



Meetings. October 5-9. Houston, Texas. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.

**Ciampitti, I.A., F.O. Garcia, L.I. Picone, and G. Rubio. 2011a.** Phosphorus Budget and Soil Extractable Dynamics in Field Crop Rotation in Mollisols of Argentina. SSSAJ: Volume 75: Number 5 • January–February 2011. doi:10.2136/sssaj2009.0345

**Ciampitti, I.A., F.O. García, L.I. Picone, and G. Rubio. 2011b.** Soil Carbon and Phosphorus Pools in Field Crop Rotations in Pampean Soils of Argentina. SSSAJ: Volume 75: Number 2 • March–April 2011. Soil Science Society of America, 5585 Guilford Rd., Madison WI 53711 USA.

**Ciampitti, I.A., L.I. Picone, G. Rubio and F.O. Garcia. 2011.** Pathways of Phosphorous Fraction Dynamics in Field Crop Rotations of the Pampas of Argentina. SSSAJ: Volume 75: Number 3 • May–June 2011. Soil Science Society of America, 585 Guilford Rd., Madison WI 53711 USA.

**Cruzate, G.A., y R. Casas. 2009.** Extracción de nutrientes en la Agricultura Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS). IPNI .44:21.26. Buenos Aires.

**Cruzate, G.A., y R. Casas. 2012.** Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS). Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS). IPNI. IAH N°6: 7-14. Buenos Aires

**Darwich, N. 1983.** Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos, IDIA, 409-412. Enero-Abril, pág. 1-5.

**Darwich, N. 1994.** Los sistemas mixtos y la fertilidad de los suelos. 2do Simposio Tecnológico AACREA, Bs. As. 29-30 sept. 1994, pág. 1 a 10.

**Echeverría H.E., y F.O. García. 1998.** Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín técnico 149, INTA, EEA Balcarce. Argentina.

**García, F.O. 2007.** Intensificación Ecológica de los Sistemas de Producción de la Región Pampeana de Argentina. Trabajo presentado en XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo – SLCS – León, Guanajuato, México – 17 al 21 de Septiembre de 2007.

**García, F.O, y M.F. González Sanjuán. 2010.** Balance de Nutrientes. ¿Cómo estamos? ¿Cómo Mejoramos? Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI 48: 1-5. Buenos Aires. Disponible en: [www.ipni.net/LASC](http://www.ipni.net/LASC).

**García, F.O. y I.A. Ciampitti. 2010.** Enfoques Alternativos para el Diagnóstico de Fertilidad de Suelos. El Enfoque “Tradicional”. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mayo 31 a 4 Junio de 2010. Rosario. Argentina.

**Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, y M. Boxler. 2010.** ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de Fosforo Disponible para Soja, Maíz y Trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mayo 31 a 4 Junio de 2010. Rosario. Argentina.

**IPNI. 2013.** Tabla de Requerimientos de Nutrientes por los Cultivos. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>.

**Mallarino, A.P. 2011.** Del diagnóstico a la aplicación: Conceptos básicos y prácticos para la nutrición de cultivos. Informaciones Agronómicas Hispano América n° 1. Marzo 2011. IPNI.

**Oliverio, G. y G. López. 2008.** Fertilizantes para la próxima década. XVII Seminario Anual Fundación Producir Conservando. Setiembre 2008. Buenos Aires. Argentina.

**Rubio G., F.H. Gutiérrez Boem y M.J. Cabello. 2007.** ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas sur y norte de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas* 35: 5-8. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

**Rubio G., M.J. Cabello, F.H. Gutiérrez Boem y E. Munaro. 2008.** Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. *SoilSci. Soc. Am. J.* 72: 1721-1727.

**Sainz Rozas, H.R., y H.E. Echeverría. 2008.** Relevamiento de la concentración de fósforo asimilable en suelos agrícolas de la región pampeana y extra-pampeana. *Actas CD XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* San Luis. AACCS.

**Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría y Angelini H. 2011.** Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extra pampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 4:14-18. IPNI.

**Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría y H. Angelini. 2012.** Fósforo extractable en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana argentina. *RIA* 38: 33-39.

**Vázquez, M. 2002.** Balance y Fertilidad Fosforada en Suelos Productivos de la Región Pampeana. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP). Simposio de P organizado por INPOFOS. Publicado en *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* # 16. Diciembre 2002.