Fertilización fosfatada invernal: cuantificación y diagnóstico de la respuesta productiva en maíz

Diego Hernán Rotili[1,2,3], Javier Porcel[4], Juan Ángel Arduini[3,4], Bernardo Batlle[2], Martín Díaz-Zorita[1,5]

1 Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, RN 35 km 334, Santa Rosa, La Pampa, Argentina. drotili@agro.unlpam.edu.ar

2 América Agroinnova, Corrientes 121, América, Buenos Aires, Argentina.

3 Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (CREA), Sarmiento 1236, C1041AAZ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

4 Consultora SOS Agro SRL, Gobernador Irigoyen 283, Trenque Lauquen, Buenos Aires, Argentina.

5 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

Winter phosphorus fertilization: quantification and diagnosis of yield response in maize

Abstract

Winter phosphorus (P) fertilization may increase P supply while avoiding excessive fertilizer concentration near maize seeds, but its short-term value under water-limited conditions remains uncertain. We quantified its agronomic effects and identified indicators explaining yield responses in the subhumid Sandy Pampas of Argentina. Fifty-five rainfed, no-till field experiments were conducted from 2019–20 to 2024–25. Treatments included a control without winter P and a winter broadcast application of monoammonium phosphate at 100 kg ha^{-1} on upper slopes or 200 kg ha^{-1} on midslopes. Both treatments also received 100 kg ha^{-1} of monoammonium phosphate at sowing. Mixed models showed that winter P increased grain yield by 1,318 kg ha^{-1}. It also increased grain number from 2,709 to 2,935 grains m^{-2} and thousand-grain weight from 288 to 301 g. The best response model included Bray-1 P, July–October rainfall, and landscape position (R^2 = 0.332; RMSE = 1,095 kg ha^{-1}). Responses increased with lower Bray-1 P, greater winter–spring rainfall, and midslope position. The Bray-1 P threshold associated with 90% relative yield was 11.2 mg kg^{-1}. Winter P fertilization is a profitable complementary strategy, particularly in high-yielding environments with low soil P and adequate rainfall.

Palabras clave: fósforo; maíz; fertilización fosfatada invernal; P Bray; rendimiento; pampa arenosa.
Keywords: phosphorus; maize; winter phosphorus fertilization; Bray-1 P; grain yield; sandy pampas.

Introducción

El fósforo (P) es uno de los nutrientes que con mayor frecuencia limita la productividad de los cultivos extensivos en la región pampeana argentina, particularmente en sistemas agrícolas con balances negativos prolongados y disminución progresiva de la disponibilidad de P extractable en el suelo (Rubio et al., 2008; Sucunza et al., 2018). Dada la baja movilidad del P en el suelo y a la estrecha dependencia de su absorción con la temperatura, la humedad edáfica y el crecimiento del sistema radical, en maíz (*Zea mays* L.) es clave disponer de suficiente disponibilidad

de este elemento desde el inicio del cultivo para sostener el crecimiento de las raíces, la expansión foliar, la captura de radiación y la posterior definición del rendimiento (Mackay y Barber, 1984; Barber, 1995).

En Argentina, el diagnóstico de la respuesta a P se basa mayoritariamente en la determinación de P extractable por el método de Bray y Kurtz 1 (P-Bray) en la capa superficial del suelo (Bray y Kurtz, 1945; García et al., 2005; Correndo et al., 2018). Diversos estudios de calibración han permitido establecer umbrales críticos de P-Bray para maíz y otros cultivos de la región pampeana, por debajo de los cuales aumenta la probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada (García et al., 1997; Gutiérrez Boem et al., 2010; Sucunza et al., 2018). En una recalibración amplia para maíz y soja en Argentina, Correndo et al. (2018) reportaron valores críticos generales entre 10 y 12 mg kg^{-1}, aunque con variaciones asociadas a la textura del suelo y, en menor medida, a los potenciales de rendimiento.

La localización del fertilizante constituye un componente central del manejo de la fertilización fosfatada. La aplicación en la línea de siembra o en bandas cercanas a la semilla suele aumentar la eficiencia de uso del P respecto de aplicaciones superficiales, especialmente en suelos con baja disponibilidad, sistemas de siembra directa, condiciones de baja temperatura o crecimiento radical inicial limitado (Bordoli y Mallarino, 1998; Mallarino et al., 1999; Dodd y Mallarino, 2005; Rillo et al., 2016). Sin embargo, la aplicación de dosis elevadas de fertilizantes fosfatados en la línea también puede ser un riesgo para la implantación del cultivo, ya que la concentración de sales y/o del amonio próxima a las semillas puede afectar la germinación y la emergencia, reducir la implantación y/o generar desuniformidad espacial. Este riesgo es mayor en suelos con limitaciones en el contenido de agua en la cama de siembra y de textura gruesa, condiciones frecuentes en regiones subhúmedas y semiáridas pampeanas (Wortmann et al., 2006; Ciampitti et al., 2006; Ferraris et al., 2015).

La fertilización fosfatada invernal aparece como una alternativa para aumentar la oferta total de P sin concentrar toda la dosis en la línea de siembra. Esta práctica permite anticipar labores, disminuir la demanda operativa durante la siembra y aumentar la oferta de P sin concentrar dosis elevadas junto a la semilla. No obstante, al fertilizar en superficie la solubilización e incorporación de fosfatos en la solución del suelo depende estrechamente de las precipitaciones, aumentando su estratificación en sistemas de siembra directa y el P puede quedar espacialmente desacoplado de la zona de mayor exploración de las raíces durante la implantación de los cultivos inmediatos (Divito et al., 2010; Rillo et al., 2016).

En este marco, en regiones con escasas precipitaciones invernales y suelos de textura gruesa y frecuentes condiciones de sequía superficial tal como los predominantes en la región de la pampa arenosa, evaluar los efectos de la fertilización fosfatada invernal sobre la productividad y el beneficio neto en cultivos de maíz es necesario para definir su conveniencia agronómica y económica. Se hipotetizó que la fertilización fosfatada invernal aditiva a la aplicación localizada en la línea de siembra mejora la productividad y el beneficio neto de cultivos de maíz con mayores aportes al reducirse el nivel de P-Bray de los suelos y aumentar la productividad potencial del cultivo.

El objetivo de este estudio fue cuantificar los efectos de la fertilización fosfatada invernal sobre el rendimiento en grano de maíz bajo condiciones de cultivo

representativas de la región de pampa arenosa y establecer relaciones entre indicadores de cultivo y de sitio descriptoras de la variabilidad y magnitud de las respuestas.

Materiales y métodos

Sitios experimentales y tratamientos

Entre las campañas 2019-20 y 2024-25, se realizaron 55 experimentos en la subregión subhúmeda de la pampa arenosa sobre sitios en rotación agrícola en siembra directa continua durante al menos 10 años y con soja como cultivo antecesor. Cada experimento se llevó a cabo en una posición del paisaje (medialoma o loma), lote de producción y campaña particular. 69% de los experimentos se ubicaron en posición de medialoma y 31% en posición de loma.

Luego de la cosecha del cultivo antecesor, en julio, se tomaron muestras compuestas de la capa de 0 a 20 cm de profundidad de los suelos y se determinó el contenido de P-Bray (Bray y Kurtz, 1945). Inmediatamente, se instalaron dos tratamientos: (i) T0 (testigo sin fertilización fosfatada invernal) y (ii) T1 (con fertilización fosfatada invernal). La fertilización fosfatada invernal consistió en la aplicación en superficie ("al voleo") de 100 kg ha^{-1} (en las posiciones de loma) o de 200 kg ha^{-1} (en las posiciones de medialoma) de fosfato monoamónico (FMA; 11:52:0), con máquina voleadora monodisco con canal de apertura regulable, de arrastre manual. El diseño fue en bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones por sitio y parcelas de 12 m de largo por 5,5 m de ancho.

En cada sitio experimental, y de manera uniforme para ambos tratamientos, se sembró en siembra directa maíz de primavera temprana (fin de septiembre a inicio de octubre) o maíz de primavera tardía (fin de noviembre a inicio de diciembre). En las medialomas, el 47 % de los cultivos se sembraron en fecha temprana y el 53 % en fecha tardía, con un valor promedio de P-Bray de 10,9 mg kg^{-1} (rango de 3,3 a 35,8 mg kg^{-1}, mediana de 9,2 mg kg^{-1}). En las lomas, todos los cultivos se sembraron en fecha tardía y el valor promedio de P-Bray fue de 17,0 mg kg^{-1} (rango de 6,6 a 40,0 mg kg^{-1}, mediana de 17,5 mg kg^{-1}). En todos los casos se mantuvo el manejo típico del productor (maquinaria de siembra, genotipo, densidad de siembra, protección y fertilización nitrogenada) incluyendo en ambos tratamientos la aplicación de 100 kg ha^{-1} de FMA incorporado en la línea de siembra.

Luego de la madurez fisiológica del cultivo, se cosecharon las espigas de todas las plantas en una superficie de 3,15 m2 de cada parcela. Las espigas cosechadas se trillaron manualmente, los granos se pesaron y se estimó la humedad de los granos mediante un humedímetro portátil (Delver, Modelo HD 1021). El rendimiento en grano por unidad de superficie se estimó a una humedad comercial del 14,5 %. A partir de una submuestra de 200 granos por parcela se determinó el peso de mil granos (P1000). El número de granos por unidad de superficie (NG m^{-2}) se estimó a partir de la relación entre el rendimiento y el P1000.

En cada sitio experimental se obtuvieron las precipitaciones ocurridas durante los meses frecuentemente secos (julio a octubre, PP Jul-Oct) y durante los meses del crecimiento vegetativo y reproductivo pleno (noviembre a febrero, PP Nov-Feb).

Análisis estadístico y diagnóstico de respuesta

El efecto global de la fertilización fosfatada invernal sobre el rendimiento en grano se evaluó mediante modelos mixtos. En el análisis presentado se consideró el tratamiento como efecto fijo y la estructura experimental como efectos aleatorios, incluyendo bloque dentro de experimento y experimento dentro de campaña. La comparación de medias de rendimiento entre T1 y T0 se realizó mediante prueba t, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,10$. El mismo enfoque se aplicó al análisis de NG m^{-2} y P1000, considerando tratamiento como efecto fijo y campaña, experimento y bloque como efectos aleatorios. Los análisis se llevaron a cabo mediante los paquetes *lme4*, *lmerTest* y *emmeans* en el software R (R Core Team, 2020).

El diagnóstico de la magnitud de la respuesta integró variables de suelo y clima. Mediante el comando *lm()* dentro del paquete base de R, se ajustaron modelos lineales múltiples para explicar la respuesta de rendimiento, calculada como T1 - T0, a partir de los efectos aditivos del P-Bray, la campaña, la posición en el paisaje (medialoma = 1, loma = 0), PP Jul-Oct y PP Nov-Feb. La contribución de los términos de cada modelo se evaluó mediante ANVA utilizando el comando *anova()* del paquete base de R. Se seleccionó el mejor modelo explicativo de la respuesta de rendimiento a partir del AIC (utilizando el comando *AIC()* del paquete base de R), priorizando el equilibrio entre capacidad explicativa y parsimonia.

La relación entre rendimiento relativo y P-Bray se analizó para estimar un valor crítico de P asociado a 90% de rendimiento relativo utilizando el paquete *smatr* en R. El rendimiento relativo se calculó como el cociente entre el rendimiento del tratamiento sin fertilización fosfatada invernal (T0) y el rendimiento del tratamiento fertilizado en invierno (T1). El ajuste siguió el método arcoseno-log modificado propuesto por Correndo et al. (2017). Mediante el paquete *boot* de R, la incertidumbre del umbral se evaluó mediante remuestreo bootstrap con 1000 iteraciones y los intervalos se obtuvieron a partir de percentiles empíricos.

Resultados

El rendimiento promedio del tratamiento testigo a través de todos los experimentos fue de 7922 kg ha^{-1}, con una media mayor para los experimentos en posición de medialoma (9451 kg ha^{-1}) que de loma (4572 kg ha^{-1}). El efecto promedio de la fertilización fosfatada invernal a través de los 55 experimentos durante las 6 campañas y en diferentes posiciones del paisaje fue de un aumento de 1318 kg ha^{-1}. El NG m^{-2} difirió entre tratamientos, con valores promedio de 2709 granos m^{-2} en T0 y 2935 granos m^{-2} en T1 ($p < 0,0001$). El P1000 también difirió entre tratamientos, con valores de 288 g en T0 y 301 g en T1 ($p < 0,0001$).

El modelo ajustado al efecto de la fertilización fosfatada invernal sobre la respuesta del rendimiento de maíz con la mejor performance global (menor AIC) fue el que incluyó los efectos aditivos del P-Bray (con efecto negativo), las precipitaciones de julio a octubre (con efecto positivo) y la posición en el paisaje (con efecto positivo en las medialomas) [Respuesta (kg ha^{-1}) = 883 kg ha^{-1} – 68 kg ha^{-1} (mg kg^{-1})$^{-1}$ * P-Bray (mg kg^{-1}) + 4,7 kg ha^{-1} mm^{-1} PP Jul-Oct (mm) + 601,8 kg ha^{-1} * Medialoma] (Tabla 1). La inclusión de las precipitaciones de noviembre a febrero y la campaña generó efectos positivos como variable explicativa en los modelos, pero el aumento asociado en la complejidad de los modelos (mayor AIC) determinó la selección de un modelo más simple (Tabla 1).

Tabla 1. Resultado de la evaluación de modelos de regresión lineal múltiple para definir la respuesta del rendimiento de maíz a la fertilización fosfatada invernal (T1-T0) a partir del Criterio de Información de Akaike (AIC). Se presentan los 5 modelos de mejor performance de entre 32 modelos evaluados.

Modelo	gl	AIC	ΔAIC	R^2	R^2aj	RMSE
P-Bray + PP Jul-Oct + Posición	3	933,92	0,00	0,332	0,293	1095
P-Bray + PP Jul-Oct	2	934,83	0,91	0,296	0,269	1124
P-Bray + Posición	2	935,57	1,65	0,286	0,259	1132
P-Bray + PP Jul-Oct + PP Nov-Feb + Posición	4	935,80	1,88	0,334	0,280	1094
P-Bray + PP Jul-Oct + PP Nov-Feb	3	936,68	2,76	0,298	0,256	1123
.....	...	.....	.....	.....	.....	.....

La relación transformada entre rendimiento relativo y P Bray fue significativa (r = 0,42; p = 0,0014). El umbral de P Bray asociado a 90% de rendimiento relativo del T0 respecto del T1 fue de 11,21 mg kg^{-1} (IC 95% = 7,87 - 15,96 mg kg^{-1}) (Figura 1). El remuestreo bootstrap indicó una mediana de 11,2 mg kg^{-1} (P10 = 10,1 mg kg^{-1}, P90 = 12,4 mg kg^{-1}). La respuesta relativa estimada disminuyó con el aumento de P Bray. Por ejemplo, con 5 mg kg^{-1} de P Bray, el rendimiento relativo estimado del T0 fue de aproximadamente 77% respecto del T1. Por el contrario, con valores superiores a 15 mg kg^{-1}, el rendimiento relativo estimado se ubicó por encima de 90% (Figura 1).

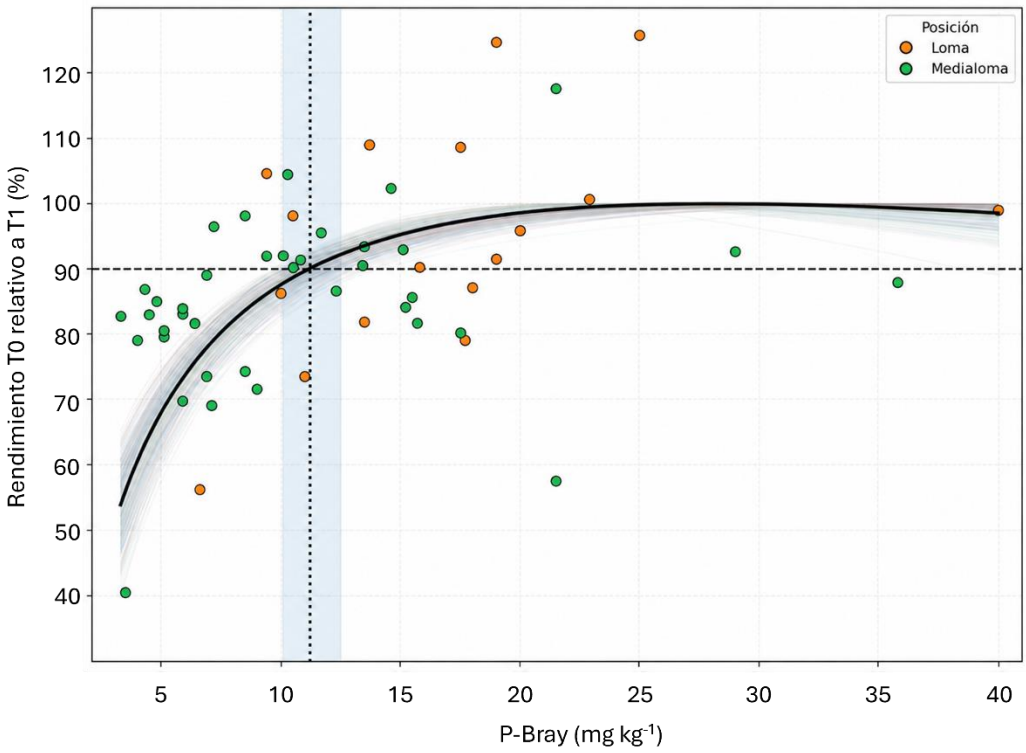

Figura 1. Relación entre el rendimiento del tratamiento sin fertilización fosfatada invernal (T0) relativo al del tratamiento con fertilización fosfatada invernal (T1) y el nivel

de P-Bray en cultivos de maíz, generado a través 55 experimentos (38 en posición de medialoma y 17 en posición de loma, indicados con diferentes colores) en 6 campañas en la región subhúmeda de la pampa arenosa. La línea punteada indica la mediana de 1000 iteraciones del procedimiento de Bootstrap para estimar el umbral de P-Bray para determinar el 90% del rendimiento relativo. La franja vertical celeste indica los límites del intervalo de predicción para el umbral ajustado (P10 - P90) de 1000 iteraciones.

Discusión y Conclusiones

La fertilización fosfatada invernal generó una respuesta productiva positiva y consistente en maíz en la subregión subhúmeda de la pampa arenosa. En el análisis global, el incremento medio de rendimiento fue de 1318 kg ha^{-1}, aun cuando todos los tratamientos recibieron fertilización fosfatada en la línea de siembra. Este resultado indica que la aplicación anticipada de P puede aportar una mejora agronómica inmediata y no sólo un efecto asociado a la construcción de fertilidad de largo plazo.

El modelo de mejor performance para estimar la respuesta del rendimiento de maíz a la fertilización fosfatada invernal mostró que la respuesta fue mayor con menores valores de P Bray, mayores precipitaciones de julio a octubre y posiciones de medialoma. Esto se fundamentaría en la probabilidad de limitación en la oferta edáfica del nutriente identificada mediante el P-Bray, la posibilidad de solubilización del fósforo de los gránulos del fertilizante mediante las precipitaciones de julio a octubre y el dimensionamiento de la demanda del nutriente del cultivo a partir de las posiciones de medialoma, considerablemente más productivas intrínsecamente que las lomas. No obstante, una limitación metodológica del estudio surge de que la dosis de fertilización invernal haya sido más elevada en los experimentos en medialoma respecto de loma, existiendo la posibilidad de haber ocurrido un efecto confundido atribuido únicamente a la posición del paisaje. A pesar de la menor demanda estimada para cultivos ubicados en lomas, que reduce la probabilidad de una limitación fosfatada en esas posiciones, no se descarta la posible existencia de efectos confundidos parciales.

El umbral de 11,2 mg kg^{-1} de P Bray para alcanzar 90% de rendimiento relativo aporta un criterio específico para aplicaciones fosfatadas invernales. Este valor se ubica dentro del rango general de umbrales de respuesta a la fertilización fosfatada en la línea reportados para maíz en suelos con textura gruesa (Correndo et al., 2018). No obstante, y de manera original, la comparación no representa la respuesta general a fertilizar con P, sino la respuesta a sumar una aplicación invernal sobre cultivos que también recibieron 100 kg ha^{-1} de FMA en la línea de siembra. Dados estos resultados, la fertilización fosfatada invernal aparece como una estrategia complementaria para aumentar la oferta de P en sistemas de maíz de alta demanda y con crecientes disminuciones generales de fertilidad química. La evidencia obtenida en este trabajo permitiría distribuir la oferta de P en el sistema sin concentrar toda la dosis junto a la semilla, con un retorno económico muy probable en el corto plazo debido al aumento de productividad.

Cabe destacar que el modelo de mejor performance no solamente consideró la probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada invernal a partir del P Bray, sino que también incluyó aspectos propios del ambiente con influencia sobre la solubilización del fósforo y la demanda del nutriente por parte del cultivo. Por ello, los ambientes con alta

productividad potencial y baja disponibilidad inicial de P constituirían las situaciones donde la respuesta agronómica a la fertilización fosfatada invernal resultaría más esperable. Además, los pronósticos climáticos podrían anticipar escenarios positivos de solubilización e incorporación del fósforo al suelo para su posterior absorción por el cultivo de maíz. La práctica de la fertilización fosfatada invernal a partir del modelo ajustado permitiría optimizar la distribución de fósforo en lotes y/o zonas de manejo de mayor probabilidad de respuesta en base a indicadores objetivos, aumentando la eficiencia en el uso de este insumo y la sustentabilidad de los sistemas productivos que incluyan maíz en la rotación.

Referencias

Barber, S.A. 1995. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Bordoli, J.M., y Mallarino, A.P. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. Agronomy Journal 90: 27–33.

Bray, R.H., y Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Science 59: 39–45.

Ciampitti, I.A., García, F.O., y Picone, L.I. 2006. Manejo y ubicación del fertilizante junto a la semilla: efectos fitotóxicos. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 31: 13–18.

Correndo, A.A., Salvagiotti, F., García, F.O., Gutiérrez Boem, F.H. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analysing soil test value-relative yield relationships. Crop & Pasture Science 68: 297-304.

Correndo, A.A., Salvagiotti, F., García, F.O., y Gutiérrez Boem, F.H. 2018. Recalibración de umbrales críticos de P-Bray para maíz y soja en Argentina. En: Actas del Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Montevideo, Uruguay.

Divito, G.A., Sainz Rozas, H., y Echeverría, H.E. 2010. Estrategias de fertilización fosforada en una rotación de cultivos en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 28(1): 1–9.

Dodd, J.R., y Mallarino, A.P. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Soil Science Society of America Journal 69: 1118–1128.

Ferraris, G.N., Couretot, L.A., Toribio, M., y Falconi, R. 2015. Fertilizantes en línea de siembra de maíz: efectos sobre la implantación y el rendimiento. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 18: 5–10.

García, F.O., Berardo, A., Boxler, M., y Reussi Calvo, N. 1997. Fertilización fosfatada de maíz en la región pampeana. En: Actas del VI Congreso Nacional de Maíz, Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

García, F.O., Picone, L.I., y Berardo, A. 2005. Fósforo. En: H.E. Echeverría y F.O. García, eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. INTA, Buenos Aires, Argentina.

Gutiérrez Boem, F.H., García, F.O., y Boxler, M. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? En: Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Mackay, A.D., y Barber, S.A. 1984. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn. Soil Science Society of America Journal 48: 818–823.

Mallarino, A.P., Bordoli, J.M., y Borges, R. 1999. Phosphorus and potassium placement effects on early growth and nutrient uptake of no-till corn and relationships with grain yield. Agronomy Journal 91: 37–45.

R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Rillo, S., Álvarez, C., Noellemeyer, E., y Quiroga, A. 2016. Aplicación de fósforo en secuencias agrícolas en siembra directa. Ciencia del Suelo 34(2): 255–265.

Rubio, G., Cabello, M.J., Gutiérrez Boem, F.H., y Munaro, E. 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in Mollisols. Soil Science Society of America Journal 72: 1721–1727.

Sucunza, F.A., Gutiérrez Boem, F.H., García, F.O., Boxler, M., y Rubio, G. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: soil test trends, critical levels and balances. European Journal of Agronomy 96: 87–95.

Wortmann, C.S., Shapiro, C.A., y Ferguson, R.B. 2006. Using starter fertilizers for corn, grain sorghum, and soybeans. University of Nebraska–Lincoln Extension, G361.