

Fertilización con fósforo por ambientes en trigo

F. Ross y L. Elgart¹

Introducción

El fósforo (P) es un nutriente deficiente en la mayoría de los suelos de la pampa húmeda argentina y su grado de limitación se intensifica hacia el este y al sur de la misma (Sainz Rozas et al., 2012). De acuerdo con estos datos, la región centro sur de la provincia de Buenos Aires presenta deficiencias de este elemento vital para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. El nivel de deficiencia de P determinado por el método P Bray-I es variable entre lotes o establecimientos agropecuarios y, en la mayoría de los casos, es función de la historia de fertilización con este elemento. En su condición prístina, los suelos del sur bonaerense se encuentran en el rango de 6 a 11 mg kg⁻¹ de P Bray-I. Estos niveles de P resultan limitantes y afectarían la productividad de la región, con mayor intensidad en los cultivos de estación invierno-primaveral (Hanway y Olson, 1980).

Los suelos de la región exhiben una alta variabilidad espacial en las propiedades edáficas que determinan el crecimiento de los cultivos. Entre las propiedades del suelo que limitan la productividad de los cultivos, podemos ubicar a la profundidad efectiva (PE) como la variable de mayor impacto. En el sur y sudeste de la provincia de Buenos Aires, los cambios en la PE del suelo están determinados principalmente por la presencia a profundidad variable de un horizonte calcáreo que da el nombre a los suelos "Argiudol Petrocalcico" y "Paleudol Petrocalcico". El principal efecto de esta capa es impedir el avance de las raíces en profundidad, limitando la cantidad de agua que puede almacenar el suelo capaz de ser aprovechada por el cultivo.

Además, la posición en el relieve afecta la productividad, la cual mayoritariamente se asocia con la PE del suelo. Estos factores determinan diferencias sustanciales en la capacidad de sostener el crecimiento vegetal; se manifiestan en la evolución del suelo por su contenido orgánico y se visualizan indirectamente en los mapas de rendimiento (Doerge, 1999). Otro factor que afecta la productividad espacial dentro del lote, aunque con menos frecuencia, es el cambio de tipo o serie de suelo con diferente aptitud agrícola, a veces producto del incremento del área agrícola sobre suelos netamente ganaderos. También, es frecuente la presencia de sectores denominados comúnmente "barro blanco", sitios pequeños con una intensa caída de la productividad, a veces numerosos y con distribución aleatoria en suelos denominados "pecosos u overos".

En el presente trabajo se planteó el objetivo de identificar el nivel de deficiencia de P para el cultivo

de trigo en función de la productividad y/o profundidad efectiva del suelo para establecimientos de la región sur de la provincia de Buenos Aires.

Materiales y métodos

En las campañas agrícolas 2010/11, 2011/12 y 2012/13 se realizaron 5 experimentos en lotes ubicados en el área de influencia de la EEAI INTA Barrow. Todos los experimentos se realizaron sobre la serie de suelos Tres Arroyos, con variaciones similares de profundidad de suelo y topografía.

Cada experimento fue realizado con un diseño en franjas con dos repeticiones por tratamiento (Dosis de P). Las dosis de P fueron 0 – 10 – 20 y 30 kg ha⁻¹. La ubicación de las franjas se realizó de manera de atravesar la mayor variabilidad en productividad del lote. La fuente de P utilizada fue fosfato diamónico (20% de P).

Se construyó un mapa de productividad con datos previos de mapas de rendimiento de granos de cultivos de invierno y de verano. Se calculó un índice de productividad (IP) originado desde los datos de rendimiento, estimado como el porcentual referido al promedio del lote (%). La medición de la profundidad del horizonte calcáreo se realizó con una varilla metálica graduada ("pinche" o calador), geo-referenciando cada muestreo con GPS. Se utilizó un muestreo en grilla con mediciones cada 15 m y a posteriori se realizó un mapa de PE. Para el análisis químico de suelo se tomaron muestras compuestas independientes a 0-20 cm para tres sitios con diferente índice de productividad: i) "Bajo Rendimiento" (promedio de 3990 kg ha⁻¹), ii) "Rendimiento Medio" (promedio de 4920 kg ha⁻¹), y iii) "Alto Rendimiento" (promedio de 5650 kg ha⁻¹).

La cosecha de las franjas se realizó con maquina equipada con monitor de rendimiento, cosechando y pesando individualmente cada franja con la balanza del carro monotolva. Los datos espaciales se asociaron mediante la extensión GeoProcessing del programa ArcView 3.2 para su posterior evaluación. El análisis estadístico de los

Tabla 1. Niveles promedio de materia orgánica y P Bray-I en zonas con diferente índice de productividad (IP, Bajo, Medio y Alto Rendimiento). Promedios de 5 experimentos. EEA INTA Barrow.

Ambiente	MO %	P Bray ppm
Bajo IP	4.4	7.8
Medio IP	4.6	8.8
Alto IP	5.2	11

¹ EEA INTA Barrow, Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: ross.fernando@inta.gov.ar

datos vinculados en el espacio se realizó con el paquete estadístico SAS, según un modelo de efectos mixtos "Proc mixed" donde se explica el rendimiento a partir de la dosis de P, el índice de ambiente y su interacción. Luego, para exhibir la tendencia de los datos se realizó un análisis de regresión múltiple utilizando los promedios de las variables de sitio y dosis de P.

Resultados y discusión

Los sitios de bajo IP resultaron ser los sitios con menor materia orgánica (MO) (Tabla 1). Coincidiendo con Doerge (1999), a medida que se incrementó la MO también se incrementó el IP. El nivel de P extractable para los cultivos (P Bray-I), en promedio, resultó mayor para los sitios de mayor índice de productividad, aunque en algunos lotes los valores de P no se asociaron con el índice de productividad.

Al asociar el rendimiento del cultivo de trigo con los mapas de profundidad de suelo (PE) de cada lote se encontró una asociación positiva, a mayor PE mayor rendimiento. En términos generales, la profundidad media del suelo en las zonas de Bajo Rendimiento fue de 40 cm (de 25 a 55 cm), las zonas con Medio Rendimiento tuvieron una profundidad efectiva media de 70 cm (de 55 a 85 cm) y las zonas de Alto Rendimiento tuvieron una profundidad mayor a 90 cm (Figura 1). Sin embargo, esta condición no resultó estricta, variando en función de las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo. En general, si las lluvias son mayores a la media de la localidad la zona de Alto Rendimiento es mayor, a expensas de la de Medio Rendimiento y, a su vez, la zona de los sitios de Medio Rendimiento avanza sobre la de Bajo Rendimiento, condición que se invierte cuando las precipitaciones durante el ciclo son marcadamente insuficientes. Para un cultivo bien provisto de humedad durante el ciclo, la respuesta a la fertilización puede ser máxima en sitios someros (Ross y Pugliese, 2014). Es decir, que el IP es función primaria de la capacidad de proveer agua al cultivo y tiene un fuerte componente espacial ($p < 0.001$) que puede ser modificado por otro componente temporal ($p = 0.009$). Si eliminamos la deficiencia hídrica, los sitios someros se convierten en los sitios de mayor respuesta potencial a la nutrición producto de su menor carga de nutrientes (Tabla 1).

La fertilización con P produjo efectos significativos sobre el rendimiento del cultivo de trigo (Figura 1). En promedio para los cinco experimentos, la respuesta al agregado de P resultó mayor cuanto mayor fue el IP (Figura 2). La zona de menor IP no tuvo una respuesta consistente a la aplicación de P (Figura 2), se observó que la dosis de 20 kg ha⁻¹ de P logró el mayor incremento en promedio, aunque en algunos lotes la respuesta máxima se obtuvo con 10 kg ha⁻¹ de P. Debemos considerar que históricamente el manejo de la nutrición en los establecimientos evaluados se realizó en forma uniforme y, por ende, la zona de menor IP tendría el mejor balance de P, al extraerse menor cantidad de P en los granos.

En la mayoría de los experimentos realizados, la respuesta a la aplicación de P en las zonas de Medio y Alto rendimiento resultó similar. En promedio, se observó un incremento decreciente del rendimiento del cultivo en el rango de 0 a 20 kg P ha⁻¹, con mayor respuesta en la zona de mayor IP (Figura 2). No obstante, el 40% de los experimentos manifestaron una reducción significativa del rendimiento de trigo al incrementar la dosis de 20 a 30 kg P ha⁻¹ (Figuras 1 y 2). Esto puede resultar inconsistente o inesperado, máximo si consideramos que también ocurrió en el ambiente de mayor productividad. En experimentos previos de nutrición nitrogenada se observó una reducción en el rendimiento de cebada y trigo por la adición de nitrógeno en exceso respecto al óptimo (Ross et al., 2009; Ross et al., 2011; Ross y Pugliese, 2014). Esta respuesta es característica de lugares con bajas precipitaciones, alta temperatura y demanda hídrica durante el llenado (e.g. Australia). Suponiendo que el

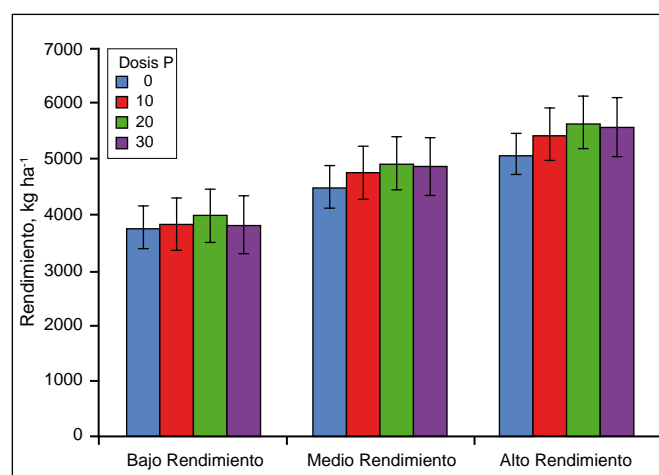


Figura 1. Rendimientos promedio de 5 experimentos del cultivo de trigo (kg ha⁻¹) en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio y Alto Rendimiento) para distintas dosis de P. La barra superior representa el error estándar. EEA INTA Barrow.

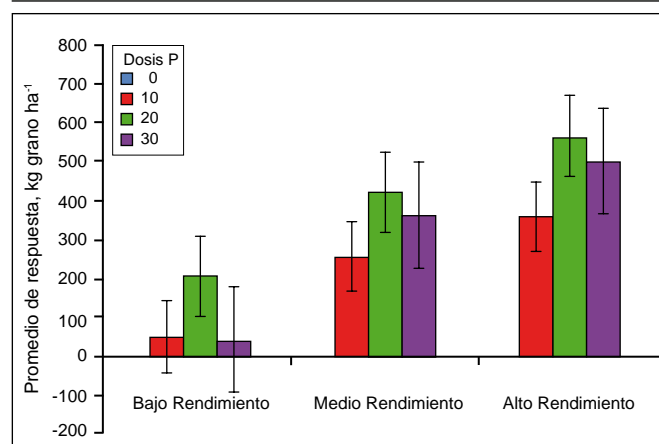


Figura 2. Respuesta, promedio de 5 experimentos, a la aplicación de fósforo (kg P ha⁻¹) en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio y Alto Rendimiento) para distintas dosis de P aplicada (0-10-20 o 30 kg P ha⁻¹). Las barras negras representan el error estándar. EEA INTA Barrow.

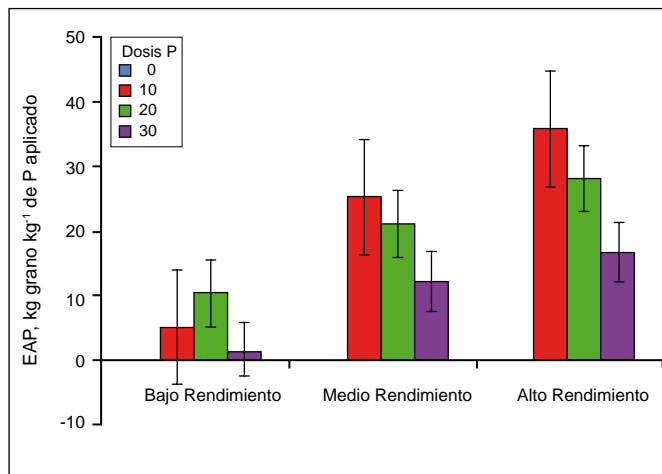


Figura 3. Eficiencia de uso del P del fertilizante (EAP, kg grano kg⁻¹ de P aplicado) en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio o Alto Rendimiento) para distintas dosis de P (0-10-20 o 30 kg P ha⁻¹). El rango superior representa el error estándar. Promedio de 5 experimentos. EEA INTA Barrow.

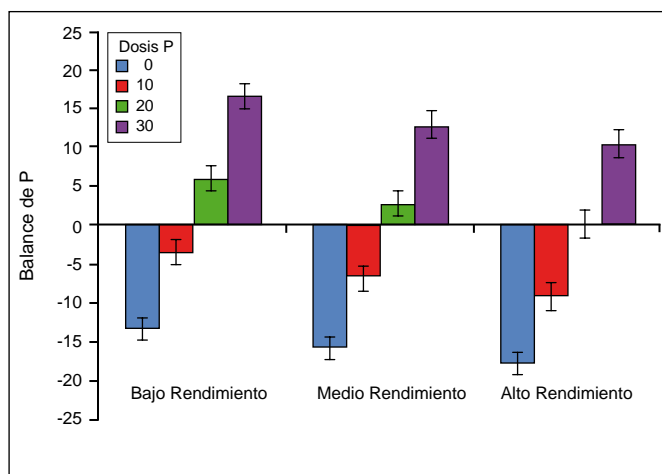


Figura 4. Balance de P en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio y Alto Rendimiento) para distintas dosis de P (0-10-20 o 30 kg P ha⁻¹). Las barras verticales representan el error estándar. Promedio de 5 experimentos. EEA INTA Barrow.

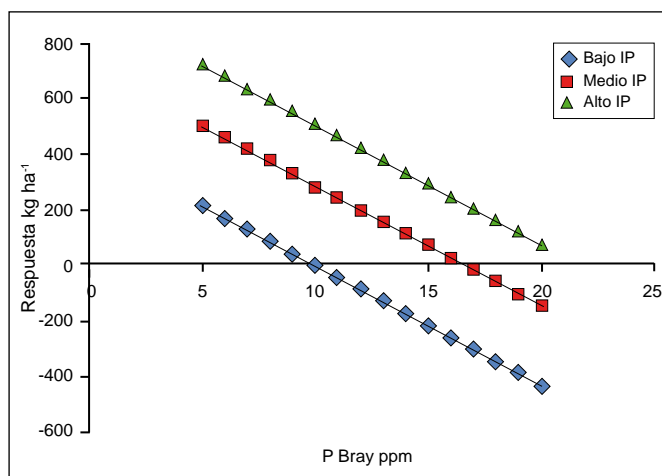


Figura 5. Respuesta esperable a la fertilización con 15 kg P ha⁻¹ en función del Índice de Productividad (Bajo IP: 3990 kg ha⁻¹, Medio IP: 4900 kg ha⁻¹ y Alto IP: 5650 kg ha⁻¹) y del nivel de P Bray (ppm).

efecto observado en nuestro estudio con la dosis más alta de P haya sido análogo al producido por exceso de N (Ross et al., 2009; Ross et al., 2011; Ross y Pugliese, 2014), podríamos especular que en la primera parte del ciclo, carente de estrés, el cultivo desarrolla biomasa y follaje de forma lineal a la cantidad de nutriente aplicado, elevando la demanda de agua del cultivo, que, durante el período de llenado de granos se va a potenciar por las condiciones atmosféricas de mayor temperatura, radiación y menor humedad relativa, lo cual predispone al estrés y arrebato. Cultivos como la cebada serían más eficientes, producto de que en nuestra región generalmente su ciclo se anticipa a las condiciones atmosféricas de arrebato.

Con respecto a la eficiencia agronómica de uso del P del fertilizante (EAP, kg de respuesta en rendimiento por kg P aplicado), esta se incrementó desde los ambientes de menor IP a los de mayor IP y resultó mayor cuanto menor fue la dosis de P (**Figura 3**). Estos resultados concuerdan con los generalmente reportados en estudios de fertilización fosfatada.

Si consideramos un contenido medio de P en grano de 0.352% (base seca), utilizando los niveles de rendimiento y dosis de P aplicada podemos calcular los balances de P para cada ambiente (**Figura 4**). En las zonas de mayor IP, la dosis de 20 kg P ha⁻¹ tuvo la mejor respuesta (560 kg ha⁻¹ de trigo) y arrojó un balance neutro (**Figura 4**). A diferencia de lo que ocurre en el ambiente de alta productividad, las **Figuras 2 y 3** nos muestran que a medida que descendemos en IP se reduce la respuesta y la eficiencia, y esto reduce la dosis de P necesaria para mantener el balance neutral.

Para los ensayos realizados se ajustó la siguiente ecuación de predicción de la respuesta a P (**Ecuación 1**), que permite varias interpretaciones agronómicas:

$$\text{Respuesta (kg ha}^{-1}\text{)} = -875 + 0.31 \times \text{IP (kg ha}^{-1}\text{)} + 4 \times \text{Dosis de P (kg P ha}^{-1}\text{)} - 42.3 \times \text{P Bray (mg kg}^{-1}\text{)} \quad (R^2=0.74) \quad \text{Ec. 1.}$$

El nivel de respuesta a la aplicación de P resultó ser función del nivel de rendimiento de trigo, expresado en la ecuación 1 como IP, la dosis de P aplicada y el nivel de P Bray. Según la **Ecuación 1**, podemos considerar que los sitios con un IP bajo, donde la PE media fue de 40 cm y el trigo tuvo un rendimiento promedio de 3990 kg ha⁻¹, el nivel de P Bray necesario para no tener respuesta a la fertilización con P es de 9 mg kg⁻¹. Al pasar al sitio de IP intermedio, caracterizado por una PE media de 70 cm y un rendimiento de 4900 kg ha⁻¹, el nivel de P Bray crítico, por debajo del cual la probabilidad de respuesta es baja, es 15 mg kg⁻¹. Para los sitios con poca limitación en la PE del suelo con rendimiento medio de 5650 kg ha⁻¹ de trigo, el nivel mínimo donde no hay respuesta a la fertilización con P es 20 mg kg⁻¹. Además, con la ecuación 1 podemos calcular curvas de respuesta probable a la fertilización con P en función de la dosis, del ambiente y del nivel de P Bray (**Figura 5**).

Estos niveles son coherentes y resultan similares a los de la bibliografía. En los extremos encontramos que, el valor de P crítico determinado para ambientes de baja productividad (Sudoeste de Buenos Aires) por Ron y Loewy (1996) fue de 8 mg kg⁻¹ y resulta similar al valor crítico obtenido en este trabajo para las zonas de bajo IP (9 mg kg⁻¹). Por otro lado, el valor de P crítico determinado para ambientes de alta productividad (Sudeste de Buenos Aires) por Berardo et al. (1999), fue de 20 mg kg⁻¹, similar al valor determinado para las zonas de alto IP en nuestro trabajo.

Consideraciones finales

La fertilización con P es una necesidad para sostener el crecimiento adecuado de los cultivos. La ambientación y el manejo de la agricultura por IP elaborados a partir de mapas de rendimiento en trigo permitirían ajustar el balance de P según requerimientos específicos de cada zona homogénea. Sin embargo, la ambientación por mapas de rendimiento o de índice verde es un inicio al que debemos incorporar información concreta y específica para el manejo del cultivo. Es necesario reconocer las variables que determinan cada ambiente (profundidad efectiva, presencia y profundidad de napa, serie de suelo, relieve, pendiente, MO, P Bray, etc.) para luego ajustar las tecnologías de manejo e insumos por cultivo.

Agradecimientos

A los integrantes del Grupo Regional de Agricultura de Precisión (GRADEP, <http://www.gradep.com.ar/>)

Bibliografía

- Berardo, A., F. Grattone, y G. Borrajo. 1999. Fertilización fosfatada en trigo: respuesta y formas de aplicación. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 2:1-3.
- Doerge, T.A. 1999. Management zone concepts. En: *Information Agriculture Conference*, August 9-11, 1999, Steward Center, Purdue, IN.
- Hanway, J., y R. Olson. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans and small grains. En: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Khasawneh, F.E., Sample, E.C., y Kamprath, E.J. eds. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.
- Ron, M., y T. Loewy. 1996. Recomendaciones de fertilización fosfórica en trigo en suelos del sudoeste bonaerense (Argentina) *Ciencia del Suelo* 14(1):16-19.
- Ross, F., J. Massigoge, y M. Zamora. 2009. Efecto ambiental y respuesta a la fertilización nitrogenada en cebada cervecera, cv Scarlett. *IPNI, Informaciones Agronómicas* 42:5-10.
- Ross, F., J. Massigoge, y M. Zamora. 2011. Fertilización de cebada cervecera en ambientes con tosca en el sur de Buenos Aires, Argentina. *IPNI, Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 2:9-13.
- Ross, F., y G. Pugliese. 2014. Ensayos de fertilización en cosecha fina, campaña. *Actualización técnica en cultivos de cosecha fina 2013/14 EEA Barrow*. pp. 84-86.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias* 38:33-39. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86423614007>. ❖



Vista general de uno de los sitios de ensayo.