



ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN CON FOSFORO POR ZONAS DE MANEJO EN MAICES TARDIOS

Naville, R.^{1*}; Cerliani, C.¹; Balboa, G.¹; Martínez Bologna, G.¹; Espósito, G.¹

¹ Fac. Agronomía y Veterinaria, Univ. Nac. de Río Cuarto

* rafael_naville@hotmail.com; Colon 956 (5800) Río Cuarto (Cba); 358-4021968

INTRODUCCIÓN

La región Pampeana Argentina ha sufrido un progresivo deterioro en la fertilidad de sus suelos a lo largo de su historia agrícola. Para los rendimientos obtenidos, la extracción realizada por los cultivos de grano, arrojan un balance de nutrientes en términos físicos y económicos negativo (García, 2000).

Este resultado adquiere singular importancia en el caso del fósforo (P), ya que prácticamente la fertilización es su única vía de entrada al sistema (Vázquez, 2002). Adicionalmente, es un nutriente de elevada residualidad (Berardo, 2003), y baja eficiencia de recuperación cuando es agregado vía fertilización (Gutiérrez Boem *et al.*, 2002).

Los suelos de la región Pampeana, presentan diferencias marcadas en cuanto a sus propiedades físicas y químicas (Alesso *et al.*, 2012). Por esta razón, se considera que para ser eficientes en el manejo de los recursos y producir a gran escala, es necesario caracterizar ambientes dentro de un lote o un establecimiento. La Agricultura de precisión (AP) contribuye de diversas maneras a dicha eficiencia y a la sustentabilidad de la agricultura (Bongiovanni, 2001).

La fertilización con dosis variables de N es una de las aplicaciones que más ha despertado interés a nivel productivo, comercial y de investigación. Por el contrario, la aplicación de P tradicionalmente se realiza con una dosis única y uniforme en todo el lote. Considerando la alta variabilidad de P que se puede encontrar en la mayoría de los suelos agrícolas, las aplicaciones uniformes pueden tender a sobre-fertilizar algunas áreas y sub-fertilizar otras (Bermudez, 2011).

En la actualidad existen diversos trabajos de la respuesta del cultivo de maíz a fertilización fosforada a escala de lote (Andrade *et al.*, 1996; Fontanetto, 1993, García *et al.*, 1997; Melgar y Caamaño, 1997; Gutiérrez Boem *et al.*, 2010; Ferraris *et al.*, 2008) pero es escasa la información disponible a escala sitio específico. Por otro lado considerando el creciente interés en técnicas de manejo de cultivo para “maíces tardíos”, es necesario incrementar los estudios de respuesta al P en siembras tardías (Bert & Satorre, 2012).

Finalmente, debido a la importancia de generar información actualizada sobre el cultivo de maíz en la región de Río Cuarto, se plantea esta línea de estudio con el objetivo de evaluar la respuesta del maíz tardío a la aplicación de fósforo en distintos momentos y por zonas de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos experimentos en la campaña 2012-13, uno se ubicó en cercanías de la localidad de Chaján (Córdoba) sobre un lote con relieve plano; el otro se condujo en cercanías de la localidad de Cuatro Vientos (Córdoba) sobre un lote con relieve ondulado.

El cultivo de maíz, se implantó sobre un cultivo antecesor de soja, bajo siembra directa con surcos distanciados a 0,525m, dicha siembra se realizó a mediados del mes de diciembre en seco. Los cultivos se mantuvieron libre de plagas, malezas y enfermedades.

El diseño experimental fue realizado en parcelas divididas, en el cual el factor principal fue el voleo anticipado de P, (0 y 30 kg ha⁻¹ P), y el factor secundario fue la dosis de P a la siembra (0,16, 32 y 48 Kg ha⁻¹). Cada tratamiento se dispuso, cruzando zonas de manejo, de 8,4 metros de ancho por 720 metros de largo.

Todos los tratamientos fueron refertilizados con 50 kg ha⁻¹ de N en el estadio V6 (Ritchie & Hanway, 1982).

De acuerdo a lo propuesto por Inman *et al.* (2005) el ajuste de las dosis económicamente óptima puede ser determinado por zonas de manejo sectorizadas mediante análisis de la productividad espacial. Por ese motivo, se realizó una zonificación ambiental a nivel de lote en zonas de manejo (ZM), empleando para ello mapas de rendimiento de tres campañas anteriores. La zonificación se realizó empleando el programa de computación Management Zone Analyst (MZA, Mizzou-ARS, 2000).

En cada lote elegido para realizar el ensayo, se tomaron muestras de suelo, dirigidas en cada ZM. Los muestreos se realizaron previo a la siembra y a la cosecha del maíz, a las profundidades de 0-20 cm. En cada muestra se evaluó fósforo disponible (Bray y Kurtz, 1945) y zinc disponible (DTPA).

Las franjas se recolectaron con una cosechadora con monitor de rendimiento de cultivos y capacidad de georeferenciación mediante GPS, con la cual se determinó el mapa de rendimiento de cada una de las franjas.

Posteriormente, estos mapas de rendimiento se procesaron mediante el programa Quantum Gis Wroclaw (Quantum GIS Development Team, 2011).

Finalmente, para el análisis estadístico del factor principal se realizó a través de un modelo que considera la variabilidad espacial mediante una función exponencial isotrópica, realizando la estimación de los parámetros por modelos lineales generales y mixtos. Y para el análisis estadístico del factor secundario se utilizó el modelo de Econometría Espacial, que considera la estructura espacial de los datos (autocorrelación espacial y heterocedasticidad) en los modelos de regresión (Anselin, 1999). El análisis de regresión se realizó con una aplicación especializada para el trabajo con datos espaciales georeferenciados llamado OpenGeoDa 0.9.8.8 (GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation, Arizona State University.).

El modelo denominado de error espacial autorregresivo (SAR), utiliza la metodología de máxima verosimilitud para la determinación de los campos de interés y parámetros estadísticos. Dicho modelo asume que la variable dependiente no está correlacionada por sí misma, sino que es el error de muestreo aleatorio el que está correlacionado. Matemáticamente se expresa según la Ecuación 1:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad [1]$$

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable rendimiento, X es la matriz de observaciones de las variables independientes (dosis de P y ZM), β es el vector de parámetros estimados, y ε es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación 2:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad [2]$$

donde μ es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación autoregresiva espacial (SAR) con un coeficiente autoregresivo λ (lambda), corregido también por la matriz de ponderadores espaciales (W).

La respuesta del maíz al P se modeló como un polinomio múltiple de segundo grado por cada ZM según la Ecuación 3:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 Pf + \beta_2 Pf^2 + \beta_3 ZM + \beta_4 Pf \times ZM + \beta_5 P^2 \times ZM + \varepsilon_{ij} \quad [3]$$

donde Y_{ij} es el rendimiento del maíz (kg ha^{-1}) por cada punto ij del monitor de rendimiento, β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, P es la dosis de fertilizante fosforado (kg ha^{-1}), ZM se refiere a las variables "dummy" para cada zona de manejo, y ε_{ij} es el término de error de la regresión por cada ubicación (Gregoret *et al.* 2011).

Para obtener en cada ZM la dosis óptima de P o la cantidad del nutriente necesario para alcanzar el máximo retorno económico a la fertilización con P (DOEP) (Dillon y Anderson, 1990) se utilizó la función de producción de maíz dependiente de P por ZM , a saber:

$$\pi = P_{\text{maiz}} (\beta_{0ZM} + \beta_{1ZM} Pf + \beta_{2ZM} Pf^2) - P_P - Pf \quad [4]$$

$$\pi_{\text{max}} = \frac{\delta \pi}{\delta P} = 0 \quad [5]$$

$$\pi_{\text{max}} = \frac{\delta \pi}{\delta P} = P_{\text{maiz}} (\beta_{1ZM} + 2\beta_{2ZM} Pf) - P_P = 0 \quad [6]$$

$$DOEP = \frac{\left(\frac{P_P}{P_{\text{maiz}}}\right) - \beta_{1ZM}}{2\beta_{2ZM}} \quad [7]$$

Donde, P_{maiz} es el precio del maíz a obtener por un productor agrícola de la zona de Río Cuarto al momento de cosecha según cotización de la Bolsa de Cereales de Rosario, estimado en 0,115 USD kg^{-1} , P_P es el precio en kg del P como fosfato diamónico puesto en campo según precio comercio de Río Cuarto, estimado en 3,19 USD kg^{-1} . DOEP es la dosis óptima económica por ZM de fósforo. La relación de precio entonces quedó establecida en 27,74.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la zonificación realizada se establecieron dos zonas de manejo claramente diferenciadas en ambos sitios experimentales, AP (Alta Producción) y BP (Baja Producción). El muestreo de suelos indicó que en Chaján el P extractable (0-20cm) fue de 7,35 y 11,25 mg kg^{-1} en AP y BP respectivamente, con un nivel medio de Zn de 0,2 mg kg^{-1} . En Cuatro Vientos el análisis de suelo indicó un P extractable de 9,35 y 5,90 mg kg^{-1} en AP y BP respectivamente, con un nivel medio de Zn de 0,8 mg kg^{-1} . Estos resultados indican que la disponibilidad de P es muy baja en ambos sitios y ZM , mientras que la de Zn es también muy baja principalmente en el sitio A (Chaján).

En la Tabla 1 se presentan los rendimientos obtenidos en los tratamientos voleados con P y sin volear.

Tabla 1. Rendimiento de maíz en Kg ha^{-1} según aplicación de P voleado en el invierno.

Voleado	Sitio A (Chaján)	Sitio B (Cuatro Viento)
0 Kg ha^{-1}	7004 a	6940 a
30 Kg ha^{-1}	7957 b	7856 b

En columnas medias con una letra común no son significativamente diferente ($p \leq 0,05$).

En ambos sitios experimentales se observó respuesta a la aplicación de P voleado, siendo el rendimiento un 13% superior con respecto a los tratamientos sin volear, en ambos sitios.

Por otro lado, al considerar la dosificación por zona de manejo no se encontraron diferencias significativas en la aplicación variable. Contrariamente, Roberts (2000) encontró diferencias significativas a la aplicación de fósforo por zonas de manejo en la región centro oeste de Estados Unidos.

En relación a la fertilización realizada al momento de la siembra con FDA, como fuente fosforada, se puede interpretar que los resultados difirieron entre sitios, no encontrándose efectos estadísticos de la zona de manejo en la función de producción asociada a la fertilización con P. En Cuatro Vientos (Sitio A) se destaca claramente que en el tratamiento sin voleo invernal la respuesta a la aplicación de FDA fue lineal y por lo tanto la dosis óptima agronómica (DOAP) fue aquella dosis máxima evaluada, es decir 240 kg ha^{-1} (Tabla 2) permitiendo obtener 7950 kg ha^{-1} de maíz. Por el contrario en el tratamiento con voleo invernal la DOAP fue de 146 kg ha^{-1} obtenida a partir de una función polinómica de segundo orden con todos sus parámetros estadísticamente significativos.

Por otro lado, la función de producción encontrada en el tratamiento sin voleo invernal del sitio B (Chaján) fue estadísticamente significativa pero de respuesta negativa a la adición de FDA al momento de la siembra, mientras que en el tratamiento con voleo invernal de P no se encontró efecto de la fertilización al momento de la siembra. Por este motivo en ambos casos la DOAP fue de 0 kg ha^{-1} .

Tabla 2, Dosis óptima agronómica de fósforo y rendimiento para dos sitios experimentales (Córdoba).

	Chaján		Cuatro Vientos	
	DOAP (kg ha^{-1})	Rto (kg ha^{-1})	DOAP (kg ha^{-1})	Rto (kg ha^{-1})
Sin volear	0	6976	240	7950
Voleado	0	7994	146	8130

DOAP: dosis óptima agronómica de fósforo. Rto, rendimiento en grano de maíz.

Estas diferencias encontradas entre sitios, podrían deberse al hecho de que en ambas situaciones el suelo presenta niveles de zinc, inferiores a los citados por Ratto (2006) como umbral crítico en maíz, $0,2$ y $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ para Chaján y Cuatro Vientos respectivamente y por lo tanto en Chaján la fertilización con fósforo incorporada al momento de la siembra usando FDA podría afectar más severamente la absorción del Zn por enriquecimiento del P soluble o mediante la reducción en el transporte a larga distancia dentro de la planta (Malavolta, 2006).

En relación al análisis económico de estas estrategias de fertilización se puede interpretar que para la relación de precios propuesta ($27,74$) el voleo de P durante el invierno tuvo un costo de $95,7 \text{ USD ha}^{-1}$. mientras que el incremento de rendimiento fue de 953 y 916 kg ha^{-1} por la aplicación de 30 kg ha^{-1} de P, lo cual representa un ingreso de $109,60$ y $105,34 \text{ USD ha}^{-1}$, representando con ello un retorno al P de $13,9$ y $9,54 \text{ USD ha}^{-1}$, para el sitio Chaján y Cuatro Vientos respectivamente. De este modo se considera que la fertilización al voleo de P fue un práctica conveniente económicamente.

Por otro lado, la DOEP como FDA aplicado incorporado al momento de la siembra, fue en Cuatro Vientos de 0 y $93,8 \text{ kg ha}^{-1}$, para el tratamiento sin volear y el voleado en invierno, respectivamente. Mientras que en Chaján para ambos caso fue de 0 kg ha^{-1} .

CONCLUSIÓN

Los datos experimentales permiten concluir que realizar voleos anticipados de fósforo es conveniente agronómica y económicamente, siendo a su vez independiente del nivel de zinc que presente el suelo al momento de la siembra. Mientras que la aplicación de fósforo incorporado por debajo y al costado de la línea de siembra como fosfato diamónico dependería del nivel de zinc del suelo, como consecuencia del antagonismo generado por este macronutriente sobre el micronutriente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, C; M. Pilatti; S Imhoff & M Grilli. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de La Pampa llana Santafesina. *Ciencia del suelo* vol.30 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires jul. 2012.
- Andrade, F; A Cirilo; S Uhart y M. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial La Barrosa-Dekalb Press. Buenos Aires, Argentina.
- Anselin, L. 1999. *Spatial Econometrics*. Staff paper. Bruton Center, School of Social Sciences, University of Texas at Dallas, Richardson. 31 pp.
- Berardo, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. En: Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". Inpofos Cono Sur, Rosario, Argentina. pp 38-44.
- Bermudez, M. 2011. Cómo llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio-específico de N y P. Simposio Fertilidad 2011. Rosario-Santa Fé, Argentina. p: 47-54
- Ferraris, G; F. Mousegne & colaboradores. 2008. Efecto aditivo del agregado de diferentes nutrientes en maíz en el norte, centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. En: IV Jornada de Maíz INTA EEA Pergamino-AIANBA. 14 pp.
- Bongiovanni, R. 2001. Agricultura de Precisión y Sustentabilidad. 7º Congreso Nacional del Maíz. Pergamino, Argentina.
- Bray R & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Dillon, J & J Anderson. 1990. *The analysis of response in crop and livestock production*. Pergamon Press, New York (EUA). p: 250.
- Ferraris, G; F Mousegne & colaboradores. 2008. Efecto aditivo del agregado de diferentes nutrientes en maíz en el norte, centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. En: IV Jornada de Maíz INTA EEA Pergamino-AIANBA. 14 pp.
- Fontanetto, H. 1993. Efecto del método de aplicación del fertilizante fosfórico en maíz a dos niveles de disponibilidad hídrica. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- García F; K Fabrizzi; M Rufo & P Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires. Argentina.
- García, F. 2000. Requerimientos nutricionales de los cultivos. Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000", INPOFOS, Rosario. pp 40-43
- Gregoret, MC; M Díaz Zorita; J Dardanelli; & R Bongiovanni. 2011. Regional model for site-specific corn nitrogen fertilization rainfed in Haplustolls of the central pampas, Argentina. *Precision Agriculture*. 12(6): 831-849.
- Gutiérrez Boem, F; J Scheiner; L Martín & R Lavado. 2002. Respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosforada y nitrogenada. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo: 16-19.
- Gutierrez Boem F, F Garcia & M Boxler. 2010 ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? En: Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Rosario, Santa Fe.
- Inman, DJ; R Khosla & DG Westfall. 2005. Nitrogen uptake across sitespecific management zones in irrigated corn production systems. *Agron. J.* 97:169–176
- Malavolta, E. 2006. Relación entre el fósforo y el zinc. *Informaciones Agropecuarias*. 63: 12-13. MIZZOU-ARS. 2000.
- Management Zone Analyst Version 1.0.1. University of Missouri Columbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture.
- Melgar, R & A Caamaño. 1997. Fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada. *Revista Agromercado*. Cuadernillo de Maíz. Año II N° 12, pp:14-15.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. 2011. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Ratto SE. 2006. Los microelementos en el sistema productivo del área pampeana. En: *Micronutrientes en la agricultura*. Ed. Vazquez M. AACCS.:79-112.
- Ritchie, SW & JJ Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Special Report 48. Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheered, I. and Coppin, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, part II: Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. and For. Met.*, 121: 37-53.
- Roberts, T. 2000. Manejo sitio-especifico de nutrientes: avances en aplicaciones con dosis variable. Seminario Taller Agricultura de Precisión en el Cono Sur. PROCISUR. Buenos Aires, Argentina
- Vázquez, M. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones agronómicas del Cono Sur*. Edición especial sobre el simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosforada", XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn- Chubut, Argentina. 16: 3-7.