

Variabilidad sitio-específico de respuestas de maíz y de soja a la fertilización con fósforo según fechas de siembra

Gonzalo Pérez^{1*} y Martín Díaz-Zorita²

- La práctica de agricultura de precisión busca delimitar zonas de manejo, y así adecuar el uso de insumos a cada unidad reconocida por su homogeneidad dentro de los lotes de producción.
- En Hapludoles de la región centro-oeste de Buenos Aires (Argentina), las zonas de manejo de alta productividad, tanto para maíz como para soja, se ubicaron en posiciones bajas en el paisaje y presentaron en promedio valores mayores de materia orgánica, conductividad eléctrica y valores menores de fósforo (P) extractable y de arena.
- En maíz, en zonas de baja productividad, el rendimiento estuvo asociado a las precipitaciones ocurridas durante el mes de febrero. En soja, las fechas tardías tuvieron rendimientos inferiores a las tempranas, independientemente de las zonas de manejo.

Introducción

Las variaciones en propiedades edáficas y del terreno son algunos de los factores a considerar en la zonificación de sitios según sus relaciones con la producción de los cultivos. Las variaciones dentro de los lotes pueden ser naturales (ejemplo, propiedades de suelos, topografía, etc.), aleatorias (ejemplo, precipitaciones) o de manejo (ejemplo, fertilización, densidad de siembra, etc.) (Hatfield et al., 2000). En Illinois e Indiana (EE.UU.), se observó que la combinación entre las propiedades de suelo y la topografía explican hasta un 40% de la variabilidad del rendimiento en cultivos de maíz y de soja (Kravchenko et al., 2000). La práctica de agricultura de precisión para el manejo de cultivos busca identificar sectores de producción con cualidades semejantes determinadas por factores topográficos y por características edáficas delimitando zonas de manejo, y así adecuar el uso de insumos a cada unidad reconocida por su homogeneidad dentro de los lotes de producción. Por lo tanto, es importante establecer las relaciones entre estos atributos de delimitación y los rendimientos de los cultivos para la eficiente aplicación de insumos en forma variable o con prácticas de manejo sitio-específicos. Se espera que la identificación de factores de sitio y de manejo que se relacionan con la respuesta de maíz y de soja al agregado de fósforo (P) mejore el manejo variable de la fertilización, independientemente del cultivo considerado. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta al agregado de P en maíz y soja, y su interacción con otras tecnologías tales como el manejo sitio-específico y la fecha de siembra de los cultivos.

Materiales y métodos

En las campañas 2013-14 y 2014-15, se condujeron 6 experimentos, en dos establecimientos del centro de la provincia de Buenos Aires (Argentina): "Don Domingo y Doña María Barnetche" (36° 08' 46" S, 61° 04' 26" O) y "Los Tambos" (36° 07' 52" S, 61° 30' 12" O), con manejo representativo de sistemas agrícolas de la región

subhúmeda pampeana. La distribución de suelos es Hapludol éntico – Hapludol típico, de posiciones más elevadas a más bajas en el relieve, respectivamente, en los lotes elegidos. En cada lote se delimitaron zonas de manejo (ZM) de alta (AP) y baja (BP) productividad mediante: fotointerpretación de imágenes satelitales de cultivos en campañas anteriores a las de este estudio y análisis de clúster del índice verde normalizado (NDVI) de imágenes satelitales de cultivos anteriores según la **Ecuación 1**:

$$NDVI = (RNIR - RR) / (RNIR + RR)^{-1} \quad \text{Ec. 1}$$

dónde NDVI es el índice verde normalizado, RNIR es la reflectancia en infrarrojo cercano (longitud de onda de 760-900 nm), y RR es la reflectancia en rojo visible (longitud de onda de 630-690 nm).

Se implantaron 6 lotes, 4 durante la campaña 2013-14 y 2 durante 2014-15. Dentro de cada lote y zona de manejo se establecieron los tratamientos descritos en la **Figura 1**. Las fechas de siembra tempranas fueron inicios de octubre (maíz) e inicio de noviembre (soja); las tardías fueron mediados de diciembre para ambos cultivos. Los tratamientos de fertilización fueron: testigo sin P

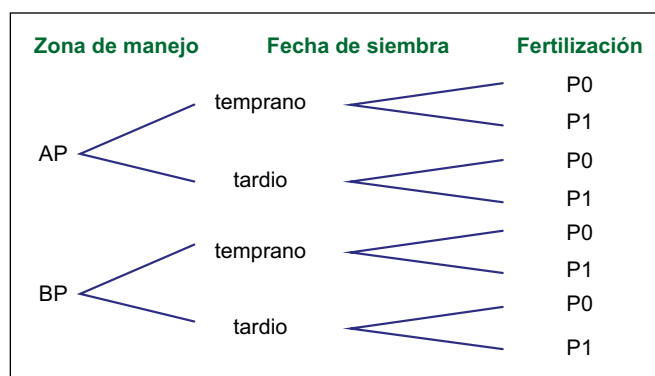


Figura 1. Esquema del ordenamiento en el análisis comparativo de los rendimientos de maíz y de soja. AP = Alta productividad aparente, BP = Baja productividad aparente.

¹ INTA Bolívar, Olascoaga 70, CP (6550) Bolívar, Buenos Aires, Argentina

² Monsanto BioAg

* Autor de contacto. Correo electrónico: perez.gonzalo@inta.gob.ar

Tabla 1. Análisis de los suelos (0 a 20 cm) previo a la siembra para cada lote, cultivo, y zona de manejo por productividad. AP = Alta productividad, BP = Baja Productividad, MO = Materia orgánica, Pe = fósforo extractable, CE = Conductividad eléctrica, LT = Establecimiento Los Tambos, Bar = Establecimiento Barnetteche.

Sitio	Lote	Cultivo	Zona de manejo	MO %	Pe ppm	pH	CE dS m ⁻¹	Arena %
A	LT 13/14	Maíz	AP	3.7 a	14.5 b	5.8 a	0.25 a	46.5 b
	LT 13/14	Maíz	BP	2.1 b	27.3 a	5.7 b	0.17 b	71.0 a
B	Bar 13/14	Maíz	AP	3.3 a	16.0 b	5.4 a	0.25 a	44.2 b
	Bar 13/14	Maíz	BP	1.5 b	36.3 a	5.6 b	0.11 b	78.8 a
C	LT 14/15	Maíz	AP	3.5 a	13.5 b	6.3 a	0.26 a	42.5 b
	LT 14/15	Maíz	BP	2.1 b	29.2 a	6.1 b	0.10 b	81.1 a
D	LT 13/14	Soja	AP	3.9 a	13.1 a	5.6 a	0.22 a	45.7 b
	LT 13/14	Soja	BP	2.2 b	13.2 a	5.4 b	0.13 b	67.9 a
E	Bar 13/14	Soja	AP	3.3 a	9.6 a	5.4 b	0.20 a	59.2 b
	Bar 13/14	Soja	BP	2.5 b	12.1 a	6.5 a	0.22 a	70.8 a
F	Bar 14/15	Soja	AP	2.8 a	8.2 b	5.5 a	0.19 a	40.2 b
	Bar 14/15	Soja	BP	1.6 b	35.5 a	5.4 b	0.15 b	74.4 a
Promedio			AP	3.4 (± 0.4)	12.5 (± 3.0)	5.7 (± 0.3)	0.2 (± 0.03)	46.4 (± 6.7)
(± desvío estándar)			BP	2.0 (± 0.4)	25.6 (± 10.6)	5.8 (± 0.4)	0.1 (± 0.04)	74.0 (± 5.1)

Letras distintas indican diferencias significativas dentro de cada lote.

y fertilizado con superfosfato triple (0-20-0) a razón de 75 kg ha⁻¹ de producto en bandas en superficie a la siembra.

Los tratamientos se instalaron en franjas de 10 m de ancho por 100 m de largo, con 3 repeticiones para cada tratamiento. Previo a la siembra, y en cada lote y zona de manejo se realizó un muestreo aleatorio compuesto de los suelos en la capa de 0 a 20 cm de profundidad, con 25 piques para cada muestra compuesta, en cada zona.

En las mismas se determinó el contenido de carbono orgánico (combustión húmeda), el P extractable (Pe, Bray y Kurtz 1), el pH en agua (método potenciométrico en relación suelo: agua 1:2.5), conductividad eléctrica (método conductimétrico en relación suelo: agua 1:2.5), y el contenido de arena (método de Bouyoucus).

Las zonas de manejo de alta productividad se ubicaron en posiciones deprimidas en el paisaje y presentaron en promedio valores mayores de MO (3.4%) y de CE (0.2 dS m⁻¹) y valores menores de Pe (12.5 mg kg⁻¹) y de arena (46.4%), que las zonas de baja productividad (2% MO; CE 0.1 dS m⁻¹; 25.6 mg kg⁻¹ de Pe y 74% de arena). El Pe se diferenció por zona de manejo en 4 lotes, la CE en 5 lotes, mientras que MO, pH y Arena se diferenciaron en los 6 lotes estudiados (Tabla 1). Datos similares fueron encontrados por Zubillaga et al. (2006), en lotes próximos a Vedia, dentro de

la subregión de la pampa arenosa (provincia de Buenos Aires).

Durante la campaña 2013-14, las precipitaciones durante el periodo septiembre-marzo fueron de 478 mm, 169 mm menos que el promedio histórico para la zona. Se destacan lluvias en el mes de febrero de 139 mm. Durante la campaña 2014-15, las precipitaciones durante el periodo septiembre-marzo fueron de 490 mm, 156 mm menos que la media histórica.

En estado de madurez fisiológica de maíz y de soja se realizó la cosecha de los cultivos, recolectando una

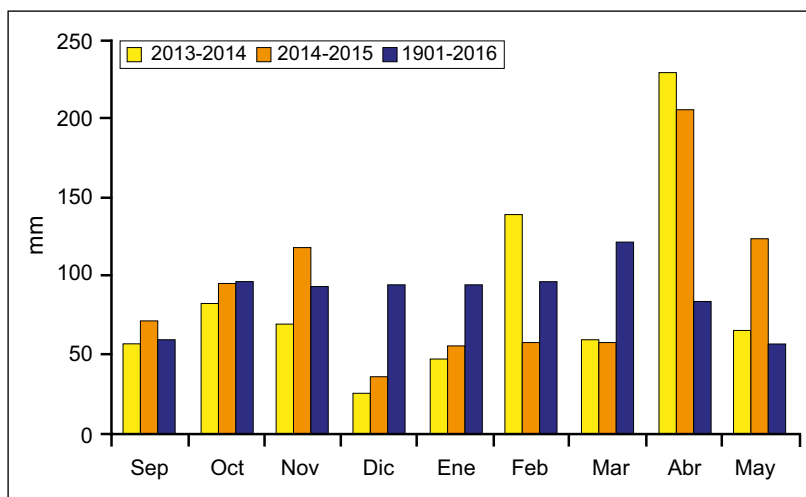


Figura 2. Precipitaciones ocurridas durante el desarrollo de los ensayos. Campañas 2013-14, 2014-15 e históricas. Servicio Meteorológico, delegación Bolívar.

superficie de 3 m² con 3 submuestras separadas de forma equidistante dentro de cada franja.

Las propiedades de suelo se analizaron mediante ANVA, y su correlación a partir de componentes principales, para la cual la variable zona de manejo se utilizó como variable dummy (0; 1). Los rendimientos, para cada cultivo, se analizaron a partir de un diseño factorial considerando los siguientes factores: (i) lote (sitios A, B y C en el caso de maíz y D, E y F en el caso de soja), (ii) zonas de manejo (AP y BP), (iii) fecha de siembra (temprana y tardía), y (iv) fertilización (P0 y P1) anidados dentro de cada zona de manejo (Figura 1).

La evaluación de los rendimientos de todas las poblaciones de datos evaluados se realizó a partir de un análisis de regresión para cada cultivo ajustando el rendimiento de cada tratamiento sin fertilización fosforada al máximo rendimiento con fertilización fosforada dentro de cada cultivo, lote, zona de manejo y fecha de siembra y los niveles de Pe a un modelo del tipo cuadrático-meseta (Ecuación 2).

$$Y = a + bx + cx^2 \text{ si } x < C; Y = P \text{ si } x > C \quad \text{Ec. 2}$$

dónde Y es el rendimiento relativo expresado en porcentaje y x el nivel de P extractable (mg kg⁻¹); a es la ordenada al origen, b es el coeficiente lineal, y c es el coeficiente cuadrático; y C es el rendimiento crítico, donde ocurre la intercepción entre la fase de respuesta cuadrática y la meseta, y P es el rendimiento relativo en la meseta.

Para establecer si los modelos de rendimiento relativo de ambos cultivos pueden combinarse y representarse con una sola función, o si deben representarse con dos funciones (una para cada cultivo), se compararon dos modelos: uno individual, que describe el comportamiento de ambos cultivos utilizando dos funciones (con 6 parámetros, 3 por cada ecuación) y un modelo combinado con una función para describir ambas zonas (el modelo simplificado es una restricción del modelo completo y tiene sólo 3 parámetros). Se evaluó si ambos conjuntos de datos pueden representarse con una sola función, o con dos funciones mediante una prueba de F (Mead et al., 1993). Los análisis de regresión se realizaron con el programa Table Curve 2D.

Resultados y discusión

El análisis de componentes principales indica que la mayor parte de la variabilidad (69.8%) de los suelos estudiados se explica por el contraste entre los niveles de MO y CE vs. el contenido de arena y Pe. Esto está a su vez asociado a las diferentes zonas de manejo:

en AP, mayores valores de MO y CE, mientras que los mayores valores de arena y Pe se asociaron a BP (Figura 3). pH no mostró relación con las variables descriptas.

Rendimientos de los cultivos

Maíz

La producción de granos de maíz varió entre 275 y 15 354 kg ha⁻¹ mostrando diferencias entre lotes, ZM y tratamientos de manejo del cultivo (fechas de siembra y fertilización con P). Los rendimientos en los sitios A y B mostraron interacciones significativas entre ZM y fechas de siembra de los cultivos. En zonas de AP, se observaron mayores rendimientos en fechas de siembra tempranas

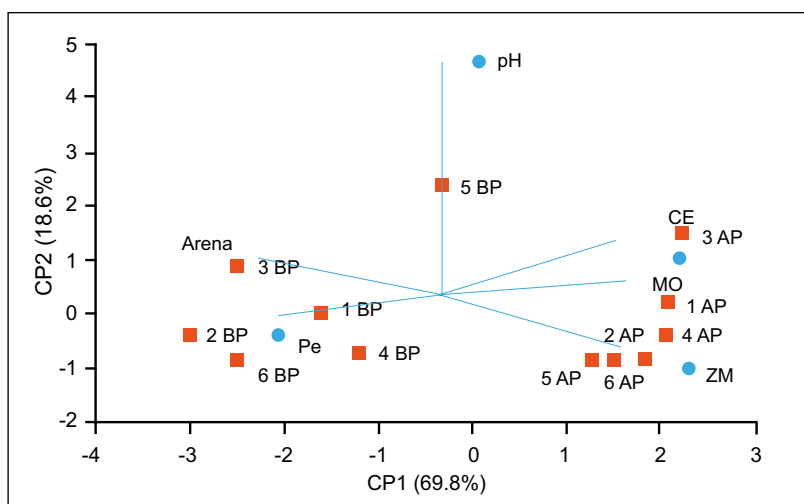


Figura 3. Gráfico biplot representando espacialmente los 2 componentes que explican en una mayor proporción la relación entre las variables. (69.8%) CP1 = Componente principal 1, (18.6%) CP2 = Componente principal 2, ZM = Zona de manejo, MO = Materia orgánica (%), Pe = Fósforo extractable (ppm), CE = Conductividad eléctrica (dS m⁻¹).

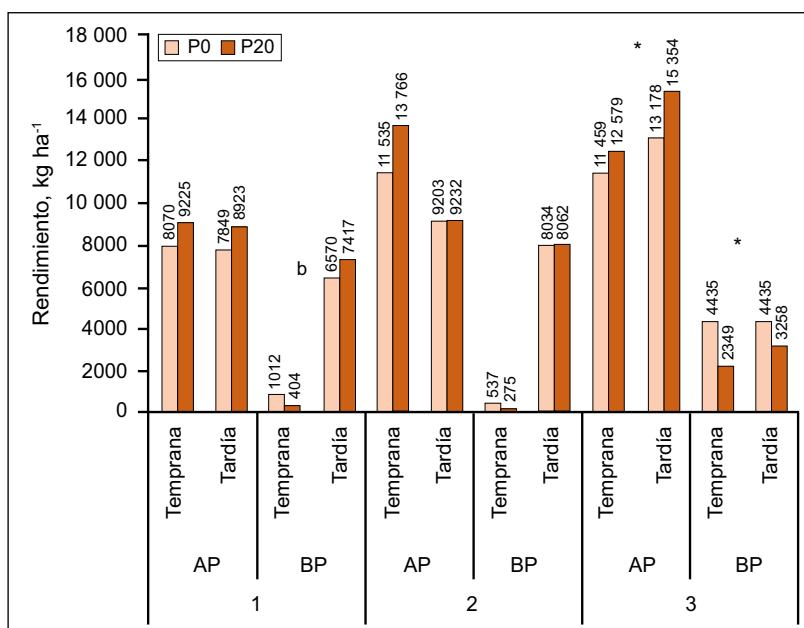


Figura 4. Rendimiento del cultivo de maíz para 3 sitios, 2 zonas de manejo (AP y BP), 2 fechas de siembra (Temprana y Tardía) y 2 niveles de fertilización (Temprano y Tardío). Letras diferentes muestran interacción ZM y FS dentro de cada lote. (*) representa interacción ZM y fertilización.

en comparación con fechas de siembra tardías. Mientras que, en zonas de BP, las fechas de siembra tardías rindieron más que las tempranas. En las zonas de AP, en estos dos sitios A y B, los cultivos implantados en fechas tempranas rindieron 10 649 kg ha⁻¹ mientras que en siembras de fecha tardía la producción fue de 8802 kg ha⁻¹. En cambio, en las zonas de BP, los rendimientos observados en los cultivos implantados en fechas tempranas fueron de 557 kg ha⁻¹ y para los realizados en fechas tardías de siembra de 7521 kg ha⁻¹. El sitio C mostró interacciones en los rendimientos según ZM y tratamientos de fertilización. En las zonas de AP el incremento medio de los rendimientos al fertilizar con P fue de 1648 kg ha⁻¹, mientras que en las zonas de BP el rendimiento fue de 986 kg ha⁻¹ inferior en los tratamientos fertilizados (Figura 4).

Las zonas de manejo se caracterizaron por diferente capacidad de almacenamiento hídrico, dado esto por la diferencia en contenido de agua entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente, siendo mayor en AP que en BP (datos no presentados). Esto lleva a que las zonas de manejo de AP, tengan la capacidad para almacenar mayor cantidad de agua útil, pudiendo estar disponible para el cultivo en diferentes momentos, mientras que las zonas de manejo de BP, la capacidad de almacenar el agua es baja, dependiendo la necesidad hídrica de las lluvias en los momentos críticos del cultivo.

En las zonas de BP, en donde la capacidad de retención hídrica asociada a mayores contenidos de arena y menores de materia orgánica, es menor que en las ZM de AP y no hay aporte de agua desde la capa freática, el crecimiento del maíz depende directamente de las precipitaciones en el periodo próximo a la floración (Andrade et al., 1996). En la campaña 2013-14, los cultivos implantados en los sitios A y B en zonas de manejo de BP y en fechas de siembra tardías recibieron abundantes precipitaciones (120 mm) alrededor de floración (segunda quincena de febrero) permitiendo así un mayor crecimiento del cultivo logrando interceptar mayor radiación y generando mayor rendimiento, en comparación con las fechas de siembra temprana. Mientras que el sitio C, en la campaña 2014-15 en el periodo de floración, en la segunda quincena de febrero, de los cultivos sembrados en fecha tardías se registraron menores precipitaciones que durante la campaña anterior explicando la menor productividad, llevando esto a tener rendimientos menores, similares a las siembras en fechas tempranas, para las zonas de manejo de BP.

Soja

La producción de granos de soja varió entre 1505 y 6232 kg ha⁻¹ mostrando diferencias entre lotes, ZM y tratamientos de manejo del cultivo (fechas de siembra y fertilización con P) (Figura 5).

Los sitios D y E presentaron efectos significativos para los factores zonas de manejo y fechas de siembra. Las zonas de AP tuvieron un rendimiento de 2812 y 5595 kg ha⁻¹ y las zonas de BP un rendimiento de 2066 y 3770 kg ha⁻¹ para los sitios D y F, respectivamente. Para los sitios D y F, las fechas de siembra tempranas rindieron 3136 y 5265 kg ha⁻¹ y las fechas de siembra tardía rindieron 1742 y 4100 kg ha⁻¹, respectivamente. El sitio 6, mostro efecto de la fecha siembra siendo los rendimientos de 4149 y 3106 kg ha⁻¹ para las fechas tempranas y tardías, respectivamente.

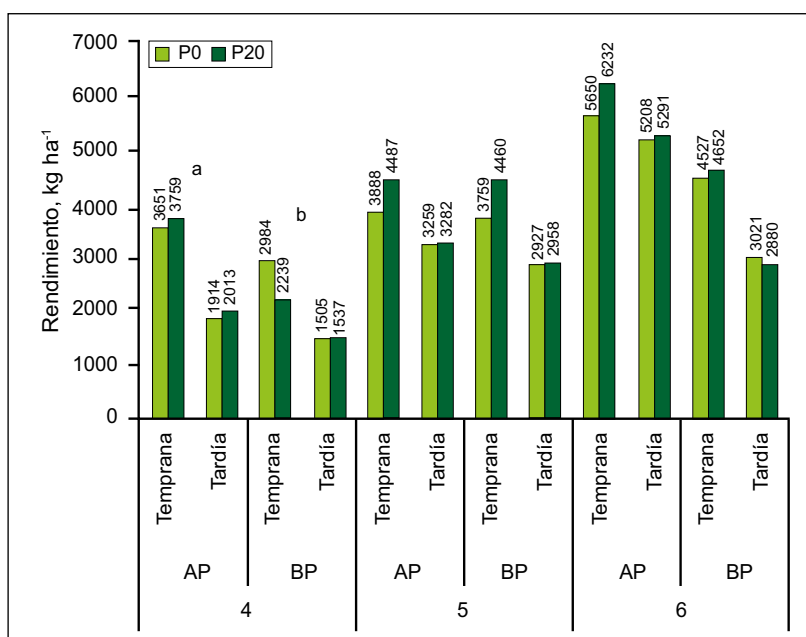


Figura 5. Rendimiento del cultivo de soja para 3 lotes, 2 zonas de manejo (AP y BP), 2 fechas de siembra (Temprana y Tardía) y 2 niveles de fertilización (Temprano y Tardío). Letras diferentes muestran interacción en ZM y FS.

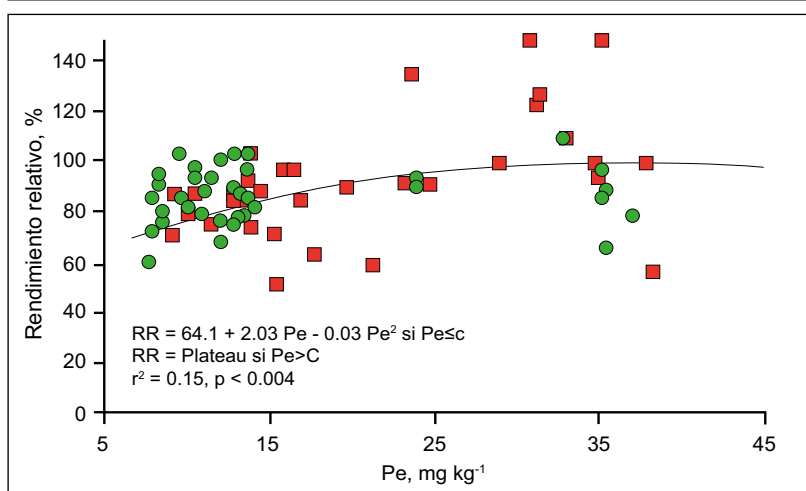


Figura 6. Relación entre rendimientos relativo al máximo de cada tratamiento al fertilizar con P en los cultivos de maíz y de soja en 62 ambientes de la subregión pampa arenosa según los niveles extractables de P en los suelos. Cuadrados = Maíz, Círculos = Soja.

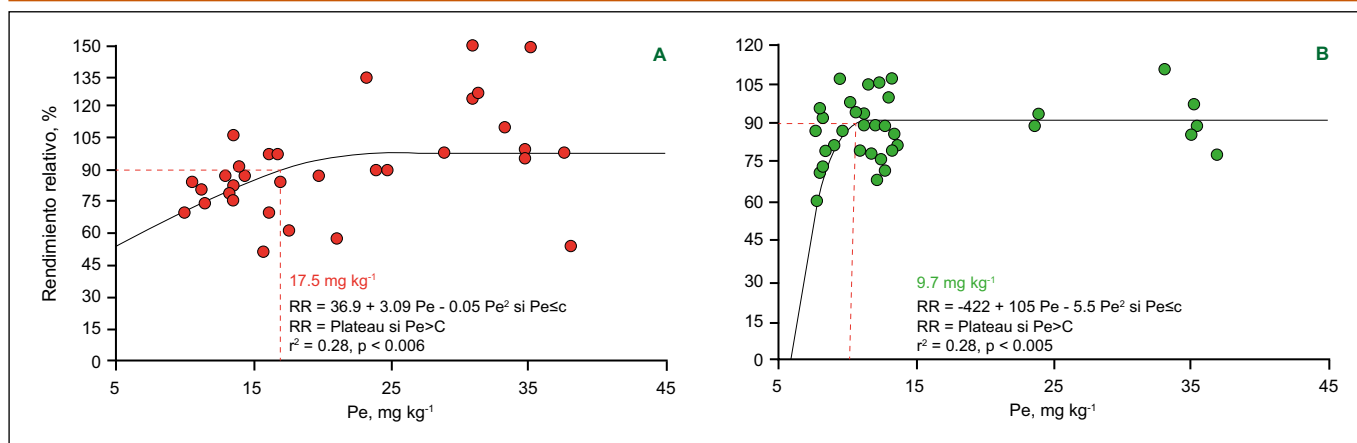


Figura 7. Relación entre rendimientos relativo al máximo fertilizado al fertilizar con fósforo en los cultivos de maíz y de soja en 62 ambientes de la subregión pampa arenosa según los niveles extractables de P en los suelos. A = Maíz, B = Soja.

Tabla 3. Análisis de la variación del error entre el modelo completo y el simplificado, y el nivel de significancia de la diferencia entre los dos modelos. SC = Suma de cuadrados del error del modelo, GL = Grados de libertad, n = Número de casos, Par = Número de parámetros, CM = Cuadrado medio, F = Cociente entre CMdiferencia y CMcompleto, p = Valor de probabilidad.

		SC	GL	n	Par	CM	F	p
Cultivos	Maíz	17.266	31	34	3			
	Soja	3.745	31	34	3			
Modelo completo		21.011	62	68	6	339		
Modelo simplificado		25.708	65	68	3			
Diferencia entre modelos		4.697	3			1566	4.62	0.05

La nutrición fosforada resultó en mayor crecimiento, mayor cobertura del canopeo (dosel) y, por lo tanto, mayor eficiencia en el uso de la radiación (datos no publicados), aunque esto no se evidencia estadísticamente en el rendimiento. Esto colabora con un mayor desarrollo de nódulos y, por lo tanto, una mayor tasa de fijación de N atmosférico reduciendo potenciales limitaciones en la nutrición nitrogenada del cultivo (Díaz Zorita et al., 2000). Las zonas de manejo de los sitios D, E y F discriminadas por diferente productividad aparente presentaron diferente contenido de agua útil a la siembra del cultivo de soja, 223 mm en zonas de AP y 73 mm en zonas de BP.

Respuestas al agregado de P

La relación entre el rendimiento relativo de los cultivos, y el nivel de Pe en suelo fue diferente para cada cultivo, presentando un nivel crítico al 90% de rendimiento relativo mayor para maíz (17.5 mg kg⁻¹), en comparación con soja (9.7 mg kg⁻¹). En la **Figuras 6 y 7** se observan el modelo combinado e individuales, respectivamente. En el primer caso existen menos restricciones al modelo (una función y tres parámetros), mientras que en el segundo tenemos dos funciones y seis parámetros. El incremento del error debido al uso de una sola función para explicar el rendimiento relativo en función del Pe inicial a la siembra más el fertilizante, fue significativo ($p < 0.05$), por lo tanto, ambos cultivos deben ser explicados mediante modelos con diferentes funciones (**Tabla 3**).

Los umbrales críticos para el cultivo de maíz fueron superiores a los encontrados por varios autores. Correndo et al. (2018), encontraron umbrales de 12.4, 9.9 y 9.0 mg kg⁻¹, respectivamente para suelos Hapludoles, Argiudoles y Vertisoles de la región pampeana en una recopilación de 377 experimentos. Ferrari et al. (2000), en el norte de Buenos Aires, reportaron valores entre 13 y 14 mg kg⁻¹. Sin embargo, los umbrales críticos encontrados coinciden con otros autores. Berardo et al. (2001), para el sudoeste de Buenos Aires en condiciones de secano, encontraron un nivel crítico entre 15 y 17 mg kg⁻¹, mientras que en condiciones de riego, el nivel crítico fue de 20 mg kg⁻¹. García et al. (1997), para la misma zona en sistemas de siembra directa y labranza convencional, reportaron un nivel crítico de 17 mg kg⁻¹. Mistrorigo et al. (2000) para el oeste de Entre Ríos, también encontraron un valor crítico de 17 mg kg⁻¹.

Los umbrales críticos para el cultivo de soja fueron similares a los encontrados por otros autores. Correndo et al. (2018) encontraron umbrales de 10.3, 10.4 y 8.5 mg kg⁻¹, respectivamente para suelos Hapludoles y Argiudoles y Vertisoles de la región pampeana en una recopilación de 592 experimentos. Gutiérrez Boem et al. (2010) en el sur de Santa Fe y sureste de Córdoba encontraron en 46 experimentos un umbral de 11 mg kg⁻¹. Espósito et al. (2008), en el sur de Córdoba, en 9 experimentos, encontraron un umbral de 15.5 mg kg⁻¹, utilizando una profundidad de muestreo de 15 cm. Fontanetto et al. (2008), para el centro de Santa Fe, a partir de 32 experimentos, encontraron un

umbral de 17 mg kg⁻¹, para alcanzar el 95% de rendimiento relativo. Echeverría et al. (2002), en 32 experimentos en Buenos Aires, Santa Fe y sur de Córdoba encontraron un umbral de 8 mg kg⁻¹ para alcanzar el 90% de rendimiento relativo.

Conclusiones

En Hapludoles de la región centro-oeste de Buenos Aires (Argentina), las zonas de manejo de alta productividad, tanto para maíz como para soja, se ubicaron en posiciones bajas en el paisaje y presentaron en promedio valores mayores de MO, CE y valores menores de arena de Pe.

En ambos cultivos se observaron interacciones entre sitio, zona de manejo y fecha de siembra. En maíz, en zonas de BP, el rendimiento estuvo asociado a las precipitaciones ocurridas durante el mes de febrero. En soja las fechas tardías tuvieron rendimientos inferiores a las tempranas, independientemente de las zonas de manejo.

La relación entre el rendimiento relativo de los cultivos, y el nivel de Pe en suelo fue diferente para cada cultivo, presentando un nivel crítico al 90% de rendimiento relativo mayor para maíz (17.5 mg kg⁻¹), en comparación con soja (9.7 mg kg⁻¹).

Agradecimientos

A los proyectos INTA: Tecnologías de agricultura de precisión para mejorar la eficiencia de la producción agropecuaria y contribución al desarrollo agrícola ganadero del centro, por el financiamiento de la investigación.

A los establecimientos: EEA “Domingo y María Barnetche Bolívar” y “Los Tambos” por el uso de lotes y maquinaria agrícola.

Bibliografía

- Andrade, F., A.G. Cirilo, S. Uhart, M. Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 p.
- Berardo, A., S. Ehrt, F. Grattone, y F.O. García. 2001. Corn yield response to phosphorus fertilization in the southeastern Pampas. *Better Crops International*, 15(1):3-5.
- Correndo, A. A., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez Boem. 2018. Recalibración de umbrales críticos de P-Bray para maíz y soja en Argentina. I Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión. 11-13 abril, 2018. Santiago, Chile. DOI: 10.13140/RG.2.2.28706.73922.
- Díaz Zorita, M., G. Grosso, M. Fernández Caniggia, y G. Duarte. 2000. Efectos de la ubicación de un fertilizante nitrógeno-fosfatado sobre la nodulación y la producción de soja en siembra directa en la región de la Pampa Arenosa, Argentina. *Ciencia del Suelo* 17(2):62-65.

- Espósito, G.P., C.A. Castillo, G.R. Balboa, y R.G. Balboa. 2008. Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos del sur de Córdoba para el cultivo de soja. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis.
- Echeverría, E., G. Ferraris, G. Gerster, F.H. Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti. 2002. Fertilización en soja y trigo - soja: respuesta a la fertilización en la región pampeana resultados de la red de ensayos del proyecto fertilizar -INTA Campaña 2000/2001 y 2001/2002. EEA INTA Pergamino, 44 p.
- Ferrari, M., J. Ostojic. L. Ventimiglia, H. Carta, G. Ferraris, S. Rillo, y F. Rimatori. 2000. Fertilización de maíz: Buscando una mayor eficiencia en el manejo de nitrógeno y fósforo. Actas Jornadas de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad”.
- Fontanetto, H., O. Keller, D. Giailevra, I. Belotti, y C. Negro. 2008. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos de la región central de Santa Fe. I- Respuesta física del cultivo, eficiencia de uso del P y niveles críticos en el suelo. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis.
- García F., K. Fabrizzi, M. Ruffo, y 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.
- Gutiérrez Boem, F.H., F.O. García, y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, mayo-junio, Rosario.
- Hatfield, J. 2000. Precision agriculture and environmental quality: Challenges for research and education. National soil tilt laboratory, Agricultural Research Service, USDA, Ames, Iowa. Documento disponible en <http://www.arborday.org>. 2016
- Kravchenko, A.N., y D.G. Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1):75-83.
- Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. Statistical methods in agriculture and experimental biology. Chapman and Hall, London, 415 p.
- Mistrorigo D., R. De Carli, F. Aranguren, P. Beret, y A. Lisasso. 2000. Fertilización de maíz en siembra directa en Entre Ríos. En Jornadas de Intercambio Técnico de Maíz. AAPRESID. Rosario, Argentina.
- Zubillaga, M.M., M. Carmona, A. Latorre, M. Falcón, y J. Barros. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel lote en Vedia, provincia de Buenos Aires. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina. ❖

Las deficiencias de fósforo y potasio tienen efectos contrastantes sobre el desarrollo del área foliar en el cultivo de maíz*

Luis María Arias Usandivaras^{1,†}, Flavio Hernán Gutiérrez Boem² y Fernando Salvagiotti³

- En este trabajo se evaluaron los efectos de la deficiencia de fósforo (P), potasio (K) y su interacción sobre el desarrollo del área foliar en el cultivo de maíz.
- Los efectos de las deficiencias de P y K en la evolución del área foliar verde fueron diferentes, aún cuando ambos son nutrientes poco móviles en el suelo.
- Los efectos de la deficiencia de P sobre el área foliar verde tendieron a atenuarse a lo largo del ciclo, mientras que la deficiencia de K mostró los efectos más importantes hacia el fin del ciclo del cultivo. La interacción entre P y K fue significativa en los estadios intermedios, cuando ambas deficiencias tuvieron similar magnitud.

Introducción

Muchas zonas agrícolas del mundo presentan suelos con deficiencias de fósforo (P) y potasio (K). En Argentina, esta situación se puede encontrar en el noreste (ejemplo, Corrientes). Gran parte de los suelos de la provincia de Corrientes donde se cultiva maíz tienen baja disponibilidad tanto de P como de K (Escobar et al., 1996) y se conoce muy poco sobre las respuestas del maíz al agregado de dichos nutrientes en estos suelos. Las recomendaciones de manejo de la fertilización en cuanto al momento y ubicación del fertilizante suelen ser similares para ambos nutrientes, debido a que ambos son poco móviles en el suelo y llegan a las raíces principalmente por difusión (Barber, 1995). Bray (1954) postuló que los nutrientes poco móviles, a diferencia de los más móviles (ejemplo, nitrógeno), manifiestan las deficiencias más temprano en el ciclo del cultivo porque en las primeras etapas el sistema radical es poco extenso. Si bien varios trabajos han estudiado aspectos agronómicos de la respuesta del maíz a la fertilización con P y K (Bordoli y Mallarino, 1998; Clover y Mallarino, 2013), hay pocos estudios que haya descrito sus efectos sobre el crecimiento del cultivo a lo largo de su ciclo (Plenet et al., 2000).

La expansión y senescencia foliar son los procesos determinantes de la interceptación de radiación en el cultivo de maíz. Si bien tienen un cierto grado de superposición temporal, la expansión es más importante antes de floración (Maddonni y Otegui, 1996), cuando el cultivo alcanza el máximo índice de área foliar verde (GLAI). La senescencia progresa muy lentamente antes de floración, para aumentar abruptamente durante el llenado de los granos (Borrás et al., 2003). En estudios en cultivos de maíz en condiciones de campo, se observó que una deficiencia de P disminuyó la tasa de aparición de hojas (LAR) y el área final individual de las hojas (ILA) (Plenet et al., 2000; Colomb et al., 2000). Los efectos

de una deficiencia de K han sido menos estudiados. Pettigrew (2008) observó que una deficiencia de K puede disminuir la conductancia estomática y la fotosíntesis, y también disminuir el potencial hídrico, la turgencia y eventualmente la expansión celular. En maíz, Jordan-Meille y Pellerin (2004) observaron una demora en la aparición de hojas y una menor ILA bajo una deficiencia de K.

El área foliar total es la suma de las áreas de las hojas individuales. La relación entre ILA y la posición en el tallo guarda una marcada forma “acampanada”, que se puede describir con la siguiente función exponencial (Dwyer y Stewart, 1986). (**Ecuación 1**).

$$A_n = A_0 \exp [-b (X_n - X_0)^2 + c (X_n - X_0)^3] \quad \text{Ec. 1}$$

dónde A_n es el área de la hoja en la posición n , A_0 es el área de la hoja más grande, X_0 es la posición de la hoja más grande, X_n es la posición de la hoja n , b es el grado de amplitud de la curva, y c es el grado de asimetría de la curva. Esta función ha sido utilizada para evaluar diferentes genotipos, fechas de siembra, dosis de nitrógeno (N), y distancia entre surcos. Dado que el P y el K tienen baja movilidad en el suelo, se esperaba que los efectos relativos de la deficiencia de P y K fueran mayores al comienzo del ciclo del cultivo. Por lo tanto, se esperaba una disminución del tamaño de las hojas en la porción izquierda de la curva, aumentando la asimetría de la función (parámetro c de la **Ecuación 1**). El efecto contrario (i.e. una reducción del área foliar individual en la porción derecha de la curva) se observó cuando aumentó la competencia entre plantas en maíz (Maddonni et al., 2001).

La senescencia en maíz aumenta significativamente luego de la floración. Se sabe que la disponibilidad de N y asimilados son importantes para mantener funcional el área foliar durante el periodo en el cual la

* Adaptado del artículo publicado en *Crop Science*, 58:2099-2109 (2018)

¹ Asesor independiente

² FAUBA, INBA-CONICET

³ EEA INTA Oliveros

Autor de contacto. Correo electrónico: luisariasusan@gmail.com