

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado para optar al Grado de  
Ingeniero Agrónomo”

**DETERMINACION DEL NIVEL CRITICO DE FOSFORO EN  
UN SUELO HAPLUSTOL TIPICO PARA EL CULTIVO DE  
TRIGO**

**Alumno: Leandro Patricio Agusti  
DNI: 28533329**

**Director: Ing. Isabel Bernardo  
Co-Director: Ing. Elena Bonadeo**

**Río Cuarto – Córdoba  
Octubre/2005**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO  
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN**

**Título del Trabajo Final: DETERMINACION DEL NIVEL  
CRITICO DE FOSFORO EN UN HAPLUSTOL TIPICO**

**Autor: LEANDRO PATRICIO AGUSTI  
DNI: 28533329**

**Director: ING. ISABEL BERNARDO  
Co-Director: ING. ELENA BONADEO**

**Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado  
Evaluador:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Fecha de Presentación: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.**

**Aprobado por Secretaría Académica: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.**

\_\_\_\_\_  
**Secretario Académico**

## **DEDICATORIA**

- *Para mis viejos, Leandro y Susana que siempre me bancaron..*
- *Para mis abuelas Piru y Yaya, que estuvieron en los momentos que las necesitaba, acompañándome y preocupándose por mí.*
- *Para Andrea, que siempre estuvo a mi lado, ayudándome en todo momento*
- *Para todo mi Familia, por su apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

- *A los profesores de la UNRC, en particular la Cátedra de Relación Suelo-Planta, que siempre me trataron de la mejor manera, dándome completa libertad para trabajar, Chela, Marcos, Elena, Eugenio.... Muchas Gracias!!!*
- *A mis compañeros, que estuvieron conmigo día a día, durante 5 años, siempre tirando para adelante. Javier, Federico, Raúl, Emilio, Agustina, M. de los Ángeles, Fernando, Ezequiel, César..... Muchas Gracias por estar allí.*
- *A todos los que formaron parte de mi formación académica.*

## Índice General

<b>Resumen</b>	7
<b>Summary</b>	8
<b>I - Introducción</b>	9
I-1 - El nivel crítico y la calibración	12
I-2 - El Factor capacidad o poder buffer	14
<b>II - Hipótesis</b>	17
<b>III - Objetivos</b>	17
III - 1 Generales	17
III - 2 Específicos	17
<b>IV- Materiales y Métodos</b>	17
IV- 1 -Experimentación en Invernáculo	19
IV- 2 -Determinación de nivel crítico y capacidad Buffer	21
IV- 3- Diseño experimental	21
<b>V - Resultados</b>	22
V - 1 - Test de diferencia de medias	22
V - 2 - Nivel Crítico	24
V - 3 - Capacidad Buffer	25
<b>VI - Discusión</b>	25
VI - 1- Biomasa Aérea	25
VI - 2 - Biomasa Radical	26
VI - 3 - Nivel Crítico	26
VI - 4 - Capacidad Buffer	26
<b>VIII - Conclusión</b>	27
<b>IX - Aplicación de los resultados</b>	28
<b>X - Investigaciones futuras</b>	28
<b>XI - Bibliografía</b>	30
<b>XII – Apéndice</b>	33

## Índice de Tablas

**Tabla N° 1:** Exportación y reposición de nutrientes que realizan los cultivos a nivel nacional.

Página 10.

**Tabla N° 2.** Propiedades de un Haplustol típico de Río Cuarto.

Página 18

**Tabla Nº 3.** Test de diferenciación de medias.

Página 10

## Índice de figuras

- Figura 1.** Evolución de la disponibilidad de P en la región pampeana. Página 11
- Figura 2.** Esquema general de los principios de calibración del análisis de suelo usando modelos curvilíneos y aproximación por Cate-Nelson. Página 13
- Figura 3.** Esquema simplificado de equilibrio dinámico propuesto por Larsen (1967) Página 14
- Figura 4.** Momento de la toma de muestra, condición en que se encuentra el suelo. Página 17
- Figura 5.** Presentación de muestras en olla a presión, secado y pesado de las mismas. Página 18
- Figura 6.** Tamizado de las muestras para lograr un suelo homogéneo donde se desarrolle el sistema radicular, sin impedancias. Página 19
- Figura 7.** Regado post-siembra. Página 19
- Figura 8.** Desarrollo fisiológico y cronológico del cultivo hasta cosecha. Página 20

## Índice de Gráficos

- Gráfico 1.** Relación entre la capacidad máxima de adsorción de P y el fósforo remanente en el equilibrio, luego de agitar una solución de  $60 \text{ mg.kg}^{-1}$  de P. Página 15
- Gráfico 2.** Relación entre la dosis de fósforo aplicado y su disponibilidad a los 60 días. Página 16
- Gráfico 3.** Respuesta de la biomasa aérea (Rendimientos Relativos) a la adición de P. Página 23
- Gráfico 4.** Respuesta de la biomasa radical (Rendimientos Relativos) a la adición de P. Página 23
- Gráfico 5.** Respuesta total (Biomasa Aérea + Radical) a la adición de P. Página 24
- Gráfico 6.** Determinación del NC utilizando el modelo de Cate y Nelson. Página 24
- Gráfico 7.** Capacidad Buffer a partir de P. Adicionado – P. Recuperado. Página 24

## RESUMEN

Los análisis de suelos son un importante indicador para determinar la probabilidad de respuesta a la fertilización. Las cantidades de nutrientes que se encuentran en el suelo en forma disponible para los vegetales, es una de las principales razones de estudio, ya que existe una relación directa con el rendimiento de los cultivos. Los objetivos de esta investigación son determinar el nivel crítico de fósforo para la producción de trigo y su Capacidad Buffer (C.B.) en Haplustoles típicos de la zona de Río IV. El trabajo se realizó en invernáculo en condiciones controladas, con un diseño completo al azar por triplicado. Los tratamientos fueron el equivalente a 50, 100, 150, 200, 225,250 Kg. de FDA y testigo aplicados a las macetas. Mediante curvas de calibración, por el método de Cate y Nelson se determinó un nivel crítico de P de 15 ppm y la C.B. de 0.5298 surge a partir de la pendiente de la recta dada por la relación P adicionado – P recuperado. La dosis equivalente de P obtenida es de 3.38 Kg. /ha, la cual se obtuvo a partir de la inversa de la pendiente de la recta. Con el análisis e integración de los datos observados, se realiza una recomendación de fertilización. Se concluye que, el suelo en estudio con un valor de análisis de 9 ppm (por Bray y Kurtz 1), para que alcance el nivel crítico estimado, es necesario la adición de 38 Kg. de P /ha.

**Palabras Claves:** *Fósforo; Nivel Crítico, Haplustol típico, Trigo, Capacidad Buffer.*

## SUMMARY

The soil's analyses are an important indicator of the probability of the fertilization answer. The quantity of nutrients that are available for the vegetables in the soil is one of the main reasons of this study due to the direct relation with crop yields. The aims of this investigation are both the determination of the phosphorus critical level in the Wheat's production and its Buffer Capacity in the Typic Hapluslolls of Río Cuarto. The experiment was carried out under controlled conditions in a greenhouse, with a complete random design in triplicate. The treatments were the testing, 50, 100, 150, 200, 225 and 250 Kg. of FDA put in the corresponding pots. Through the Calibration Curve, through Cate and Nelson methods, we could determine a Phosphorous critical level of 15 ppm. and the C.B of 0, 5298 emerged from the straight slope given by the relationship between Additional P – Recuperative P. The P equivalent dose obtained is of 3, 38 kg./ha which was obtained from the inverse straight slope. With the analysis and integration of the data, a recommendation of fertilization was made. To sum up, the studying soil with a quantity analysis of 9 ppm. ( fot Bray and Kust 1), for the achievement of the estimated level, it is necessary the addition of 38 kg. of P/ha.

**Key words:** Wheat; *Phosphorus; Critical level; typical Haplustol, Buffer capacity*

## INTRODUCCION

El Fósforo (P) es uno de los 16 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, que absorben la mayor parte como ión ortofosfato primario ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y pequeñas cantidades de fósforo como ión ortofosfato secundario ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ). El pH del suelo influye en la forma química predominante y en la absorción de estas por la planta. Básicamente la fracción soluble de P del suelo abastece a las plantas a partir del equilibrio con las formas lábiles de P inorgánico y orgánico. (Melgar y Camozzi 2002).

La mayor parte del P, está como fosfato insoluble de Ca, Al y Fe, fosfatos fijados por los óxidos de Al y Fe; arcillas y compuestos estables como el humus, los cuales contribuyen en menor proporción al abastecimiento del P soluble. (Catellarín *et.al* 2004).

Las concentraciones más altas de P en plantas jóvenes se encuentran en el tejido de los puntos de crecimiento. El P desempeña un papel importante en la fotosíntesis, la respiración, el almacenamiento y transferencia de energía, la división y crecimiento celular y otros procesos de las plantas. Además, promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces. El P mejora la calidad de los granos, siendo vital para la formación de las semillas. (Guía de fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales 2002).

El contenido de P total en el suelo es variable, entre 0,02 y 0,13%; esta amplia variación se debe a la variabilidad de las rocas parentales, al desarrollo de los suelos y a las condiciones edafológicas y ecológicas; presenta elevada estabilidad en el suelo, no posee compuestos inorgánicos como los nitratos que pueden ser lixiviados o volatilizados, pero su baja solubilidad es la razón principal de su deficiencia para las plantas a pesar de la continua mineralización de los compuestos orgánicos del suelo. (Material didáctico por la Cátedra de Sistema Suelo-Planta, UNRC 2002).

El rendimiento en grano es, principalmente, función del estado fisiológico del cultivo alrededor de floración. Una buena disponibilidad de nutrientes, especialmente desde los momentos en que éstos son requeridos en altas cantidades asegura una buena cobertura foliar, necesaria para la captación de energía, y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa, lo que posibilita al cultivo alcanzar un óptimo estado fisiológico en aquellos momentos decisivos para la determinación del rendimiento (Andrade, 1994).

Los requerimientos de P para el trigo varían entre 4 y 5 Kg. por tonelada de grano (equivalente a 22 Kg. fosfato diamónico o 18 kg. de fosfato monoamónico). El 80 % del P absorbido por el cultivo es exportado por el grano y solo el 20% vuelve al suelo con el rastrojo. (Berardo y Crattone 1998)

La determinación de las cantidades de nutrientes que se encuentran en el suelo en forma disponible para las plantas es uno de los principales objetivos de los estudios de evaluación de fertilidad de los suelos. Pero ese objetivo no puede ser atendido de manera simple, debido a la complejidad de los procesos envueltos en la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-solución-planta (Álvarez, 1982).

Existe una relación de equilibrio entre el P en solución y el P de la fase sólida, o sea que además del proceso de liberación de iones fosfatos a la solución del suelo, si los iones no son absorbidos por los vegetales llegan a un punto en el cual éstos se fijarán, quedando sorbidos o adsorbidos sobre la fase sólida. El equilibrio está gobernado, entre otros factores, por: la oferta del P en la fase sólida (factor Cantidad, Q), por la demanda de los vegetales en crecimiento, por la temperatura, el pH y la actividad microbiana del suelo, factores que junto al tipo y cantidad de arcilla y el contenido de agua determinan la cantidad de P en la solución (factor Intensidad, I) y la tasa de reposición de la fase sólida a la solución (Capacidad o Poder Buffer, PB) (García, 1997).

A nivel nacional, los suelos se vienen degradando desde el punto de vista químico, año tras año. Esto queda muy claro si observamos las estimaciones del proyecto Fertilizar del INTA, en lo concerniente a las exportación de nutrientes por los cultivos y la reposición que se realiza de los mismos a través de los fertilizantes. (Tabla 1).

Tabla 1. Exportación y reposición de nutrientes que realizan los cultivos a nivel nacional

<b>Cultivo</b>	<b>Exportado (t)</b>	<b>Reposición (t)</b>	<b>Balance (t)</b>	<b>Fertilizado (%)</b>
Girasol	15578	6119	-9459	39
Maíz	45747	30242	-15505	66
Soja	191790	30419	-161371	16
<b>Trigo</b>	<b>58899</b>	<b>73401</b>	<b>14502</b>	<b>124</b>
Sorgo	7979	1919	-6060	24
<b>Totales</b>	<b>319993</b>	<b>142100</b>	<b>-177893</b>	<b>44</b>

Fuente: Estadísticas y proyecto Fertilizar INTA.

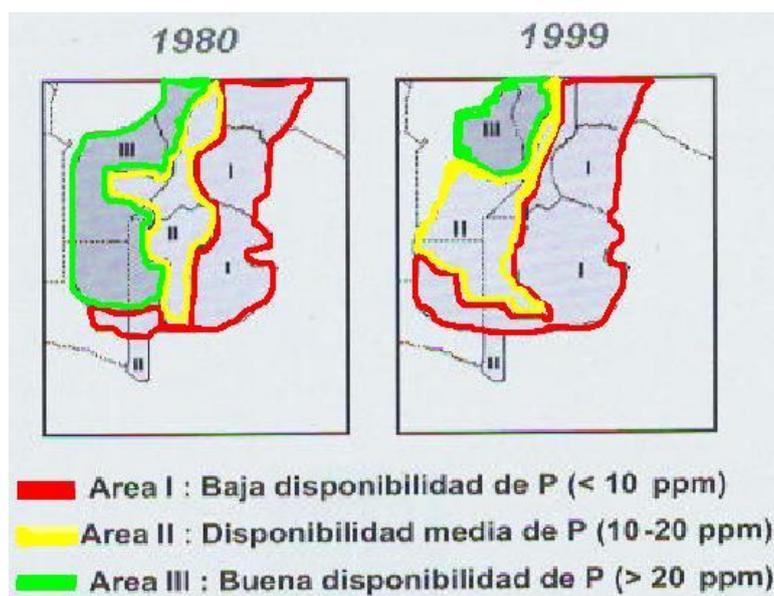
El único cultivo que deja un saldo positivo (provisorio) es el trigo, dado que a continuación se tiene normalmente una soja de 2ª, que consumirá el pequeño excedente dejado por el cultivo invernal. En términos generales se repone solo el 44% de lo que año a año los cultivos están exportando.

Las altas tasas de exportación han provocado disminuciones dramáticas en el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de los diferentes nutrientes, entre ellos el fósforo que se encuentra estrechamente relacionado a la misma.

La fertilización de los cultivos no sólo permitirá un mayor retorno económico en el corto plazo, sino también una planificación racional de la fertilización que permitirá ir incrementando el nivel de nutrientes de más difícil reposición (por ejemplo el fósforo). (Ferraris *et al* 2004).

La continúa remoción de P en los granos y baja reposición del nutriente vía fertilización, del orden del 40% del P extraído por los granos en la década del 90, han resultado en la disminución de los niveles de P disponible. Los primeros efectos se observan en la caída del P orgánico por disminución de la materia orgánica (MO) especialmente en suelo bajo agricultura continua. Por cada 1% de pérdida de MO representa una pérdida de 80 – 120 kg/ha de P en la capa superficial (Vázquez, 2002).

A continuación podemos observar la evolución de la disponibilidad de fósforo en la región pampeana Argentina



Fuente: Darwich 1983-1999, (en García 2003).

**Figura 1.** Evolución de la disponibilidad de P en la región pampeana.

Como se puede apreciar en la figura 1, después de 20 años las regiones de baja a media disponibilidad de fósforo se han ido desplazando hacia el oeste de la región Pampeana, confinando hacia el noroeste a aquellas áreas de buena disponibilidad de este elemento.

Dado la pequeña fracción de P disponible durante el desarrollo de un cultivo, el factor de mayor significancia que controla la nutrición de la planta es la capacidad del suelo de mantener un adecuado abastecimiento de P disponible durante los períodos críticos de demanda del cultivo. La cantidad de P de la solución del suelo es muy limitada y debe ser repuesta hasta dos veces al día o cientos de veces a lo largo del ciclo del cultivo (Stauffer y Sulewski 2003).

### **El Nivel Crítico, análisis y calibración**

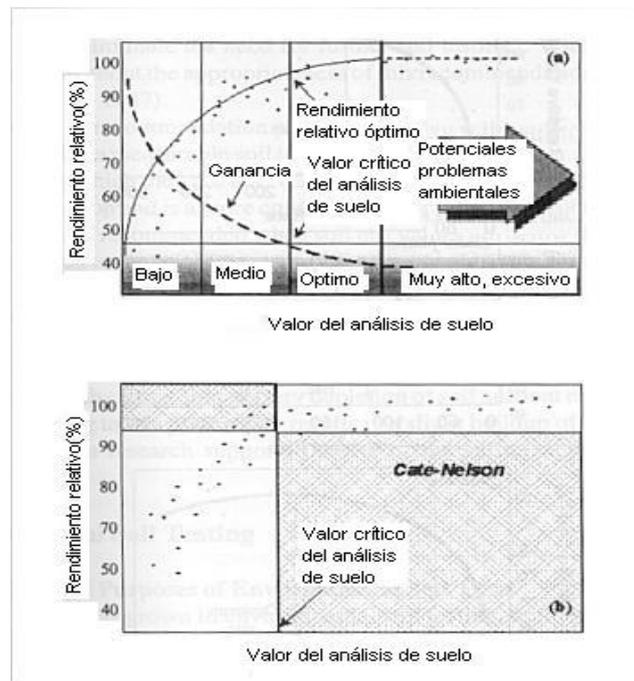
El análisis de suelos es un importante indicador para determinar la probabilidad de respuesta a la fertilización. A partir de estos estudios se ajustan curvas de calibración que permiten determinar niveles de disponibilidad de nutrientes óptimos para la producción de cultivos.

Las curvas de calibración relacionan el resultado del análisis de suelos, los rendimientos esperados y las probabilidades de respuesta. Estas curvas se generan a partir de los resultados de respuesta a la fertilización en estudios conducidos en numerosos sitios y bajo diferentes niveles de disponibilidad inicial de los nutrientes. Las curvas de calibración ajustan la relación entre el rendimiento relativo del cultivo en estudio y el nivel de P disponible en el suelo (P Bray 1). Los rendimientos relativos para un sitio y año específico se calculan dividiendo el rendimiento promedio del tratamiento sin fertilizar por el rendimiento promedio del tratamiento fertilizado con dosis no limitantes para la producción del cultivo. Esta relación se convierte en un porcentaje que se relaciona con el nivel de disponibilidad del nutriente en el sitio, de manera que cada sitio-año genera un punto en la curva de calibración.

El nivel crítico expresa el nivel por debajo del cual la probabilidad de respuesta es mayor. Por arriba del nivel crítico no se espera que la disponibilidad del nutriente limite los rendimientos. Utilizando una curva de calibración se puede estimar la respuesta en rendimiento. (García 1997).

La confiabilidad de las recomendaciones depende de los trabajos de calibración, que permiten definir los niveles críticos (NC) para los análisis de las formas disponibles de los nutrientes y las dosis recomendadas de los fertilizantes que serán adicionados al suelo para obtener la máxima eficiencia económica (MEE). Dicho NC (valor de la concentración del nutriente que corresponde a la disponibilidad necesaria para obtener la producción de máxima eficiencia económica) son variables y dependen no sólo del método de extracción y del cultivo en estudio, sino también de las características mineralógicas, físicas, químicas y físico-químicas de los suelos (Álvarez, 1982).

El mayor problema de los análisis de suelo es la calibración de los valores del análisis con los rendimientos de los cultivos. Las mejores y más apropiadas calibraciones se obtienen a partir de ensayos a campo en los cuales importantes respuestas en rendimiento han sido observadas en condiciones por lo menos normales o buenas para el crecimiento de los cultivos. Datos de cultivos de bajos rendimientos no deberían de tenerse en cuenta. Para calibrar un análisis de suelo para un nutriente determinado, se deben graficar los valores de análisis en función del rendimiento expresado como porcentaje del máximo obtenido en los ensayos a campo para diferentes años como se ilustra en la Figura 2.



**Figura 2.** Esquema general de los principios de calibración del análisis de suelo usando (a) modelos curvilíneos y (b) aproximación por Cate-Nelson (Sims, 1999).

Para determinar el punto en el cual el desarrollo de la planta es óptimo y el valor crítico del análisis de suelo asociado a un rendimiento óptimo (93-95% del máximo rendimiento) se utilizan modelos matemáticos (Figura 2a). De igual manera, se puede usar el procedimiento de Cate-Nelson con el cual se generan cuadrantes, en donde la línea horizontal se encuentra en el óptimo rendimiento relativo y la línea vertical minimiza los puntos del cuadrante superior izquierdo e inferior derecho (Figura 2b). El valor del análisis de suelo correspondiente con la intersección de las dos líneas corresponde al nivel o valor crítico. La parte de la curva con respuesta (por debajo del rendimiento óptimo) se subdivide en

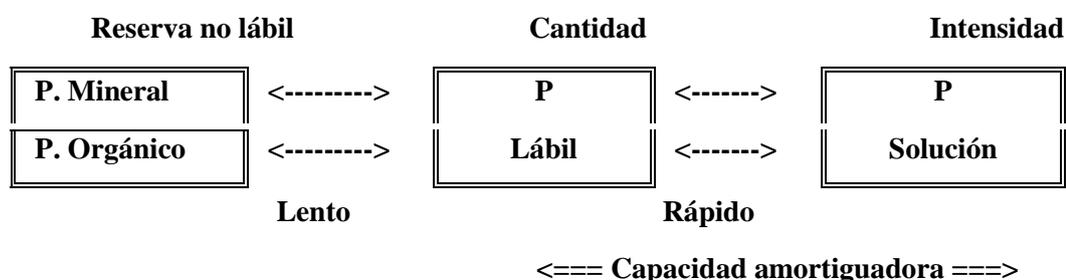
diferentes categorías que indican la probabilidad de obtener una respuesta a la aplicación de un nutriente en particular. (Sumner, 1981)

El P gobierna el rendimiento únicamente en aquellos casos cercanos a la línea límite, lejos de ella, cualquier otro factor menos el P es responsable de los rendimientos decrecientes.

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 a implantar mientras que el de reconstrucción y mantenimiento también incluye aportes para mejorar el nivel de P disponible en el suelo (Echeverría y García, 1998).

### El factor capacidad o poder buffer

En el suelo existen distintas y variadas formas minerales y orgánicas de fósforo que se encuentran en un equilibrio dinámico. El modelo simplificando podría ser descrito en el esquema propuesto por Larsen (1967). El **P lábil** representa a los fosfatos adsorbidos, los minerales de mayor solubilidad y a las formas orgánicas de fácil y rápida mineralización, que están en equilibrio con el P en solución. El **P no lábil** no está en equilibrio con la solución y constituye la reserva de P en formas minerales y orgánicas estables, donde se encuentra más del 90 % del P total del suelo.

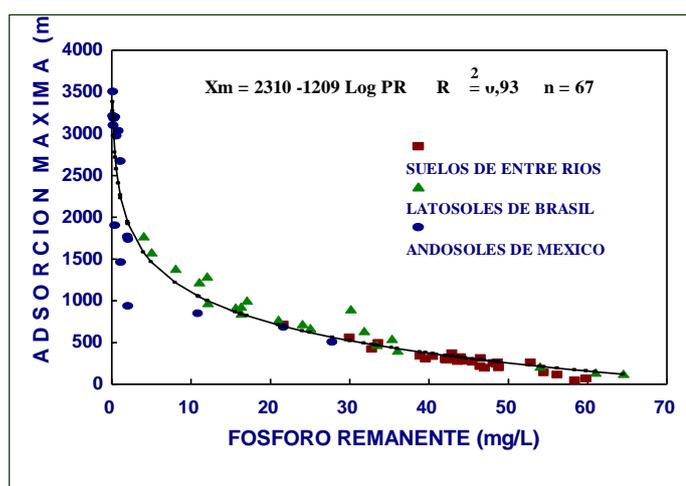


**Figura N° 3.** Esquema simplificado de equilibrio dinámico propuesto por Larsen (1967)

La concentración de un nutriente en la solución del suelo representa la **Intensidad (I)** del mismo, en este caso, los fosfatos en solución. La cantidad del elemento que está en la fase sólida, en equilibrio con la solución, es el factor **Cantidad (Q)**. Para el fósforo, esta es la fracción lábil. La relación dinámica entre la cantidad y la intensidad es conocida como el factor **Capacidad (C)** o capacidad “buffer”. La Capacidad Amortiguadora es la propiedad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de P en solución, en estado de equilibrio, al extraer o agregar P. La expresión matemática es:  $C = - \Delta Q / \Delta I$

El factor capacidad es importante en la nutrición de las plantas: un suelo de alta capacidad amortiguadora repondrá rápidamente el P agotado de su solución, por las plantas. Por otro lado, en suelos con diferente capacidad amortiguadora se requieren distintas cantidades de fertilizante para alcanzar un mismo nivel de P en solución. La capacidad de retención de fósforo es una propiedad de cada suelo, relacionada con el porcentaje de arcilla y óxidos libres (Boschetti, *et al.* 1998; Quintero, *et al.* 1999).

A partir de las experiencias realizadas por otros autores, se puede afirmar que la mayoría de los suelos que se cultivan en Argentina tienen de mediana a baja capacidad de adsorción de P. En el gráfico 1 se puede apreciar todo el rango posible de explorar, en lo que respecta a fijación de fósforo. La máxima capacidad de retención se observa en los Andisoles de México, que pueden adsorber más de 1000 mg.kg<sup>-1</sup> de P. En el rango medio a alto se encuentran los Latosoles de Brasil, mientras que los suelos de Entre Ríos, afortunadamente, poseen baja a muy baja capacidad de fijación de P, siendo la adsorción máxima inferior a 500 mg.kg<sup>-1</sup>



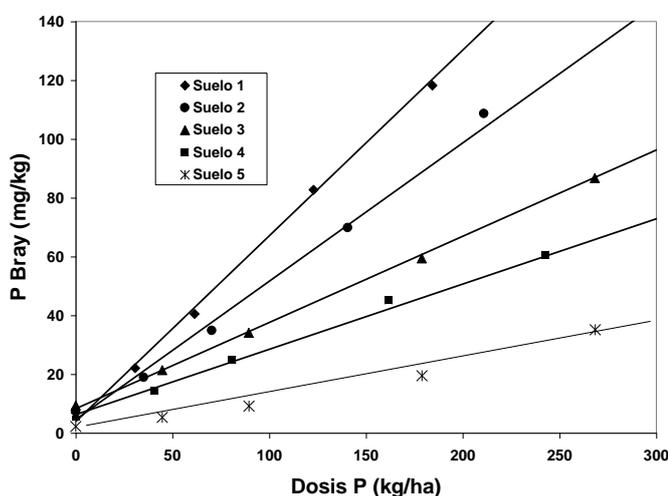
**Gráfico 1.** Relación entre la capacidad máxima de adsorción de P y el fósforo remanente en el equilibrio, luego de agitar una solución de 60 mg.kg<sup>-1</sup> de P. (Boschetti, *et al.* 1998)

En el caso del fósforo, la mayoría de los laboratorios en la región pampeana, evalúan su disponibilidad por Bray y Kurtz. Este método, ha sido calibrado para los cultivos más importantes de la región, permitiéndonos una interpretación válida de los resultados.

Los ensayos realizados permiten sostener que, para la mayoría de los cultivos, existe una alta probabilidad de respuesta a la fertilización cuando la disponibilidad de P-Bray es inferior a 10-15 ppm. Sin embargo, no se dispone de herramientas apropiadas para el cálculo de la dosis a aplicar en cada caso. En principio se aplican dosis más altas de fertilizante en

los suelos con menor disponibilidad de P, lo cual parece lógico. Pero..... ¿No se debería tener en cuenta el poder de retención o de fijación de fósforo que tienen los suelos?

La capacidad buffer de P o poder amortiguador del suelo tiene un efecto directo sobre la cantidad de fertilizante que pasará a formas no disponibles para las plantas. En suelos de media a alta capacidad buffer, como los suelos rojos de Misiones o norte Corrientes, un 70 % del P adicionado puede pasar rápidamente a formas no lábiles y poco disponibles. Suelos franco limosos a franco arcillosos tienen baja capacidad de retención, quedando un 40 a 50 % del P aplicado fácilmente disponible para las plantas. Mientras que en los suelos de texturas gruesas, solo 30 a 40 % pasa a formas no lábiles (Quintero et al. 1999). Esto puede ser fácilmente interpretado a partir del gráfico N° 2. Allí se puede observar que, dependiendo del tipo de suelo, la cantidad de fertilizante que hay que aplicar para alcanzar un determinado valor de P disponible, es diferente.



**Gráfico 2.** Relación entre la dosis de fósforo aplicado y su disponibilidad a los 60 días.

Existe una relación lineal entre la cantidad de P aplicado y la disponibilidad que es alcanzada; cuya pendiente está directamente relacionada al poder de fijación del suelo. Esta pendiente, esta estrechamente relacionada con las características del suelo que hacen a su poder de fijación (contenido de arcillas, óxidos libres, etc) o medidas del poder buffer. La misma permite calcular la cantidad de fertilizante que provoca un incremento en el fósforo disponible de una parte por millón.

### **Hipótesis:**

- La adición de fertilizante fosfatado en el cultivo de trigo implantado sobre un Haplustol típico permitirá detectar respuestas diferenciales en el rendimiento, a distintos niveles de adición de P.

### **Objetivo general:**

- Definir para el subgrupo Haplustol típicos el nivel crítico de P para el cultivo de trigo mediante un estudio de calibración.

### **Objetivos específicos:**

- a) Determinar la variación del rendimiento (materia seca) en trigo a diferentes niveles de adición de P.
- b) Evaluar producción de materia seca del sistema radical en función del P aplicado.
- c) Evaluar en forma predictiva la capacidad del suelo de ceder P al cultivo de trigo, dado por la capacidad buffer (CB) del mismo.

## **MATERIALES Y METODOS**

El trabajo se llevó a cabo en el invernáculo que la cátedra de Sistema Suelo – Planta posee en las instalaciones de la UNRC.

El ensayo se realizó con un suelo del departamento de Río Cuarto, de la región Centro Sur de la Provincia de Córdoba, Argentina, perteneciente al Sub grupo de Haplustoles típicos franco arenoso muy fino (Soil Taxonomy 1999). Ubicado 20 Km al NO de la ciudad de Río Cuarto, del cual se tomaron muestras y suficiente material del horizonte A, para llevar a cabo la experiencia, por ser el medio en el cual se desarrollan el mayor número de raíces.



**Figura 4.** Condición del suelo al momento de extracción de la muestra. (22-06-04)

**Tabla 2. Propiedades de un Haplustol típico de Río Cuarto.**

Serie "tentativa"	Taxonomía	Textura	Secuencia de horizontes	Características del horizonte superficial			
				agua a 1/3 bar (%)	agua a 15 bar (%)	pH actual	pH potencial
Río Cuarto	Haplustol típico	Franco-arenosa	Ap-Ad-Bw-C	17.8	10.5	6.5	5.35

Para mantener el suelo continuamente a capacidad de campo y no tener variabilidad dada por otro tipo de factor que no sea el fósforo, se debió obtener la capacidad de almacenar agua que posee este suelo a capacidad de campo. Para ello se utilizó el método de la membrana de porcelana porosa (Richard 1965) que consiste en una olla a presión especialmente diseñada para esta actividad en la cual se colocó las muestras y se las dejó durante 48hs; luego se tomó el peso de los crisoles y se los llevó a estufa con ventilación forzada hasta peso constante. Con estos datos podemos obtener el valor de porcentaje de agua a capacidad de campo que posee este suelo.



**Figura 5.** Presentación de muestras en olla a presión, secado y pesado de las mismas.

### Experimentación en invernáculo

Las muestras de suelo para cada maceta se prepararon individualmente de la siguiente manera:

Consistieron en 5 Kg. de suelo seco, previamente tamizado (figura 8) y luego puesto en bolsas plásticas, tratado con 0, 50, 100, 150, 200, 225 y 250 Kg. /ha equivalentes en fosfato diamónico (18 – 46 – 0) y aplicados como ácido fosfórico ( $\text{PO}_4\text{H}_2$ ) en forma líquida, en el suelo y posteriormente homogeneizado y llevado a capacidad de campo. Los otros nutrientes esenciales para las plantas fueron agregados en solución y mezclados con el resto de la muestra. Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Se sembraron 12 semillas de trigo “BUCK Guapo” con un Poder germinativo del 99 %.



**Figura 6.** Tamizado de las muestras para lograr un suelo homogéneo donde se desarrolle el sistema radicular, sin impedancias.



**Figura 7.** Regado post-siembra.

Por un período de 60 días en invernáculo a 29° C aproximadamente el cultivo se desarrolló en condiciones óptimas de crecimiento sin que ningún factor sea limitante. Las macetas se regaron diariamente manteniendo el contenido de humedad del suelo entre CC y PMP.

En la cosecha se cortaron las partes aéreas a 0.5 cm. por encima de la superficie del suelo y las raíces se lavaron con agua para desprender los restos adheridos de tierra.

En la figura 8 se puede apreciar el desarrollo fisiológico del cultivo durante la experiencia.

**(Figura 8).**



**Germinación 02-08-04**



**Germinación**



**17-08-04**



**17-08-04**



**23-08-04**



**23-08-04**



**23-08-04**



**03-09-04**



**03-09-04**



**29-09-04**



**29-09-04**



**29-09-04**

**Figura 8.** Desarrollo fisiológico y cronológico del cultivo hasta cosecha.

Las muestras frescas de la parte aérea y del sistema radical se secan en estufa a 68° C por 48 horas, luego se pesaran, y de esta forma se calculará la Producción Total o Rendimiento de Materia Seca tanto para la parte aérea como para la radical.

### **Determinación de Niveles Críticos y Capacidad Buffer**

Se procesaron los datos para definir las curvas de respuesta (determinación de MS en función de las dosis de P adicionado). Siendo la metodología utilizada para la interpretación de los datos la del modelo lineal discontinua, desarrollada por Cate y Nelson (1965), para lo cual se calculó el rendimiento relativo (RR), dividiendo el rendimiento obtenido con el nutrimento al mínimo nivel por el rendimiento máximo estable.

Los datos de RR y P del suelo se llevan a una gráfica para agrupar los mismos, utilizando el modelo de Cate y Nelson, se trazó una línea horizontal, paralela al eje de las X, la cual se encuentra en el 85% del rendimiento relativo, considerándose este valor para cultivos en invernáculo como adecuado para tomar en el punto de intersección con la curva de producción como nivel crítico de fósforo para la producción del cultivo.

Se evaluó la disponibilidad de P (utilizando el método Bray y Kurtz 1), en función de la dosis de fósforo adicionada para estimar la concentración de P que corresponde a cada dosis, esto es P adicionado en relación a P recuperado por la solución extractante (NH<sub>4</sub>F 0.03 N en una disolución de HCL 0.025 N). De la pendiente de esa curva surge la CB del suelo. (Raven y Hossner 1994).

### **Diseño experimental**

El diseño experimental fue completamente aleatorizados con 7 tratamientos y 3 repeticiones. La unidad experimental fue la maceta.

A los resultados obtenidos se les realizó un análisis de varianza y un test de comparación de media, para comprobar la validez estadística de los resultados. Esto se llevó a cabo con el software estadístico Infostat 2002.

## RESULTADOS

En la Tabla 3 se indican los resultados del test estadístico y separación de medias para dosis estudiadas.

**Tabla 3.** Test de diferenciación de medias, del rendimiento de materia seca con diferentes dosis de P para el cultivo de trigo.

**Test:LSD Fisher Alfa:=0.05 DMS:=0.44814**

*Error: 0.0655 gl: 14*

Dosis FDA	Medias	n			
0	2.36	3	A		
50	3.13	3		B	
225	3.19	3		B	
250	3.36	3		B	C
200	3.44	3		B	C
100	3.49	3		B	C
150	3.71	3			C

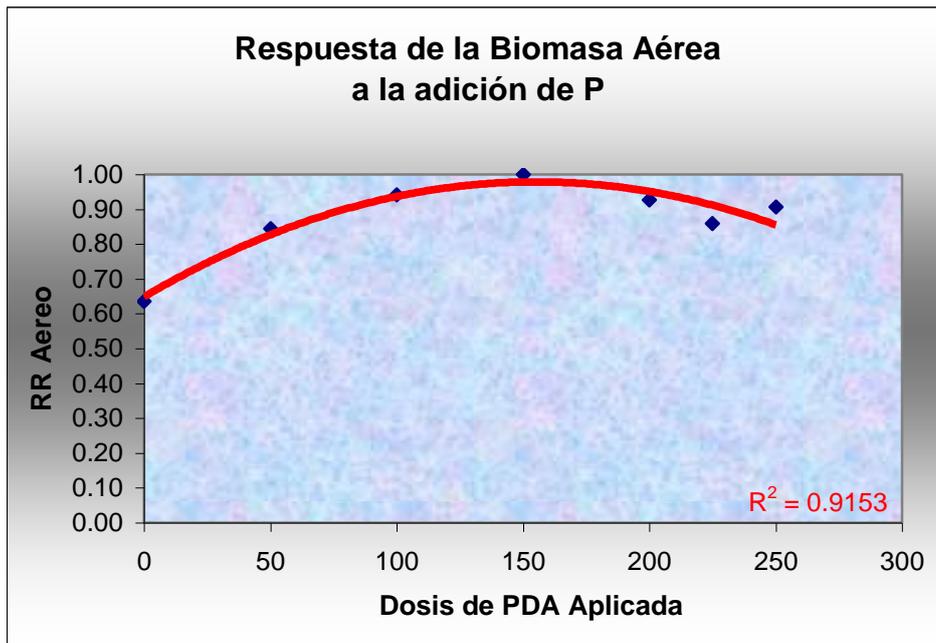
*Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )*

En la tabla 3 podemos observar diferencias significativas a través del test LSD Fisher en: El tratamiento 1 correspondiente a la dosis de 0 de FDA con el resto. También hay diferencia entre el tratamiento 2 y el 4 correspondiente a dosis de 50 y 150 kg. de FDA respectivamente. Y además se encuentran diferencias entre los tratamientos 4 y 6 correspondientes a 150 y 225 Kg. de FDA respectivamente.

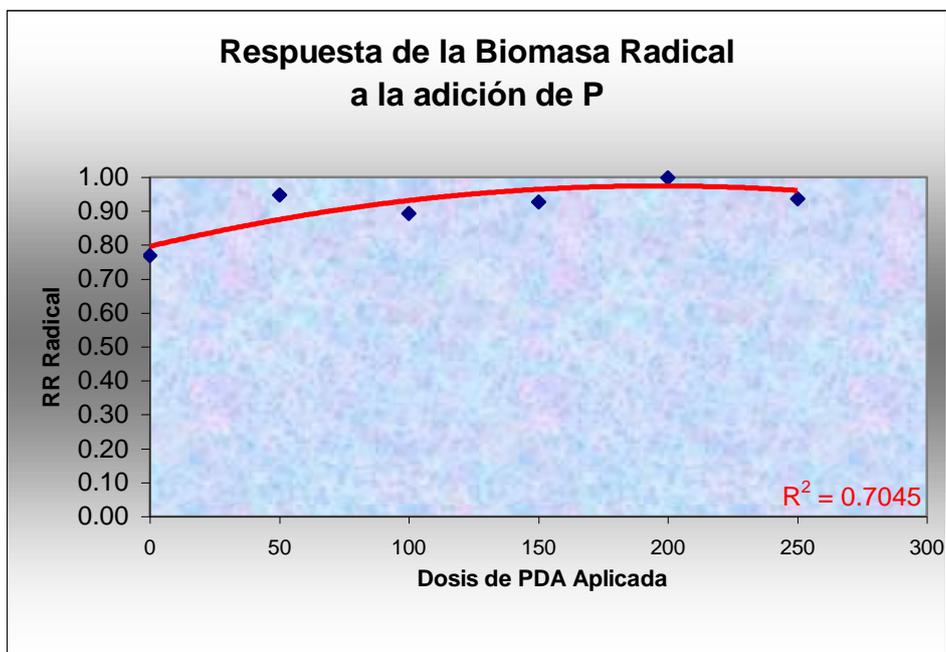
La validez estadística nos brinda seguridad para proponer un valor de nivel crítico a partir del cual se pueda determinar en un futuro las diferentes dosis a aplicar en fertilización fosfatada en producción de trigo.

(Ver Apéndice N° 1)

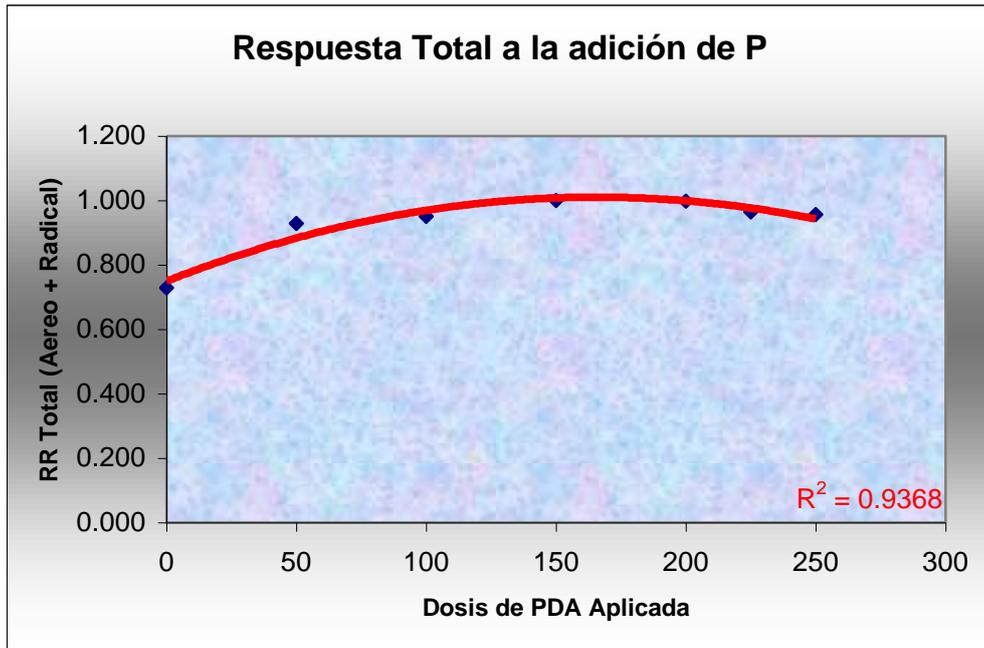
En los siguientes gráficos se indica la relación entre la respuesta a la biomasa aérea, biomasa radical, biomasa total ante la adición de fósforo.



**Gráfico 3.** Respuesta de la biomasa aérea (Rendimientos Relativos) a la adición de P.

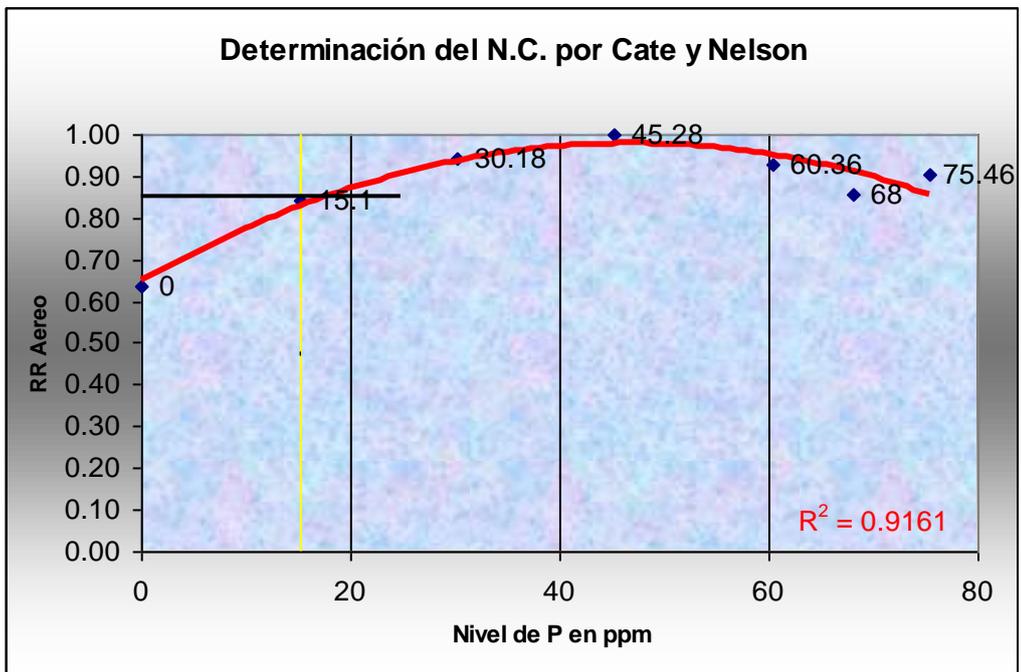


**Gráfico 4.** Respuesta de la biomasa radical (Rendimientos Relativos) a la adición de P.



**Gráfico 6.** Respuesta total (Biomasa Aérea + Radical) a la adición de P.

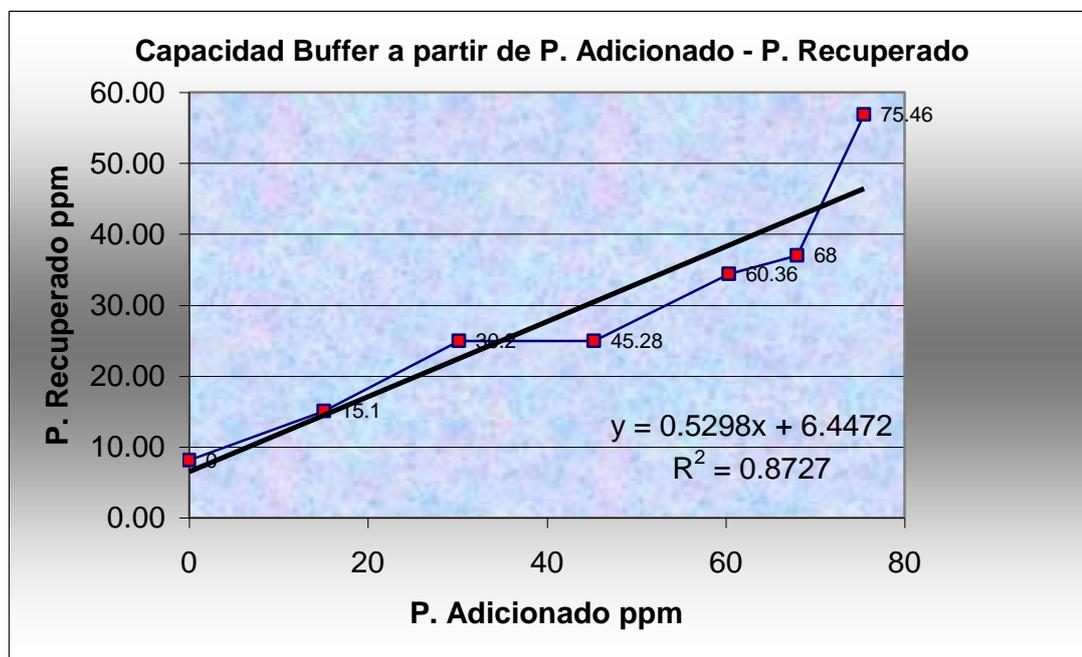
**Nivel Crítico de fósforo**



**Gráfico 7.** Determinación del NC utilizando el modelo de Cate y Nelson.

## Capacidad Buffer

A partir del valor de la pendiente de la recta dada por P Recuperado – P Adicionado; obtenemos el poder de amortiguación o capacidad Buffer del suelo.



**Gráfico 8.** Capacidad Buffer a partir de P. Adicionado – P. Recuperado.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

### DISCUSION

#### Biomasa aérea

Se observó que la producción de biomasa aérea fue aumentando a medida que aumentaba la dosis de P adicionado, lo cual explica una clara respuesta del cultivo en sus períodos fisiológicos iniciales al agregado de P. Como se observa en la gráfico 4 hay respuesta hasta el agregado de 69 Kg./ha. de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; equivalente a 150 kg./ha. de FDA.

Esto es coincidente con Díaz Zorita, *et al* (2002), donde encontraron mayor respuesta a la fertilización fosfatada con dosis menores a 70 Kg./ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Debemos tener en cuenta que, estos autores obtienen respuestas en suelos donde el nivel de fósforo Bray 1 es

de 8 ppm, siendo similares a el valor de análisis de nuestros Haplustoles donde se desarrolló la experiencia.

### **Biomasa radical**

En cuanto a la respuesta de la biomasa radical (gráfico 5), no se observa un valor determinado a partir del cual la respuesta del cultivo en rendimiento de materia seca produzca un quiebre significativo; pero si encontramos diferencias entre el testigo sin adición de P y el resto. De esta manera demostramos el efecto arrancador del P; coincidiendo con Berardo y Crattone 2004, en que la adición de P en períodos iniciales del desarrollo, la respuesta del cultivo es muy notoria contra el no agregado de P.

### **Nivel Crítico**

Observando el gráfico 7, utilizando el modelo de Cate y Nelson, se llegó a que el nivel crítico de P para trigo en un Haplustol típico es de 15 ppm.

Según Echeverría, *et al* (2003), proponen para la región pampeana que el rango del nivel crítico esta entre 13 – 14 ppm, al igual que Díaz Zorita y Duarte (1998). La información obtenida en esta experiencia no concuerda con estos autores, probablemente por haber trabajado con suelos Hapludoles de General Villegas. Se coincide con la información presentada por Berardo (1994), el cual determinó para el Subgrupo de Haplustoles típicos un rango crítico entre 15-16 ppm de P extractable según el método de Bray 1.

### **Capacidad Buffer**

A partir del gráfico 8, que muestra la relación de P Adicionado – P recuperado, desde la recta que forman estos puntos, obtenemos una función lineal, siendo la pendiente de la misma la capacidad buffer del suelo.

La función que se obtuvo es  $Y = 0.5298X + 6.4472$  con un  $R^2 = 0.8727$ .

Por lo tanto la capacidad buffer obtenida es de 0.5298 (adimensional); en este caso no coincidiendo con Bernardo (2005), que llegó al valor de 1,28219 para un suelo representativo de la UNRC.

Este valor es de suma importancia ya que al momento de determinar una dosis de fertilización, se debe tener en cuenta el P que queda retenido en el suelo, y no va a ser tomado por el vegetal, por lo tanto no se traducirá en rendimiento.

Las experiencias realizadas por Boschetti y Quinteros (1998), proponen que la inversa de la pendiente de la recta dada por  $P \text{ Adicionado} - P \text{ Recuperado}$  ( $Y = 0.5298X + 6.4472$ ; para nuestro caso) expresa los kilos de fertilizante que se requieren para lograr un incremento en el fósforo disponible de una unidad, valor que podríamos denominar como Dosis Equivalente (DE). Indica cuanto aumenta en 1 ppm, un suelo ante el agregado de fertilizante en Kg. de P/ha. Esta pendiente o dosis equivalente, esta estrechamente relacionada con las características del suelo que hacen a su poder de fijación (contenido de arcillas, óxidos libres, etc.) o medidas del poder regulador (Capacidad buffer). Estos autores llegaron a una DE. de 3.2 kg. /ha de P, muy similar a esta experiencia que arrojó un resultado de 3.38 Kg. /ha.

### **Conclusión**

El nivel crítico de P para un Haplustol típico es de 15 ppm, observándose respuesta a la fertilización cuando los niveles de P se encuentran por debajo del mismo. En cuanto a la CB. del suelo es 0.5298 (adimensional), teniéndose en cuenta este valor como así también la DE. obtenida de 3.38 kg. /ha para proponer una correcta fertilización del cultivo.

### Aplicación directa de los resultados de esta experiencia

Finalizada esta experiencia y luego de haber llegado a los resultados obtenidos, surge un compromiso, para este autor, de realizar un sencilla demostración de cómo aplicar los resultados obtenidos en forma de ejemplo y conclusión.

#### Ejemplo:

En un cultivo de trigo de alta producción, en el cual los análisis de P Bray 1, nos da un valor de 9 ppm, y sabemos que el Nivel Crítico de P es de 15 ppm, teniendo en cuenta que la Dosis Equivalente es 3.38 Kg. /ha y la Capacidad Buffer del suelo a fertilizar es de 0.5298, se puede realizar una correcta recomendación de fertilización.

**NC – P de análisis** = ppm de P a reponer

$$15 - 9 = 6 \text{ ppm}$$

-----  
P a reponer \* DE = Dosis P

$$6 \text{ ppm} * 3.38 \text{ P Kg. /ha} = 20.28 \text{ P Kg. /ha}$$

-----  
Dosis 1 \* CB = Dosis P

$$20.28 \text{ P Kg. /ha} * 0.5298 = 38.27 \text{ P kg. /ha}$$

-----  
$$38.27 \text{ P a P}_2\text{O}_5 = 87.964 \text{ P}_2\text{O}_5$$

$$87.964 \text{ P}_2\text{O}_5 * 1.93 \text{ (a MAP); (fosfato Monoamónico)} = \mathbf{169.16 \text{ MAP Kg. /ha}}$$

Entonces, implantar un cultivo de trigo en un suelo que las condiciones iniciales son las planteadas anteriormente, y para que el Fósforo no sea un elemento limitante para la producción necesitamos aplicar a razón de 170 Kg. /ha de MAP (11-52-0) o 190 Kg. /ha de FDA (18-46-0) o SPT (0-46-0).

### Investigaciones futuras

Se considera conveniente continuar con estas experiencias, tratando de ver a la parcela de producción como un conjunto de ambientes diferentes, y que la suma de ellos componen el lote, por lo tanto realizar esta experiencia en forma de ensayo en los diferentes ambientes productivos del lote dará resultados diferentes y se deberá calibrar una curva para cada un de

ellos. Esta propuesta es muy interesante ya que con las nuevas tecnologías de Agricultura de Precisión y manejo de sitio específico, apuntamos a realizar una agricultura sustentable y utilizando el recurso tierra de la manera más eficiente y conservacionista posible, en un mundo que día a día demanda más materia prima para elaborar alimentos.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Alvarez, V.H.1982. Correlación y calibración de métodos de análisis de suelos. Soc. Brasileña de ciencias del suelo. Universidad Federal de Viçosa.
- Andrade, 1994. Bases ecofisiológicas para el manejo del cultivo de trigo.
- Berardo, A. y Grattone F. 1998. Efecto de la aplicación de fósforo y de su residualidad sobre producción de trigo. Actas 4°. Congreso Nacional de trigo. Mar del Plata.
- Berardo A, Crattone, García F. 2004. Criterios para la fertilización fosfatada. Artículo, el sitio agrícola.
- Berardo A. y N. Darwich 1974. Fertilización del cultivo de trigo en el sudeste bonaerense. Boletín técnico N° 76. EEA INTA Balcarce.
- Berardo A., C. Navarro y H. Echeverría. 1980.Relación del contenido de fósforo disponible en el suelo y de nitratos en plantas con respuesta a la fertilización fosfatada y nitrogenada en trigo. Actas IX Reunión Argentina de la Ciencia del suelo.
- Berardo, A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo de trigo en el área de influencia de la estación experimental INTA-Balcarce. Boletín Técnico N° 128 EEA-INTA Balcarce.
- Bernardo I. 2005. Uso de cinéticas acopladas en el estudio de absorción simultanea de P y N por maíz. Maestría en manejo y recuperación de tierras. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Bray y Kurtz 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.
- Boschetti G., Quinteros C. 1998. ¿Cuanto fósforo aplico? Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER. Proyecto Fertilizar
- Castellarán J. Et Al. 2004 Bacterias solubilizadoras de fósforo, efecto en el rendimiento del cultivo de trigo. Campaña 2004, Trigo, INTA.
- Cate, R.B. Jr. and L.A. Nelson. A rapid method for correction of soil test analysis with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Sta. International Soil Testing Series. Tech. Bull. No. 1. 1965.
- Díaz Zorita M.; Melgar G. y García F. Propuesta de fertilización para la región pampeana. Red de ensayos proyecto Fertilizar. Campaña 2001-2002. Fertilizar
- Díaz Zorita M. y Duarte G. 1998. Avances para el diagnóstico y manejo de la fertilización de trigo en el oeste bonaerense. Curso de Actualización para profesionales en fertilización de pasturas y cereales de invierno. EEA INTA Gral. Villegas.

- Echeverría H. Y F. García 1998. Guía para fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín técnico N° 149. EEA INTA. Balcarce. Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría H. García F. y Melgar R. 2003. Respuesta a la fertilización en la región pampeana secuencia trigo – soja. Red Soja. Fertilizar.
- Ferraris G.; Salvagiotti F.; Prystupa P. y Gutierrez Boem. 2004. Disponibilidad de azufre y respuesta de la soja de primera a la fertilización. Actas CD XIX Congreso Argentino de la ciencia del suelo. Paraná, Entre Ríos. AACS. En García F. 2004. Criterios para el manejo de a fertilización del cultivo. INPOFOS Cono Sur.
- García, F. O. 1997. Manejo de la fertilización fosfatada. Unidad Integrada INTA Facultad de Ciencias Agrarias.
- García F. O. 2003. Balance de fósforo en los suelos de la región pampeana. INPOFOS Cono Sur. [www.inpofos.org.ar](http://www.inpofos.org.ar)
- Guía 2002. Fertilizantes enmiendas y productos nutricionales. Proyecto Fertilizar. INTA.
- Infostat 2002 Versión 1.1 Grupo InfoStat FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Melgar R. ; Camozzi ME y Figueroa M.M. 2002. Guía de fertilizantes enmiendas y productos nutricionales 2002. INTA. Pergamino.
- Munns, D.N., and R.L. Fox. 1976. The slow reaction which continues after phosphate adsorption: Kinetics and equilibrium in some tropical soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 40:46-51.
- Mills, H.A. y Jones, J.B. 1996. Plant Analysis Handbook II.
- Quinteros C.1999, Dosificación del fósforo según el tipo de suelo. Facultad de Ciencias Agrarias de Entre Ríos. Entre Ríos.
- Raven, K.P. y Hossner, L.R. 1994. Soil phosphorus desorption kinetics and its relationship with plant growth. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol 58.
- Raven, K.P. y Hossner, L.R. 1994. Sorption and desorption Quantity-Intensity Parameters related to plant-available soil phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol 58.
- Richards L. A. 1965. Physical Condition of water in soil. In BLACK, C.A. Methods of Soil Analysis. Part 1. 128-137. American Society of Agronomy, Wisconsin, USA 1965.
- Ron M.M. y T Loewy. 1990. Fertilización fosfórica del trigo en el sudoeste bonaerense. Ciencias del suelo.
- Ron M.M. 2003. Calibración de de análisis se suelos. INPOFOS. N° 17. Marzo 2003.
- Senigagliaesi C. R. García, S Meira, M.L. Galetto y E. Frutos. 1983. Fertilización del cultivo de trigo en el Norte de la provincia de Buenos Aires y Sur de Santa Fe. Boletín técnico N° 191. EEA INTA Pergamino.

- Sims, J.T. 1999. Soil fertility evaluation. pp. D113-D153. *In* M.E. Sumner (Ed.) Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Stauffer M. D. y Sulewski G. 2003. Un nutriente esencial para la vida. Simposio “ El fósforo en la Agricultura Argentina”. INPOFOS Cono Sur. Rosario.
- Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and interpreting Soil Surveys. 1999. Second Edition. United States. Department of agriculture Natural Resources Conservation Service. Agriculture Handbook. Number 436. USASUMNER M.E.(1981).
- Sumner, M.E. 1981. Diagnosing the sulfur requirements of corn and wheat using foliar analysis. Soil Sci. Soc.
- Vázquez, 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. Simposio “Enfoque sistémico de la fertilización fosfórica” XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pto. Madryn.

## APENDICE N° 1

### Análisis estadísticos

#### Diseño experimental

El diseño experimental fue completamente aleatorizados con 7 tratamientos y 3 repeticiones.

La unidad experimental fue la maceta.

#### Modelo utilizado

Modelo estadístico de diseño simple al azar.

Modelo lineal =  $Y_{ij} = U + \alpha_i + E_{ij}$

U= Media del rendimiento de materia seca del tratamiento.

$\alpha$ = Efecto de la adición de fósforo para esa unidad experimental.

$E_{ij}$ = Error experimental o residuo

#### Hipótesis estadística

$H_0 = U_1 = U_2 = U_3 = U_4 \dots U_7$

$H_a = U_1 \neq U_2 \neq U_3 \dots U_7$

#### Hipótesis Científica

$H_c$  = Hay diferencia en la producción de materia verde aérea, con las distintas adiciones de fósforo.

Las **Unidad experimental** es la maceta.

### Análisis de Resultados

#### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Rendimiento	21	0.79	0.70	7.90

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.41	6	0.57	8.69	0.0005
Dosis FDA	3.41	6	0.57	8.69	0.0005 **
Error	0.92	14	0.07		
Total	4.33	20			

#### Conclusión:

Se rechaza la hipótesis nula, ya que el P-valor es menor a 0.05 y además se puede decir que las diferencias son altamente significativas ya que el P-valor es menor a 0.01

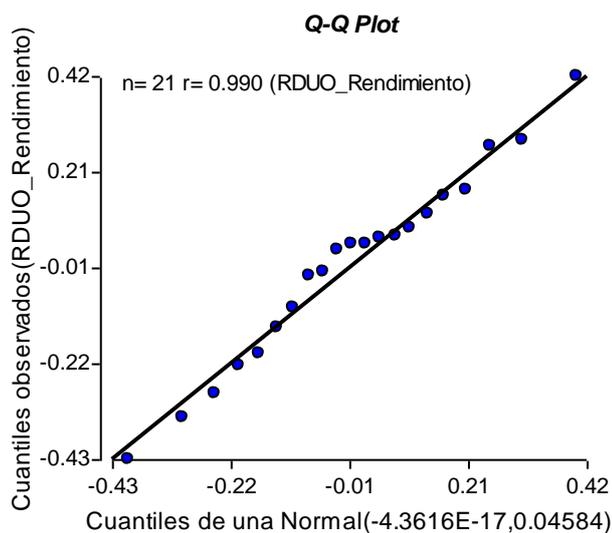
## Comprobación de supuestos

### Prueba de normalidad

**Ho:** El error tiene distribución normal

#### Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (una cola)	
RDUO Rendimiento	21	0.00	0.21	0.21	0.97	0.8615



### **Conclusión**

Se acepta la Ho, de que la distribución es normal.

Según el gráfico y su valor de r (0.99), el modelo matemático utilizado se ajusta a los datos, y si observamos en el valor del p del test de normalidad, llegamos a la misma conclusión.

### Prueba de homogeneidad de varianza

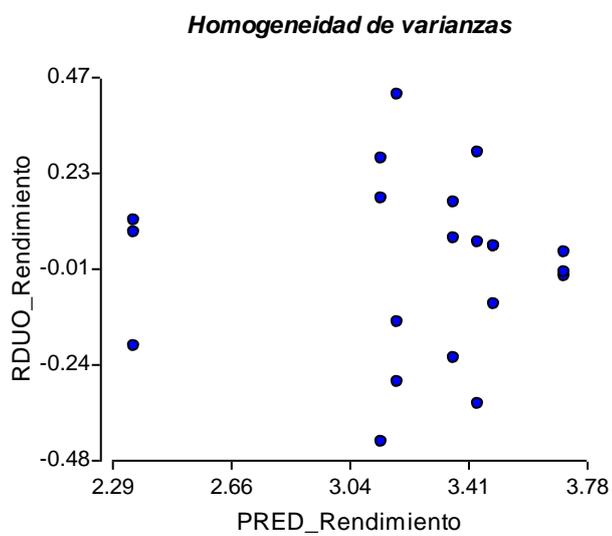
Ho: La varianza de los errores es homogénea

#### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV	
RABS Rendimiento	21	0.58	0.40	60.51	

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.19	6	0.03	3.19	0.0346
Dosis FDA	0.19	6	0.03	3.19	0.0346
Error	0.14	14	0.01		
Total	0.34	20			



ogénea, teniendo en cuenta un valor  
 ignificativas. Hay que tener en  
**Una vez verificados los supuestos,**  
**is datos.**