nformaciones Agronómicas de Hispanoamérica







IAH 31 - Diciembre 2018

Versión Cono Sur

Director: Dr. Fernando O. García

International Plant Nutrition Institute Programa Cono Sur de Latinoamérica Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

Editores invitados:

Dr. Armando Tasistro Dr. Raúl Jaramillo Ing. Agr. M. Sc. Adrián A. Correndo

Propietario:

International Plant Nutrition Institute (IPNI)

CUIT: 30-70175611-4 ISSN 2222-016X

No. de Registro de Propiedad Intelectual: 5348767

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica Av. Maipú 1864, Cpo 1 - Piso 17 - Depto. 1 (B1602ABR) Florida Buenos Aires - Argentina Telf/Fax.: 54 11 4791 2615 Correo electrónico: lacs@ipni.net http://Lacs.ipni.net

Oficina para el Norte de Latinoamérica Casilla Postal 17 17 980 Quito - Ecuador Telf.: 593 2 2463 175 • Fax: 593 2 2464 104 Correo electrónico: aormaza@ipni.net http://nla.ipni.net

Oficina para México y Centroamérica http://mca.ipni.net

Contenido

Valores críticos de fósforo para trigo, soja y maíz en Molisoles del norte de la región pampeana argentina

Sucunza, F.A., F.H. Gutiérrez Boem, F.O. García, M. Boxler, y G. Rubio

Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (Medicago sativa L.)

Marino, M.A., y H.E. Echeverría

Variabilidad sitio-específico de respuestas de 14 maíz y de soja a la fertilización con fósforo según fechas de siembra

Pérez, G., y M. Díaz-Zorita

Las deficiencias de fósforo y potasio tienen 20 efectos contrastantes sobre el desarrollo del área foliar en el cultivo de maíz

Arias, L.M., F.H. Gutiérrez, y F. Salvagiotti

Respuesta a la fertilización NS en el cultivo de 28 colza-canola en el centro-este de Entre Ríos

Alaluf, C., J.J. De Battista, L. Dobler, I. Rampoldi, D. Gastán, N. Arlettaz, y F. Sittoni

contenido y se citen la fuente y el autor.

Mapas de fertilidad como herramienta para 32 zonificación de suelos en Panamá

Villarreal, J.E.

Cursos y Simposios

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el

40

2

7

Misión del IPNI

La misión del IPNI es desarrollar y promover información científica sobre el manejo responsable de la nutrición de las plantas para el beneficio de la humanidad.

IPNI es una organización global con iniciativas enfocadas en la creciente necesidad mundial de alimentos, forrajes, combustibles, y fibras. Los programas de investigación y educación del IPNI desarrollan y promueven el Manejo Responsable de los Nutrientes a través de los 4 Requisitos (4R): aplicar la fuente y la dosis correcta en el momento y la forma correctos.



http://www.ipni.net

Valores críticos de fósforo para trigo, soja y maíz en Molisoles del norte de la región pampeana argentina*

Florencia A. Sucunza¹, Flavio H. Gutiérrez Boem¹, Fernando O. García², Miguel Boxler³ y Gerardo Rubio^{1,#}

- Los niveles críticos de fósforo (P) extractable en el suelo representan el valor por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta.
- En este estudio se determinaron y compararon los valores críticos de P extractable para soja, trigo y maíz en ensayos de largo plazo de la región pampeana norte.
- Los niveles críticos de P-Bray no difirieron entre soja y maíz, pero trigo mostró un valor significativamente mayor.
- La implicancia práctica de estos resultados para los Molisoles pampeanos es mantener el P-Bray del suelo a valores aproximadamente o ligeramente superiores a 19 mg kg⁻¹ para rotaciones que incluyan estos tres cultivos.

Introducción

Para alcanzar rendimientos óptimos de un cultivo, la disponibilidad de fósforo (P) en el suelo debe estar por encima del nivel crítico, definido como el valor de P extractable en el suelo por encima del cual la probabilidad de respuesta al fertilizante es baja. Si el valor del análisis de P en el suelo está por debajo del nivel crítico, se supone que el P es limitante para el rendimiento del cultivo y se esperan respuestas positivas a la fertilización. Los valores críticos de P varían según el método de análisis de suelo, la profundidad de muestreo, el cultivo, y el modelo estadístico empleado (Gutiérrez Boem et al., 2011; Jordan Meille et al., 2012). En la región pampeana argentina, el P-Bray-1 es el método mayormente utilizado (Rubio et al., 2008; Sainz Rozas et al., 2012).

Los niveles críticos de P generalmente se obtienen de experimentos a campo que relacionan los análisis de P del suelo con los rendimientos relativos (RR), definidos como el rendimiento del cultivo en el tratamiento control como porcentaje del rendimiento del cultivo en el tratamiento fertilizado. En los sistemas de rotación de cultivos, es particularmente relevante conocer el nivel crítico de P de los diferentes cultivos para identificar el nivel de P conveniente que se utilizará como objetivo para toda la rotación (por lo general, el más alto). En general se acepta que los niveles críticos varían entre los cultivos. Esta suposición proviene principalmente de conjuntos de datos que involucran diferentes áreas y suelos. Sin embargo, el hecho de que los niveles críticos se vean afectados por las propiedades del suelo y otros factores ambientales y de manejo (Bray, 1954; Bell et al., 2013) sugiere que las comparaciones entre cultivos pueden ser evaluadas mejor a través de ensayos realizados en

los mismos sitios experimentales y bajo las mismas condiciones de manejo. Sin embargo, hasta el momento se han publicado solo unos pocos estudios que cumplen estas condiciones (ejemplo, Dodd y Mallarino, 2005; Poulton et al., 2013).

Se ha informado que la soja es menos sensible a la fertilización con P que el maíz y el trigo (Colomb et al., 2007; Mallarino et al., 2013). Estos tres cultivos son los principales cultivos de grano de la región pampeana (Domínguez y Rubio, 2019). En los últimos años, los sistemas agrícolas han experimentado profundos cambios entre los que se destacan la consolidación de la soja como cultivo predominante, y la adopción generalizada de la siembra directa (Wingeyer et al., 2015; Andrade et al., 2017). Dados estos cambios, existe la necesidad de verificar o ajustar los niveles de P críticos del suelo actualmente aceptados (Echeverría et al., 2014: García y Reussi Calvo, 2014; Gutiérrez Boem y Salvagiotti, 2014). Una larga historia de exportaciones de P sin reposición causó una disminución generalizada de P en la mayoría de los suelos agrícolas en Argentina (Sainz Rozas et al., 2012). El país no posee reservas de P significativas y debe importar casi todos los fertilizantes fosfatados. Por lo tanto, la deficiencia de P es una amenaza importante para la productividad agrícola y es necesario optimizar la eficiencia en el uso de P por los cultivos.

El objetivo de este estudio fue determinar y comparar, en condiciones similares de campo, los valores críticos de P para soja, trigo y maíz. Para este fin, realizamos un estudio de 2000-01 a 2013-14 en cinco sitios experimentales ubicados en la región pampeana norte que incluían rotaciones de soja/maíz/trigo.

^{*} Versión adaptada de: Sucunza, F. A., F.H. Gutiérrez Boem, F.O. García, M. Boxler & G. Rubio. 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

¹ INBA (CONICET UBA) y Cátedra de Fertilidad de Suelos y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Buenos Aires. Av. San Martín 4453C1417DSE Buenos Aires, Argentina

² IPNI Latino América Cono Sur

³ Consultor privado

[#] Autor de contacto. Correo electrónico: rubio@agro.uba.ar

Tabla 1. Información de los sitios experimentales, series de suelo, rotación y propiedades del suelo (0-20 cm) al comienzo del periodo experimental (septiembre 2000).

Sitio experimental	Balducchi	San Alfredo	La Hansa	Lambaré	La Blanca
Tipo de suelo	Hapludol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Argiudol típico	Hapludol típico
Serie de suelo	Santa Isabel	Hughes	Bustinza	Los Cardos	La Bélgica
P-Bray (mg kg ⁻¹)	10.8	11.6	17.7	67.7	16.2
C orgánico (g kg ⁻¹)	13.5	19.8	12.2	18.7	13.3
рН	5.9	6.0	5.5	5.6	6.6
Textura	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa	franco limosa
Arcilla (%)	11.8	18.0	18.0	20.5	15.5
Limo (%)	53.1	62.0	78.9	76.5	56.4
Arena (%)	35.1	20.0	3.1	3.0	28.1
Rotación	Maíz-Tri	igo/Soja		Maíz-Soja-Trigo/Soja	I

Materiales y métodos

Este trabajo se realizó en la Red de Nutrición de la Región CREA (Consorcio Regional de Experimentación Agrícola) Sur de Santa Fe. Esta es una red de ensayos a largo plazo en lotes de productores cuyos detalles figuran en Ciampitti et al. (2011) y se presentan en la **Tabla 1**. En el presente estudio, evaluamos el periodo entre las campañas agrícolas 2000-01 y 2013-14 **(Figura 1)**.

En este trabajo se compararon dos tratamientos de los seis incluidos en los sitios de ensayo desde 2000: a) -P: sin fertilización P y b) +P: con fertilización anual de P. La dosis de P se decide cada año, de acuerdo con el rendimiento esperado, a través de la estimación de la remoción de P por los cultivos más un 5-10%. Las extracciones esperadas de P se estiman multiplicando el rendimiento esperado del cultivo por la concentración de P del grano. En promedio, la dosis anual de P fue de 37 kg P ha⁻¹. La fuente de P fue fosfato monoamónico (11-22-0) aplicado en bandas incorporadas al momento de la siembra. Ambos tratamientos recibieron fertilización

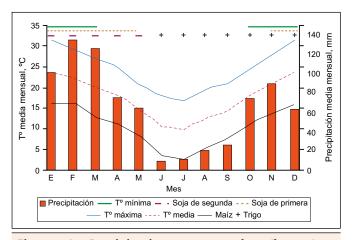


Figura 1. Precipitaciones mensuales (barras) y promedio mensual de temperaturas máxima y mínima (líneas) durante el periodo estudiado. Los periodos de crecimiento de los cultivos, son indicados con intervalos horizontales.

con nitrógeno (N) y azufre (S) adicional. Otros nutrientes generalmente no limitan los rendimientos en estos suelos. Todos los tratamientos se manejan bajo sistema de siembra directa desde la implantación de los ensayos.

Se tomaron muestras de suelo (0-20 cm) cada año antes de sembrar trigo, maíz o soja de primera. Se tomaron muestras compuestas de 20 piques (2 cm de diámetro) en cada parcela. El P fue extraído según Bray-1, y el P en el extracto se determinó colorimétricamente.

El rendimiento relativo (RR) se calculó como el cociente entre los rendimientos (promedio de las tres repeticiones) de los cultivos obtenidos en los tratamientos -P y +P. Los rendimientos de los cultivos se registraron anualmente para toda la secuencia de años y se relacionaron con los valores de P-Bray medido el mismo año en el tratamiento -P. Para la selección de los mejores modelos de ajuste, se compararon diferentes funciones (lineal, exponencial, logarítmica, cuadrática) utilizando el coeficiente de determinación como criterio de discriminación. Para los tres cultivos, finalmente se seleccionó el modelo de Mitscherlich con el máximo RR fijado como 100%. Una observación del conjunto de datos del cultivo de trigo se identificó como un valor atípico (outlier) y no se consideró en el análisis.

El nivel de P-Bray correspondiente al 90% RR se consideró el nivel crítico de P para cada cultivo. Las funciones ajustadas a cada cultivo se compararon mediante un test de F (Mead et al. 1993).

Resultados y discusión

Rendimiento de los cultivos

Los rendimientos de los cultivos no fertilizados oscilaron entre 7.3-15.9, 3.1-6, 1.7-5.2 y 1.5-5.1 t ha⁻¹ para maíz, soja de primera, soja de segunda y trigo, respectivamente. Los rendimientos de los cultivos fertilizados oscilaron entre 8.5-16, 3.8-6, 1.7-5.3 y 1.7-5.8 t ha⁻¹ para los cuatro cultivos, respectivamente. El trigo fue el que más respondió a P, mientras que las respuestas a P de

maíz y soja fueron relativamente semejantes. Como se esperaba, el sitio con el P-Bray inicial más bajo (Balducchi) tuvo las respuestas más altas a P, mientras que el sitio con el valor inicial más alto (Lambaré) tuvo las más bajas. La respuesta media anual para el maíz fue de 1.6 t ha-1 en La Hansa, no hubo respuesta en Lambaré, 1.2 t ha-1 en La Blanca, 1.0 t ha-1 en San Alfredo y 2.0 t ha-1 en Balducchi. Para el trigo, las respuestas fueron 0.3, 0.2, 0.7, 1.3 y 1.4 t ha-1, respectivamente. Para la soja de segunda 0.16, 0.05, 0.2, 0.5 y 0.6 t ha-1, respectivamente. Finalmente, la soja de primera tuvo respuestas de 0.3 t ha-1 en La Hansa, de 0.015 t ha-1 para Lambaré y de 0.6 t ha-1 en La Blanca.

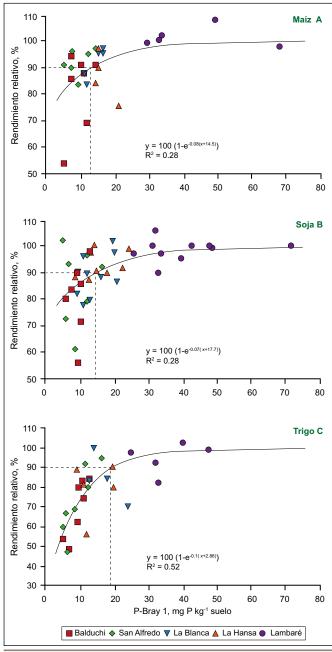


Figura 2. Relación entre P-Bray (0-20 cm) y rendimiento relativo de maíz, soja y trigo para los 5 sitios del norte de la región pampeana, a través de los 14 años del periodo experimental. El número de observaciones fue 27, 43 y 29 para maíz, soja y trigo, respectivamente. Los rendimientos relativos fueron calculados como el rendimiento del tratamiento control expresado como porcentaje del rendimiento del tratamiento fertilizado.

Niveles críticos de P

Este experimento de fertilización fosforada sobre suelos Molisoles pampeanos permitió la identificación y comparación de los valores críticos de P para los cultivos de soja, maíz y trigo bajo condiciones de crecimiento similares, incluyendo los mismos sitios experimentales y prácticas de manejo (Figura 2). En todos los casos, el mejor ajuste entre RR y el P-Bray se obtuvo con funciones de tipo Mitscherlich, que mostraron disminuciones curvilíneas de rendimiento relativo con valores de P-Bray decrecientes. Utilizando este modelo, el trigo mostró un R² más alto (0.52) que la soja y el maíz (0.28 en ambos casos), lo que significa que la nutrición fosforada fue menos relevante al explicar las variaciones en los rendimientos en estos dos últimos cultivos.

Aunque la soja de primera produjo, en promedio, un 20% más que la soja de segunda, el nivel crítico de P no difirió entre ellas, alcanzando un valor común de 14.3 mg kg⁻¹ de P-Bray para un RR del 90%. Esto es coherente con la suposición general de que, para los nutrientes poco móviles como el P, los niveles críticos de cualquier cultivo específico no dependen del rendimiento del cultivo (Bray, 1954, Bell et al., 2013). El modelo ajustado para el maíz identificó un nivel crítico de 12.5 mg P-Bray kg⁻¹ (90% RR) y no difirió del modelo ajustado para el cultivo de soja. Al ajustar una función común para soja y maíz, el nivel crítico es de 13.6 mg P-Bray kg⁻¹. La función obtenida para el cultivo de trigo indicó un valor crítico de 19 mg kg⁻¹ de P-Bray para un RR del 90%, que fue significativamente diferente del de la soja y el maíz.

La comparación entre los valores críticos de P para los diferentes cultivos informados en la literatura es compleja debido a los diferentes enfoques estadísticos, extractantes y métodos de muestreo del suelo utilizados, entre otros factores. Las correlaciones y factores de conversión entre diferentes extractantes y profundidades de muestreo están disponibles para suelos locales y otros (Gutiérrez Boem et al., 2011; Jordan Meille et al., 2012). Sin embargo, no se recomiendan para conversiones generalizadas entre diferentes métodos de análisis de suelo debido a las intrincadas interacciones entre suelos y extractantes químicos (Jordan Meille et al., 2012). Desde un punto de vista práctico, las diferencias relativas entre los niveles críticos de P serían un enfoque apropiado para comparar cultivos, incluso cuando se usan diferentes extractantes de P en el suelo o profundidades de muestreo. Colomb et al. (2007) encontraron un orden decreciente de umbrales críticos siguiendo el ranking trigo > soja > maíz (usando funciones tipo Mitscherlich y P-Olsen como análisis de suelo). Tang et al. (2009) también observaron que el maíz tenía un nivel crítico de P-Olsen menor que el trigo (-6%) y Dodd y Mallarino (2005) observaron que el nivel crítico para la soja era menor que el maíz, utilizando P-Bray como análisis de suelo. Nuestro ranking fue trigo> maíz = soja, siendo el nivel crítico de la función combinada para soja y maíz un 28% menor que el del trigo. Esta clasificación coincide aproximadamente con la interpretación actual

del análisis de suelo en el medio oeste de los EE.UU., donde el valor crítico para soja y maíz es un 24% menor que para trigo (Mallarino et al., 2013).

Valores de P-Bray luego de 14 años de tratamientos de fertilización

En los tratamientos -P y al final de los 14 años evaluados, Balducchi, La Blanca y San Alfredo estuvieron por debajo del nivel crítico P para los tres cultivos: 5.6, 9.2 y 6.4 mg P kg⁻¹, respectivamente. La Hansa alcanzó valores de P-Bray de 14 mg P kg⁻¹, cerca del nivel crítico de P encontrado para la soja y el maíz, pero por debajo del trigo. Lambaré se mantuvo en valores de P-Bray superiores a los niveles críticos de P para los tres cultivos (24.7 mg P kg⁻¹). En los tratamientos +P, al final de los 14 años evaluados, los cinco sitios alcanzaron valores de P-Bray superiores a los niveles críticos. Estos resultados indican que, después de 14 años de estudio, todos los tratamientos fertilizados superaron el valor crítico del cultivo con mayores requerimientos (Figura 2). En los sistemas con rotación de cultivos, una estrategia de manejo adecuada es mantener el P-Bray en niveles equivalentes a los niveles críticos de P más altos de los cultivos incluidos en la rotación. En consecuencia, la implicancia de nuestros resultados para los productores es mantener el suelo en aproximadamente o ligeramente por encima de 19 mg kg⁻¹ de P-Bray, que es el nivel crítico de P del cultivo con mayor valor crítico. Este nivel objetivo, beneficia al productor porque los rendimientos no se ven limitados por la falta de P disponible y el fertilizante no es aplicado en exceso. No exceder este valor también beneficia al medio ambiente al reducir el riesgo de pérdidas perjudiciales de P (Sharpley et al., 2013).

Conclusiones

Nuestro estudio, en base a experimentos de campo a largo plazo, indicó que los niveles críticos de P-Bray no diferían entre soja y maíz, pero trigo mostró un valor significativamente mayor (13.6 mg kg⁻¹ y 19 mg kg⁻¹, respectivamente). La implicancia práctica de estos resultados para los Molisoles pampeanos es mantener el P-Bray del suelo a valores aproximadamente o ligeramente superiores a 19 mg kg⁻¹ para rotaciones que incluyen estos tres cultivos.

Agradecimientos

El CONICET, la Universidad de Buenos Aires y ANPCYT proporcionaron apoyo financiero. Agradecemos a los miembros de CREA Sur de Santa Fe por facilitarnos los ensayos para realizar este estudio. La Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe es un emprendimiento conjunto de CREA Sur de Santa Fe, IPNI y Nutrien Ag Solutions.

Bibliografía

Andrade, J.F., S.L. Poggio, M. Ermácora, y E.H. Satorre. 2017. Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. Europ. J. Agron. 82, 1-10.

- Bell, R., D. Reuter, B. Scott, L. Sparrow, W. Strong, y W. Chen. 2013. Soil phosphorus—crop response calibration relationships and criteria for winter cereal crops grown in Australia. Crop and Pasture Sci. 64, 480-498.
- Bray, R.H. 1954. A nutrient mobility concept of soil plant relationships. Soil Sci. 78, 9-22.
- Ciampitti, I.A., F.O. Garcia, L.I. Picone, y G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 75, 131-142.
- Colomb, B., P. Debaeke, C. Jouany, J.M. Nolot. 2007. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: cropand soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France. Eur. J. Agron. 26,154–165.
- Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-Test Phosphorus and Crop Grain Yield Responses to Long-Term Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotations. Soil Sci. Soc Am J. 69, 1118-1128.
- Dominguez, J., y G. Rubio. 2019. Agriculture. In: Rubio G, Lavado RS, Pereyra (eds). The Soils of Argentina. World Soils Book Series. Springer Int. Publ. (en prensa).
- Echeverría, H.E., H.R. Sainz Rozas, y P.A. Barbieri. 2014. Maíz y sorgo. En: En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA, pp. 435-478.
- García, F.O., y N.I. Reussi Calvo. 2014. Trigo. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA, pp. 401-434.
- Gutiérrez Boem, F.H. y F. Salvagiotti. 2014. Soja. En: En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA, pp. 479-508.
- Gutiérrez Boem, F.H., Rubio, G., Barbero, D., 2011. Soil Phosphorus Extracted by Bray 1 and Mehlich 3 Soil Tests as Affected by the Soil/Solution Ratio in Mollisols. Soil Sci. Plant Anal. 42, 220–230.
- Jordan Meille, L., G.H. Rubæk, P.A. Ehlert, V. Genot, G. Hofman, K. Goulding, J. Recknagel, G. Provolo, y P. Barraclough. 2012. An overview of fertilizer-P recommendations in Europe: soil testing, calibration and fertilizer recommendations. Soil Use Manage. 28, 419-435.
- Mallarino, A.P., J.E. Sawyer, y S.K. Barnhart, S.K, 2013. A General Guide for Crop Nutrient and Limestone Recommendations I Iowa. Extension and Outreach Publications. Book 82.
- Mead, R., R.N. Curnow, y A.M. Hasted. 1993. Statistical methods in agriculture and experimental biology. Chapman and Hall, London.
- Poulton, P.R., A.E. Johnston, y R.P. White. 2013. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. Soil Use Manage. 29, 4-11.
- Rubio, G., F.H. Gutiérrez Boem, y M.J. Cabello. 2008. Estimating Available Soil Phosphorus Increases after Phosphorus Additions in Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 72, 1721-1727.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana argentina. RIA. 38, 33-39
- Sharpley, A., H.P. Jarvie, A. Buda, L. May, B. Spears, y P. Kleinman. 2013. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. J. Environ. Qual. 42, 1308-1326.
- Tang, X., Y. Ma, X. Hao, X. Li, J. Li, S. Huang, y X. Yang. 2009. Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. Plant Soil. 323, 143-151.
- Wingeyer, A.B., T.J.C. Amado, M. Pérez Bidegain, G.A. Studdert, C.H. Perdomo Varela, F.O. García, y D.L. Karlen. 2015. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. Sustainability. 7, 2213-2242.❖

Umbral de requerimiento de fósforo en suelos Argiudoles y guía para la fertilización de alfalfa (*Medicago sativa* L.)

María Alejandra Marino^{1,*} y Hernán Eduardo Echeverría¹

- Para alfalfa, la leguminosa forrajera más importante de la región pampeana argentina, se recalibró la relación entre la producción de materia seca y el fósforo (P) en el suelo.
- Con el umbral obtenido (18 mg kg¹ de P-Bray) se calibraron siete categorías de P-Bray y se confeccionaron guías para la fertilización y refertilización de alfalfa según el criterio de suficiencia, y de construcción y mantenimiento.
- Estas guías de fertilización permitirán un uso más racional de los fertilizantes fosfatados en pasturas de alfalfa.

Introducción

La alfalfa (Medicago sativa L.) es la leguminosa forrajera más importante para la producción de carne y leche en la región pampeana argentina, ocupando 4.7 millones de ha. Además, su participación en las rotaciones es valorada debido a su capacidad para incorporar nitrógeno al suelo a través de la fijación biológica (Basigalup, 2007). Los potenciales de producción de forraje en la época primavero-estivo-otoñal se acercan a las 20 t ha-1 año⁻¹, sin embargo las producciones logradas suelen ser inferiores debido en parte al efecto ocasionado por la deficiencias de nutrientes. En general, la disponibilidad de fósforo (P) en los suelos de la región (Sainz Rozas et al., 2012) resulta insuficiente para abastecer la demanda de pasturas de alfalfa de alta producción, por lo que la fertilización fosfatada es una práctica recomendada (Berardo y Marino, 2000). La aplicación de P en cantidades inadecuadas - ya sea por defecto (ganadería extensiva) o por exceso (ganadería intensiva) - ocasiona perjuicios productivos y ambientales (Weaver y Wong, 2011). Para decidir la aplicación de P se han desarrollado métodos de diagnóstico basados en el análisis de muestras de suelo (García et al., 2015).

El desarrollo de un método de diagnóstico de P requiere cumplir tres etapas: correlación, calibración e interpretación (Dahnke y Olson, 1990). En la primera se determina la asociación entre la producción de forraje (materia seca, MS) y la cantidad de P extraída por un determinado análisis de suelo. Para los suelos de la región pampeana, el método más empleado para estimar la disponibilidad de P para las plantas se basa en el extractante de Bray y Kurtz (1945). En esta etapa se determina el valor umbral (U) de P-Bray para distinguir entre sitios con y sin respuesta a la fertilización con P. Esto se ha realizado con varias ecuaciones matemáticas cuyos valores de U no son coincidentes y, por no cumplir con algunos supuestos, presentan falta de robustez y confiabilidad estadística (Marino y Echeverría, 2018). Para evitar estos inconvenientes, se desarrolló el método de la curva de calibración arcoseno-logaritmo ALCC (Dyson y Conyers, 2013) que cumple con los supuestos estadísticos. Además, la modificación efectuada por Correndo et al. (2017a), incorpora un componente de error que permite determinar el intervalo de confianza (IC) del U. Estos autores concluyen que el método ALCC modificado resulta una alternativa superadora para la estimación del U de P-Bray respecto a los otros métodos tradicionales. En la etapa de calibración se debe establecer la probabilidad de respuesta a la fertilización con P y calificar de manera cualitativa el resultado cuantitativo del análisis de suelo. Por último, en la etapa de interpretación se debe determinar la dosis de fertilizante a agregar para lograr el rendimiento objetivo, según el criterio de suficiencia o de construcción-mantenimiento (Mallarino, 2006). El criterio de suficiencia establece que existe respuesta significativa al agregado de P solo cuando el nivel de P-Bray es inferior al U y la dosis de fertilización fosfatada se determina buscando maximizar la eficiencia agronómica y el retorno de la inversión en fertilizante. Por su parte, el criterio de construcción y mantenimiento establece la necesidad de fertilización no sólo para maximizar el rendimiento, sino para incrementar el valor de P-Bray del suelo hasta un nivel óptimo en un plazo determinado (Mallarino, 2006).

En ensayos de fertilización fosfatada de alfalfa en el sudeste bonaerense se registraron respuestas significativas en la producción de MS. Un modelo exponencial permitió describir la relación entre el contenido de P-Bray y la producción de MS en Argiudoles. Según este modelo, la máxima producción de MS se alcanzó con contenidos de P-Bray entre 25 y 30 mg P kg⁻¹ (Berardo y Marino, 2000). Otros autores mencionan umbrales similares para suelos de Entre Ríos (Quintero et al., 1995). Según estos autores los niveles de P-Bray requeridos por pasturas de alfalfa para maximizar el rendimiento de forraje serían superiores a los de los cultivos de maíz y de trigo, lo que no coincide con lo señalado por Fixen y Grove (1990). En la actualidad se busca desarrollar estrategias de fertilización que permitan satisfacer la demanda de los cultivos y lograr el mayor beneficio productivo y económico minimizando el impacto ambiental (Cade-Menun et al., 2017).

Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Correo Postal Ruta 226 km 73,5. CC 276. (7620), Balcarce, Buenos Aires

^{*} Autor de contacto. Correo electrónico: marino.mariaa@inta.gob.ar

Se plantea determinar el U y el IC de P-Bray para la producción de MS de alfalfa en Argiudoles del sudeste bonaerense aplicando el método ALCC modificado, y confeccionar una guía de fertilización fosfatada para alfalfa que integre los requerimientos de la pastura con la oferta de P-Bray del suelo. Se espera mejorar la eficiencia de utilización de los fertilizantes fosfatados y, en sentido amplio, la sustentabilidad de los sistemas productivos.

Materiales y métodos

Resultados de experimentación con fertilización fosfatada en alfalfa, fueron obtenidos en la Unidad Integrada FCA -EEA INTA Balcarce (37° 45' Lat. Sur, 58° 18' Long. Oeste) en un suelo Argiudol típico con 10.3 mg kg⁻¹ de P, pH 6.2, y 6.4% de materia orgánica (Berardo y Marino, 2000). Se sembró alfalfa de corta latencia invernal ('GT 13 R Plus'), a razón de 10 kg ha⁻¹ de semilla viable, previamente inoculada con Rhizobium meliloti. Los tratamientos fueron: dosis de P aplicado al voleo a la siembra: 0, 25, 50 y 100 kg ha⁻¹ de P, (OP, 25P, 50P y 100P) y una de refertilización anual con 100 kg ha⁻¹ de Paplicado en otoño sobre una dosis inicial de 50 kg ha⁻¹ de P (50P+100P), utilizando como fuente fosfatada superfosfato triple (SFT, 46% de P₂O₅ o 20% de P). Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones por lo que se implementaron quince unidades experimentales (unidad experimental 2 x 6 m).

Las precipitaciones anuales variaron desde 636 mm a 945 mm (Figura 1A), pero en el periodo de mayor crecimiento de alfalfa (octubre a marzo), las precipitaciones fueron semejantes entre años y cercanas al promedio histórico (654 mm) (Figura 1A). Por su parte, la temperatura media del aire durante los periodos experimentales fueron menos variables que las precipitaciones y semejantes al promedio histórico (Figura 1B).

La producción anual de MS en 1995/96, 1996/97, 1997/98 y 1998/99 (cuatro cosechas por año efectuadas durante el periodo de crecimiento primavero-estivo-otoñal), se determinó por medio de cortes de la biomasa aérea realizados cuando el cultivo presentaba aproximadamente 10% de floración. Se recolectaron y pesaron los 6 m² centrales de cada parcela, utilizando una motosegadora automotriz (altura de corte = 2.5 cm). Para cada unidad experimental una muestra del forraje fue secada para estimar el porcentaje de MS y la producción de materia seca de forraje (Mg ha¹). Se calcularon los rendimientos relativos (RR) para cada unidad experimental y por año (acumulando los cuatro cortes) para las tres primeras campañas como:

RR = rendimiento observado / rendimiento máximo promedio *100

En otoño de cada año y para cada unidad experimental se extrajeron muestras de suelo (0 a 20 cm) para determinar el contenido de P (P-Bray).

El efecto de la fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de P en el suelo y su relación con la producción de MS

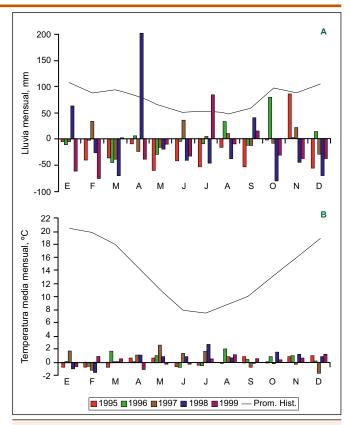


Figura 1. Desvíos de la lluvia mensual (barras) en mm (arriba) y desvíos de la temperatura diaria media mensual (barras) en °C (abajo) para 1995,1996, 1997, 1998, y 1999 con respecto a los valores promedios históricos de 45 años (líneas llenas) para Balcarce. Fuente: Agrometeorología EEA INTA Balcarce.

(expresada en términos de RR) fueron descriptos con el método ALCC modificado, para lo cual se relacionó el valor de RR en función del nivel de P-Bray.

El método ALCC (Dyson y Conyers, 2013), se estimó según una modificación al modelo original (Correndo et al., 2016), para lo cual se calculó el logaritmo natural de P-Bray (variable Y) y el ArcoSeno raíz cuadrada del RR (variable X). Se invirtió el sentido de la relación Y (In P-Bray) vs X (ArcoSeno RR) y se centraron los valores de X al 90% de RR de manera de obtener el U como parámetro de una función lineal. Para ello se estimó una regresión lineal bivariada por el método de ejes principales estandarizados (SMA):

In P-Bray = a + b ArcoSeno RR centrados

El valor de a es el ln U, que como está expresado en unidades logarítmicas, es necesario re-transformar las unidades originales mediante su recíproca. De la misma manera, la curva de ajuste corresponde a la recíproca de la función SMA. Se determinó el IC del U, con un nivel de confianza de 95%. El método ALCC se ajustó con paquete Excel (Correndo et al., 2017b) y se graficaron los residuales (RR observados menos RR predichos).

En la etapa de calibración se calificaron de manera cualitativa los resultados cuantitativos de P-Bray. Para ello se empleó la relación entre el RR y el valor de P-Bray descripta utilizando el método de ALCC modificado.

Se consideró que el rendimiento máximo económico se alcanza cuando el RR logra un valor de 90%. Luego, siguiendo las pautas de Mallarino (2006), se agruparon los suelos en categorías según la concentración de P-Bray: 1) muy baja concentración cuando el RR fuese menor al 60%, 2) baja concentración con RR entre el 60% y 85%, 3) óptima concentración con RR entre 85% y 93% mientras que las categorías 4 y 5 correspondieron a alta y muy alta concentración de P-Bray, siendo el rendimiento máximo. Adicionalmente, se incluyó una categoría de concentración de P-Bray excesiva que considera la posibilidad de pérdida de P por escurrimiento (Alfaro et al., 2009).

En la etapa de interpretación se siguieron los criterios de suficiencia y de construcción y mantenimiento.

1) Criterio de suficiencia

Se generaron recomendaciones de fertilización a partir de la relación entre la producción anual de forraje (RR) y el contenido de P-Bray en suelo según ALCC modificado. La respuesta relativa se expresó en MS y para estimar la demanda de P para la biomasa total de alfalfa, se consideró un incremento del 35% en concepto de biomasa de raíces (Khaiti y Lemaire, 1992). La respuesta en MS total se ponderó por el requerimiento de 2.5 kg de P por tonelada de MS. Este valor es la pendiente de la relación entre MS y P acumulado en la biomasa de alfalfa. Para expresar la recomendación en superfosfato triple de calcio (SFT, 0-20-0), la dosis de P se deberá multiplicar por 5. Para el segundo año y posteriores, la recomendación de refertilización se deberá determinar en función del P-Bray del suelo, independientemente del destino de la pastura.

2) Criterio de construcción y mantenimiento

Para el criterio de construcción y mantenimiento en primera instancia se deberá definir la producción de MS objetivo, que es la factible de ser obtenida sin deficiencia de P en condiciones de clima y manejo normales de producción. Cuando la categoría de P-Bray se encuentra en el IC, se fertilizará con la cantidad de P suficiente como para reponer el 50% de la MS objetivo de producción, ponderada por el requerimiento de P (2.5 kg de P por tonelada de MS). Según Baudracco et al. (2011), la eficiencia de cosecha bajo pastoreo, promedio regional para pasturas de alfalfa, es de 50% de la MS producida. Cuando el contenido de P-Bray es menor al IC, además de reponer el P exportado del sistema se deberá adicionar la cantidad de P necesaria para incrementar el contenido de P del suelo como para que en un periodo de cuatro años se logre llegar al U de P-Bray (18 mg kg⁻¹). De esta forma, para las categorías < 6, 6 a 9, 9 a 12 y 12 a 15 mg kg⁻¹, el incremento en P debería ser de 3, 2.25, 1.5 y 0.75 mg kg-1 por año, respectivamente. Considerando la escasa capacidad de fijación de P de los suelos Argiudoles del sudeste bonaerense, se consideró un valor de 6 kg P ha⁻¹ para incrementar un mg kg⁻¹ de P-Bray (Wyngaard et al., 2012).

Para el criterio de construcción y mantenimiento la cantidad de fertilizante fosfatado a aplicar en el segundo y tercer año, dependerá del destino de la producción. Si el destino es la recolección mecánica de forraje, sin discriminar entre las posibles alternativas (fardos, megafardo, rollo, etc.), la dosis a aplicar será la misma del primer año. Pero si el destino del forraje es el pastoreo, se debería reducir en un 30% la dosis del primer año por la menor exportación de P del sistema.

Resultados y discusión

La aplicación de 100 kg P ha⁻¹ incrementó (P < 0.05) la producción de forraje en 101, 72, 51 y 45% en el primero, segundo, tercer y cuarto año, respectivamente (**Tabla 1**) (Berardo y Marino, 2000). En el primer año la mayor producción de forraje se registró con la dosis de 100 kg P ha⁻¹, y en los años posteriores esta dosis no difirió significativamente del tratamiento con refertilización anual (**Tabla 1**). Estas producciones concuerdan y aún superan a las obtenidas en otras zonas productoras (Quintero et al., 1995; Cangiano, 2002).

Correlación

El método ALCC modificado (Correndo et al., 2017b), permitió explicar el 87% de la variación del RR de alfalfa en función del contenido de P-Bray, lo que permitiría estimar la respuesta relativa de la pastura al agregado de P (Figura 2). Según este método, el U para lograr 90% del RR fue de 18 mg kg⁻¹ de P-Bray. A diferencia de los métodos de regresión habitualmente utilizados, el ALCC modificado presenta un aceptable grado de dispersión de los residuos, particularmente a concentraciones bajas de P (Marino y Echeverría, 2018), por lo que la estimación del U es más confiable en términos estadísticos (Figura 2). Además, este método permitió determinar un IC de P-Bray, con un nivel de confianza del 95%, con límite inferior y superior de 15.8 y 20.1 mg kg⁻¹ de P-Bray, respectivamente. Resultados coincidentes en el U fueron reportados para pasturas de alfalfa implantadas en Argiudoles ácuicos de Entre Ríos (Pautasso y Barbagelata, 2017). Estos autores emplearon también el método ALCC modificado pero en suelos de textura más fina y con condiciones climáticas que difieren de las de Balcarce. A pesar de las diferencias en las

Tabla 1. Producción anual de materia seca de alfalfa en función de las dosis de P aplicado.

	1º año	2º año	3º año	4º año	
Dosis P		kg ha ⁻¹			
0	10 047 c	9 105 c	7 599 c	8 212 b	
25	14 267 b	11 792 bc	9 144 bc	10 001 b	
50	16 000 b	12 905 ab	9 316 bc	9 049 b	
100	20 240 a	15 620 a	11 454 ab	11 929 ab	
50+100		14 973 ba	14 406 a	15 324 a	

Valores seguidos por diferentes letras dentro de cada año indican diferencias significativas entre tratamientos. Test de Duncan (P = 0.05).

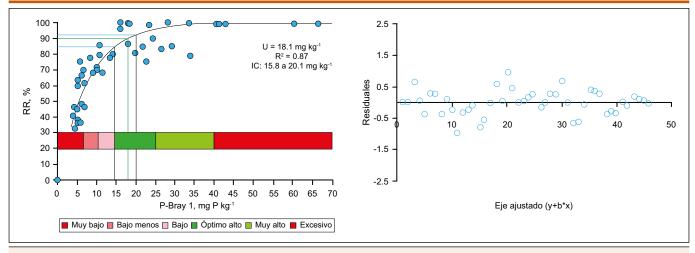


Figura 2. Umbral (U, línea vertical verde), intervalo de confianza (IC, líneas verticales negras) y coeficiente de regresión (R²) entre el rendimiento relativo (RR) de alfalfa y el fósforo Bray en el suelo (P-Bray) según el método ALCC modificado. Los valores de los residuales corresponden a la regresión de las variables transformadas y las unidades de Yobs-Ypred son logarítmicas. Eje X ajustado según (Warton et al., 2006). La barra de colores indica las categorías de concentración de P-Bray.

características de suelo y clima, el U (18 mg kg⁻¹) y el IC (14.8 - 22.1 mg kg⁻¹) fueron similares a los de este trabajo, lo que avalaría los resultados obtenidos.

El método ALCC modificado estimó un menor U que los métodos de ajuste usados anteriormente, esta sobre estimación del U mediante el cálculo con modelos de regresión respecto del método ALCC coincide con lo reportado por Dyson y Conyers (2013). Según los resultados del presente estudio y los de Pautasso y Barbagelata (2017), el U de P-Bray para pasturas de alfalfa no difiere del correspondiente al cultivo de trigo (17.2 mg kg⁻¹, IC 15.2 a 19.6 mg kg⁻¹; Correndo et al., 2016) y es superior al de soja (10.5 mg kg⁻¹, IC 9.6 a 11.4) y al de maíz (9.9 mg kg⁻¹, IC 9.1 a 10.9) (Correndo et al., 2018) (Figura 3). Esto coincide con lo señalado por Fixen y Grove (1990). El menor U determinado por el ALCC modificado respecto a los métodos de ajuste usados anteriormente justifica realizar ajustes en la calibración e interpretación de los niveles de P-Bray. Esto sugiere que para igual nivel de P-Bray se requieren menores dosis de fertilización, lo cual contribuiría a incentivar la difusión de esta práctica en una amplia región caracterizada por

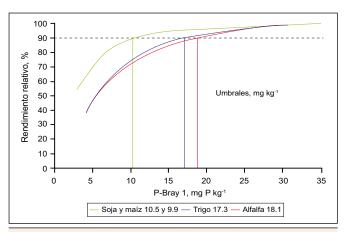


Figura 3. Umbrales críticos de P-Bray para cultivos de soja y maíz (línea verde, Correndo et al., 2018), trigo (línea azul, Correndo et al., 2016) y alfalfa (línea roja, Marino y Echeverría, 2018).

muy bajas concentraciones de P en el suelo (Sainz Rozas et al., 2012). Si bien en términos estrictos, la división en categorías de P-Bray es válida para condiciones climáticas y edáficas similares a las empleadas en esta experiencia, la coincidencia en el U y el IC determinados por Pautasso y Barbagelata (2017), sugieren que sería factible extrapolar los mismos a otros ambientes de la región pampeana.

Calibración

La definición del IC de P-Bray para pasturas de alfalfa, según el método de ALCC modificado (mínimo 15.8 y máximo 20.1 mg kg⁻¹), permite calificar como óptimo dicho rango de concentración, puesto que permite maximizar la producción de materia seca de alfalfa (90% de RR). En dicho rango la probabilidad de respuesta al agregado de P es solo marginal (10%, **Figura 2**) y cuestionable en términos económicos (Barbazán y García, 2015). Por debajo del valor mínimo del IC y hasta 7 mg kg⁻¹, la concentración de P-Bray fue calificada en primera instancia como baja y la probabilidad de incrementar el rendimiento por el agregado de P sería elevada (según el modelo ALCC entre 15% y 40%). En función de la amplitud de este rango de respuesta, se consideró conveniente dividirlo en dos subcategorías: bajo de 11 a 15.8 mg kg-1 de P-Bray o sea de 15% a 27.5% de respuesta en rendimiento, y bajo menos de 7 a 11 mg kg⁻¹ de P-Bray o sea de 27.5% a 40% de respuesta en rendimiento. Por debajo de 7 mg kg⁻¹, la concentración se calificó como muy baja y la respuesta por fertilización sería muy elevada (> 40%).

Por otra parte, cuando la concentración de P-Bray fue superior al valor máximo del IC y hasta 25 mg kg⁻¹, la calificación de concentración es alta y la respuesta al agregado de P sería menor al 5%. Entre 25 y 40 mg kg⁻¹ el rango fue calificado como muy alto y la respuesta a P es prácticamente nula (< 1%). Por encima de 40 mg kg⁻¹, la calificación fue excesiva puesto que podría existir riesgo de pérdida de P desde el suelo a los sistemas acuáticos (Zamuner et al., 2015), afectando la calidad del ambiente si se fertilizara con P (Figura 2).

En síntesis, en la etapa de calibración se definieron siete categorías de concentración de P-Bray asociadas a la probabilidad de respuesta al agregado de P y al eventual impacto ambiental por su excesiva concentración (Figura 2).

Interpretación

La producción de MS de alfalfa varía en función de factores climáticos, edáficos y de manejo en un amplio rango con valores de 10 a 20 t MS ha-1 (Cangiano, 2002; Basigalup, 2007), por lo que la correcta definición del objetivo de producción es clave para un acertado diagnóstico de requerimiento de P. Según lo determinado por el método ALCC, el P-Bray determina el RR de la alfalfa (Figura 2) y a su vez permite estimar la respuesta relativa a la fertilización con P como la diferencia al 90% de RR (Tabla 2). Como es lógico, la respuesta relativa disminuye con el incremento en el P-Bray del suelo. La respuesta en producción de MS sigue igual tendencia y se incrementa a medida que aumenta el objetivo de rendimiento de la pastura de alfalfa. Una vez determinada la respuesta en MS de alfalfa, la aplicación del criterio de suficiencia para estimar la dosis de P considera un incremento del 35% en MS por la biomasa de raíces (Khaiti y Lemaire, 1992) y un requerimiento de 2.5 kg P Mg⁻¹ de MS. En la Figura 4 se observa que la dosis de SFT aumenta con la cantidad de MS objetivo de producción y disminuye con el aumento en el contenido de P-Bray. Según este criterio, solo se recomienda fertilizar cuando los valores de P-Bray están por debajo del U e implica aplicar la mínima cantidad de P a la siembra, que permita maximizar la rentabilidad (Mallarino, 2006). El criterio de suficiencia puede conducir al agregado de cantidades que no cubran la exportación del nutriente en el sistema y generar balances negativos de P en el suelo.

Para el criterio de construcción y mantenimiento y para contenidos de P-Bray en el IC, se considerará la MS consumida (50% del objetivo de producción) y el requerimiento de P (2.5 kg de P por tonelada de MS). En la medida que los contenidos de P-Bray disminuyen, se deberá incrementar las dosis de P como para que en 4 años se logre aumentar el P-Bray del suelo hasta el valor U (18 mg kg⁻¹). El aumento será de 3, 2.25, 1.5 y 0.75 mg kg⁻¹ de P por año, para las categorías de P-Bray < 6, 6 a 9, 9.1 a 12 y 12.1 a 15 mg kg⁻¹, respectivamente. Para ello

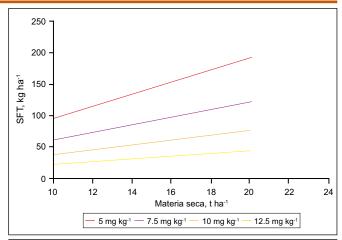


Figura 4. Recomendación de fertilización fosfatada de pasturas de alfalfa según el criterio de suficiencia en función del objetivo de producción de materia seca y el P-Bray en Argiudoles. SFT: superfosfato triple de calcio.

se deberá agregar 6 kg P por mg de P-Bray (Wyngaard et al., 2012). En la **Figura 5A** se observa que las dosis de SFT para igual producción objetivo de MS son superiores según el criterio de construcción y mantenimiento en relación al de suficiencia (**Figura 4**). La diferencia en las dosis disminuye con el aumento de P-Bray y con la disminución de la MS objetivo.

El criterio de construcción y mantenimiento es aplicable en suelos que no fijan P, como los de la región pampeana y las planicies de EE.UU. (Dodd y Mallarino, 2005). La mayoría de estos suelos no presentan propiedades que transformen significativamente el P de los fertilizantes en formas no disponibles. El P es retenido en el suelo, pero esto no significa fijación en formas no disponibles para las plantas. Aunque generalmente se menciona que entre 20 - 30% del P del fertilizante es absorbido en el primer año de la aplicación, el resto se convierte en formas disponibles en años subsiguientes, lo que implica un efecto residual de al menos 3 ó 4 años (Wyngaard et al., 2012). Otra consecuencia relevante en suelos con poca capacidad de fijación de P, es que los métodos de colocación de los fertilizantes fosfatados (localizado, en bandas o voleo) no mejoran en la práctica la captación de dicho nutriente (Berardo et al., 2007; Barbieri et al., 2014). La baja capacidad de fijación de P en los Argiudoles

Tabla 2. Rendimiento relativo (RR) y respuesta relativa según el método ALCC y respuesta en materia seca (MS) para distinta producción objetivo de alfalfa según el P-Bray en Argiudoles.

P-Bray	RR	Respuesta relativa	Respuesta er	n MS para producciór	objetivo de:
mg kg ⁻¹	%	%	12 t ha ⁻¹	15 t ha ⁻¹	18 t ha ⁻¹
				kg ha ⁻¹	
5	46	44	5280	6600	7920
7.5	62	28	3360	4200	5040
10	72.5	17.5	2040	2550	3060
12.5	80	10	1200	1500	1800
15	85	5	600	750	900
20	90	0	0	0	0

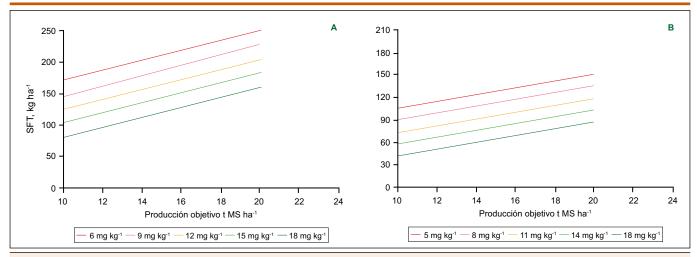


Figura 5. Recomendación de fertilización (A) y de refertilización (B) fosfatada de pasturas de alfalfa según el criterio de construcción y mantenimiento en función del objetivo de producción de materia seca (MS) y el P-Bray en Argiudoles. SFT: Superfosfato triple de calcio.

no solo justifica el efecto residual de P, sino que además justifica la práctica de la refertilización al voleo con SFT o fertilizantes similares.

Para el segundo y tercer año de producción de la pastura, si el destino es el corte y la cosecha mecánica de forraje la dosis de fertilizante deberá ser la misma que se aplicó el primer año según el criterio de construcción y mantenimiento (Figura 5A). Pero si la utilización del forraje es bajo pastoreo, se deberá reducir la dosis del primer año en aproximadamente 30% (Figura 5B). Esta diferencia radica en la disminución de la exportación de P cuando el destino del forraje fuese el consumo por pastoreo como consecuencia de: a) que aproximadamente 15% del P tomado por la planta es retornado al suelo con el forraje no consumido por los animales (Simpson et al., 2011), y b) el retorno de P al suelo a través de las deyecciones (Alfaro et al., 2009). Esto reduce la exportación de P del sistema y permite disminuir las dosis a aplicar. Es válido recordar que la producción de 1000 kg de carne exporta tan solo 7 kg P ha-1 (Alfaro et al., 2009). De todos modos, el monitoreo del nivel de P-Bray al tercer o cuarto año de implantada la pastura, permitirá hacer ajustes de las dosis a aplicar por refertilización. Es válido reiterar que el criterio de suficiencia optimiza la eficiencia agronómica y el retorno de la inversión en fertilizante. Por su parte, el criterio de construcción y mantenimiento asegura lograr el máximo rendimiento y a su vez incrementa el valor de P-Bray del suelo (Mallarino, 2006).

Para finalizar la decisión por el criterio de suficiencia o de construcción y mantenimiento depende de cuestiones particulares de cada situación productiva, como el tipo de sistema de producción, el costo de oportunidad, las relaciones de precios, el régimen de tenencia de la tierra, etc. (Simpson et al., 2011). Las dosis que surgen de estos criterios difieren en algunos casos de manera significativa y por ello en la práctica también serían válidas alternativas intermedias. De todos modos, el contar con guías para determinar la dosis de fertilización y refertilización permitirá efectuar un uso racional de los fertilizantes fosfatados, y contribuir a la sostenibilidad del recurso suelo y a la sustentabilidad de los sistemas productivos.

Conclusiones

Para pasturas de alfalfa en suelos Argiudoles, el U de P-Bray en el suelo requerido para lograr el 90% del rendimiento

Ejemplos de estimación de recomendación de fertilización

1) Criterio de suficiencia

- Rendimiento objetivo de 16 t MS y nivel de P-Bray de 5 mg kg⁻¹.
- La respuesta relativa es del 44% o sea 7 t MS.
- A esta respuesta en MS aérea, se suma un incremento de 35% para cubrir el desarrollo de raíces (7 t * 0.35 = 2.45 t MS). El total de MS sería de 9.45 t MS.
- Considerando una demanda de 2.5 kg P por t MS, se recomendarían 23.6 kg P o sea 118 kg SFT.

2) Criterio de construcción y mantenimiento

- Rendimiento objetivo de 16 t MS bajo pastoreo y suelo de P-Bray de 11 mg kg⁻¹.
- La reposición del P para mantenimiento es de 14 kg P (16 t MS * 50% eficiencia de cosecha * 2.5 kg P t⁻¹* 70% eficiencia de pastoreo).
- Para construir el P-Bray de 11 a 18 mg kg⁻¹, en el primer año se considera una aplicación de P de como para subir 1.5 mg kg⁻¹ por año, es decir una aplicación de 9 kg P ha⁻¹ (1.5 mg kg⁻¹* 6 kg P por mg kg⁻¹).
- El total a aplicar sería de 23 kg P ha⁻¹ (14 kg P de mantenimiento + 9 kg P de construcción), o sea unos 115 kg SFT.

máximo es de 18 mg kg⁻¹. En base a esto se calibró la concentración de P-Bray y se confeccionaron guías para determinar la dosis de fertilización y refertilización de pasturas de alfalfa según los criterios de suficiencia y de construcción y mantenimiento.

Agradecimiento

Al Ing. Agr. M. Sc. Adrián Correndo quien proporcionó el programa en Excel para correr el método ALCC modificado, como así también los comentarios sobre los alcances del mismo.

Bibliografía

- Alfaro, M., F.S. Salazar, O. Oenema, S. Iraira, N. Teuber, L. Ramirez, y D. Villarroel. 2009. Nutrient balances in beef cattle production systems and their implications for the environment. J. Soil Sci. Plant Nutr. 9(1):40-54.
- Barbazán, M., y F.O. García. 2015. Evaluación de la fertilidad y recomendaciones de fertilización. pp. 379-399. En: H.E. Echeverría, y F.O. García (eds.). En Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. 904 p.
- Barbieri, P.A., H.R. Sainz Rozas, F. Covacevich, y H.E. Echeverría. 2014. Phosphorus placement effects on phosphorous recovery efficiency and grain yield of wheat under no-tillage in the humid pampas of Argentina. International Journal of Agronomy. 2014, 12 p. http://dx.doi.org/10.1155/2014/507105
- Basigalup, D.H. 2007. El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Ed. Daniel H. Basigalup Buenos Aires: Ediciones INTA. 479 p.
- Baudracco, J., N. López Villalobos, L.A. Romero, D. Scandolo, M. Maciel, E.A. Comeron, C.W. Holmes, y T.N. Barry. 2011. Effects of stocking ratio on pasture production, milk production and reproduction of suplemented crossbred Holstein-Yersey dairy cows grazing lucerne pasture. Animal Feed Science and Technology. 168:131-143.
- Berardo, A., y M.A. Marino. 2000. Producción de forraje de alfalfa bajo diferentes niveles de nutrición fosfatada en el sudeste bonaerense. Rev. Arg. de Prod. Anim. 20(2):93-101.
- Berardo, A., M.A. Marino, y S. Erht. 2007. Producción de forraje de alfalfa con aplicación de fósforo superficial y profunda. Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA), 36(1):97-114.
- Bray, R.H., y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science. 59:39-45.
- Cade-Menun, B.J., D.G. Doody, C.W. Liu, y C.J. Watson. 2017. Long-term changes in grassland soil phosphorus with fertilizer application and withdrawal. J. Environ. Qual. 46:537-545 (2017). doi:10.2134/jeq2016.09.0373.
- Cangiano, C. 2002. Capítulo 6. Rendimiento y persistencia de cultivares. En: Manual de alfalfa. 2da impresión 2011. Ed. Carlos A. Cangiano. Ediciones INTA. CD. ISBN 987-521-058-7.
- Correndo, A.A., F.H. Gutiérrez-Boem, F. Salvagiotti, y F.O. García. 2016. The modified arcsine-logarithm methodology for analyzing soil test–relative yield relationships. Phoenix, AZ, EE.UU., 2016 ASA-CSSA-SSSA Meeting.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017a. A modification of the arcsine—log calibration curve for analysing soil test value—relative yield relationships. Crop & Pasture Science 68 (3) 297-304. doi.org/10.1071/CP16444.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017b. https://www.researchgate.net/publication/317953836_Modified_ALCC_Excel_Tool

- 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. CLAP 2018. I Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión. 11-13 de Abril, 2018. Santiago, Chile. DOI: 10.13140/RG.2.2.28706.73922.
- Dahnke, W.C., y R.A. Olson. 1990. Soil test correlation, calibration and recomendation. p. 45-71. In R.L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America Book Series Nº3. SSSA, Madison, WI.
- Dodd, J.R., y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1118-1128.
- Dyson, C.B., y M.K. Conyers. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. Crop & Pasture Science 64:435–441. doi.org/10.1071/CP13009.
- Fixen, P.E., y J.H. Grove. 1990. Testing soil for phosphorus. p. 141-180. In R.L. Westerman (ed.). Soil testing and plant analysis. Soil Science Society of America Book Series №3. SSSA, Madison, WI.
- García, F.O., L.I. Picone, e I.A. Ciampitti. 2015. Capítulo 8: Fósforo. pp. 229-264. En: H.E. Echeverría, y F.O. García (eds.). En Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. 904 p.
- Khaiti, M., y G. Lemaire. 1992. Dynamics of shoot and root growth of Lucerne after seeding and after cutting. Eur. J. Agron. 1:241–247.
- Mallarino, A.P. 2006. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continúa con maíz y soja en el cinturón del maíz. Revista Fertilizar 5:10-20. Fertilizar Asociación Civil. Buenos Aires, Argentina.
- Marino, M.A., y H.E. Echeverría. 2018. Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa* L.) en Argiudoles. Agriscientia Vol 35:11-24.
- Pautasso, J.M., y P.A. Barbagelata. 2017. Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 26:13-16. http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.f/0/8865252DFED8378 60325815D00631784/\$FILE/13.pdf
- Quintero, C., N. Boschetti, y R. Benavidez. 1995. Fertilización fosfatada de pasturas en implantación en suelos de Entre Ríos. Ciencia del Suelo 13:60-65.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H.P. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA). 38:33-39.
- Simpson, R.J., A. Oberson, R.A. Culvenor, M.H. Ryan, E.J. Veneklaas, H. Lambers, J.P. Lynch, P.R. Ryan, E. Delhaize, F.A. Smith, S.E. Smith, P.R. Harvey, y A.E. Richardson. 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. Plant Soil 349:89–120. doi: 10.1007/s11104-011-0880-1.
- Warton, D. I., Wright, I. J., Falster, D. S. y Westoby, M. (2006). Bivariate line-fitting methods for allometry. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 81, 259-291. doi:10.1017/ S1464793106007007
- Weaver, D.M., y M.T.E. Wong. 2011. Scope to improve phosphorus (P) management and balance efficiency of crop and pasture soils with contrasting P status and buffering indices. Plant Soil. 349:37-54
- Wyngaard, N., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, y G.A. Divito. 2012. Fertilization and tillage effects on soil properties and maize yield in a Southern Pampas Argiudoll. Soil & Tillage Research. 119:22-30. ISSN: 0167-1987. doi: 10.1016/j.still.2011.12.002.
- Zamuner E.C., J. Lloveras, y H.E. Echeverría. 2015. Métodos agronómicos y ambientales de determinación de fósforo en Argiudoles del sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo 33(1):55-63. ❖

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

Gonzalo Pérez1* 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 sitioespecíficos. 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**:

$$NVDI = (RNIR - RR) (RNIR + RR)^{-1}$$
 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 descriptos 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

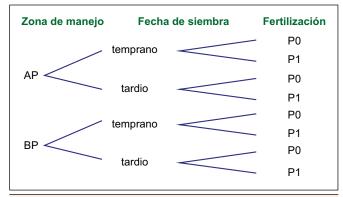


Figura 1. Esquema del ordenamiento en el análisis comparativo de los rendimientos de maíz y de soja. AP = Alta productividad aparente, BP = Baja productividad aparente.

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 Barnetche.

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

fortilizado con cuparfocíato triplo (0.20.0) a razón do 75

yfertilizado 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⁻; 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

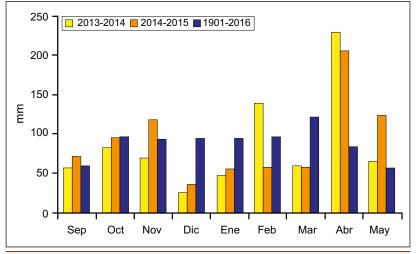


Figura 2. Precipitaciones ocurridas durante el desarrollo de los ensayos. Campañas 2013-14, 2014-15 e históricas. Servicio Meteorológico, delegación Bolívar.

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).

$$Y = a + b x + c x^2 si x < C; Y = P si x > C$$
 Ec. 2

dónde Y es el rendimiento relativo expresado en porcentaje y x el nivel de P extractable (mg kg¹); 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

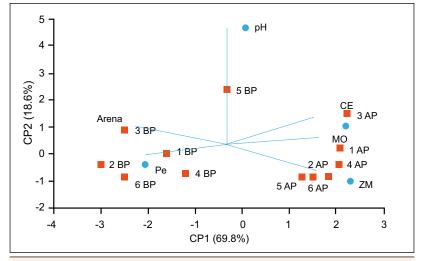


Figura 3. Gráfico biplot representando espacialmente los 2 componentes que explican en una mayor proporción la relación entre las variables. (69.8%) CP1 = Componente principal 1, (18.6%) CP2 = Componente principal 2, ZM = Zona de manejo, MO = Materia orgánica (%), Pe = Fósforo extractable (ppm), CE =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

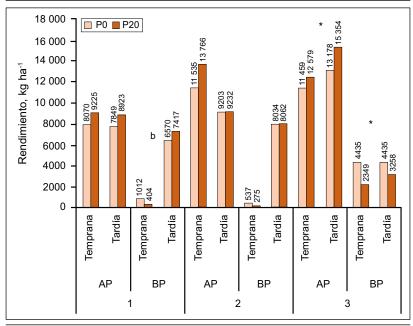


Figura 4 . Rendimiento del cultivo de maíz para 3 sitios, 2 zonas de manejo (AP y BP), 2 fechas de siembra (Temprana y Tardía) y 2 niveles de fertilización (Temprano y Tardío). Letras diferentes muestran interacción ZM y FS dentro de cada lote. (*) representa interacción ZM y fertilización.

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 tempana. 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.

Soia

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.

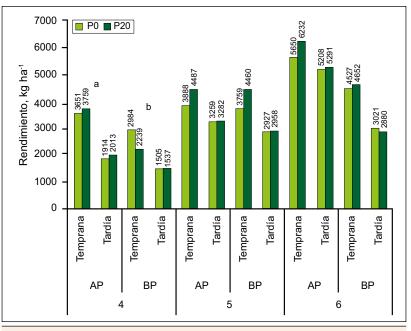


Figura 5. Rendimiento del cultivo de soja para 3 lotes, 2 zonas de manejo (AP y BP), 2 fechas de siembra (Temprana y Tardía) y 2 niveles de fertilización (Temprano y Tardío). Letras diferentes muestran interacción en ZM y FS.

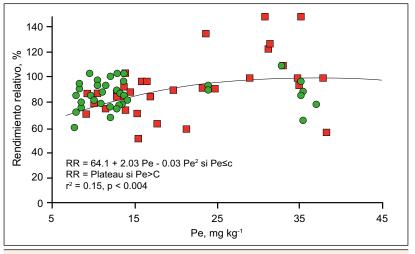


Figura 6. Relación entre rendimientos relativo al máximo de cada tratamiento al fertilizar con P en los cultivos de maíz y de soja en 62 ambientes de la subregión pampa arenosa según los niveles extractables de P en los suelos. Cuadrados = Maíz, Círculos = Soja.

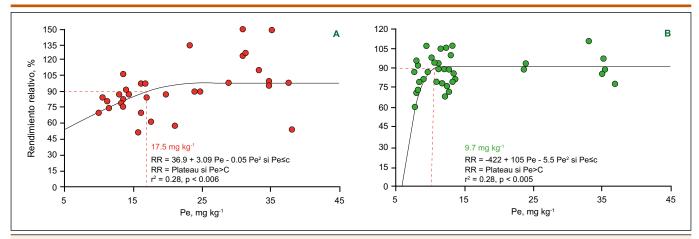


Figura 7. Relación entre rendimientos relativo al máximo fertilizado al fertilizar con fósforo en los cultivos de maíz y de soja en 62 ambientes de la subregión pampa arenosa según los niveles extractables de P en los suelos. A = Maíz, B = Soja.

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	СМ	F	р
Cultivos	Maíz	17.266	31	34	3			
Cultivos	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. Gutierrez 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 proprieties. 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 Usandivaras¹,#, 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 descripto 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 intercepción 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).

$$A_0 = A_0 \exp \left[-b (X_0 - X_0)^2 + c (X_0 - X_0)^3\right]$$
 Ec. 1

dónde A es el área de la hoja en la posición n, A es el área de la hoja más grande, X₀ 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

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

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

Asesor independiente

² FAUBA, INBA-CONICET

³ EEA INTA Oliveros

senescencia foliar aumenta (Tollenaar y Daynard, 1982; Uhart y Andrade, 1995). El rol de una deficiencia de P o K sobre la senescencia foliar ha sido menos estudiado. Algunos estudios en maíz muestran una reducción de la senescencia (Colomb et al., 2000), mientras que otros no observaron ningún efecto de una deficiencia de P (Plenet et al., 2000; Fletcher et al., 2008). Otros estudios en maíz sometido a una deficiencia de K mostraron efectos insignificantes sobre la senescencia foliar en estadios tempranos del desarrollo (Jordan-Meille y Pellerin, 2004).

En condiciones de producción, el crecimiento del cultivo puede estar limitado por más de un nutriente en forma simultánea. En los casos donde el crecimiento puede estar afectado por la interacción de dos nutrientes, los resultados de estudios con una sólo nutriente pueden tener una utilidad limitada para estimar la respuesta a deficiencias múltiples.

El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la deficiencia de P, K y su interacción sobre el desarrollo del área foliar en el cultivo de maíz. Dado que el P y el K tienen baja movilidad en el suelo, la principal hipótesis de trabajo fue que ambas deficiencias mostrarían efectos similares, reduciendo la formación del área foliar al comienzo del ciclo del cultivo, sin mayores efectos en la senescencia de las hojas.

Materiales y métodos

Experimentos y tratamientos

Se realizaron dos experimentos en la EEA INTA Mercedes (Corrientes, Argentina), en dos años consecutivos. Los tratamientos consistieron en la combinación de tres dosis de P (0, 40 y 60 kg P ha⁻¹, P0, P1 y P2) y K (0, 45 y 75 kg K ha⁻¹, K0, K1 y K2). Las dosis más bajas y más altas se combinaron en un factorial completo (POKO, POK2, P2K0 y P2K2), mientras que las intermedias (P1 y K1) se combinaron sólo con el nivel más alto del otro nutriente (P1K2 y P2K1). Estos seis tratamientos se dispusieron en cuatro bloques completos aleatorizados. Las parcelas tuvieron un ancho de ocho (Experimento 1) o seis (Experimento 2) surcos, con una distancia entre surcos de 70 cm, y un largo de 15 m. El K (KCl) y el P (superfostato triple) fueron aplicados al voleo una semana antes de la siembra. Todos los tratamientos recibieron 200 kg N ha-1 (urea), la mitad a la siembra y la otra mitad en V6 (estado de 6 hojas), para prevenir deficiencias de N. Ambos experimentos fueron regados, manteniendo el contenido de agua del suelo cercano a capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo. Se usó el híbrido DK747VT3P (Monsanto Argentina) en los dos experimentos. El cultivo previo en los dos experimentos fue una pastura de gramíneas degradada. La densidad de plantas a la cosecha del cultivo de maíz fue de 6.8 (Experimento 1) y 7.3 (Experimento 2) plantas por m². Ambos experimentos se realizaron sobre la misma serie de suelo (Argiudol típico, serie Puesto Colonia). El análisis de suelo (0 a 20 cm) mostró una disponibilidad de P (Bray-1) de 5.5 y 5.0 ppm, una disponibilidad de K (acetato de amonio) de 51 y 47 ppm, y un pH (1:2.5) de 5.5 y 5.8, en el **Experimento 1** y **2**, respectivamente. Se controlaron malezas y plagas, y se aplicaron fungicidas en V10 para evitar enfermedades foliares.

Determinaciones y análisis de los datos

En cada parcela se eligieron 10 plantas consecutivas (homogéneas en tamaño y desarrollo), y sobre ellas se realizaron las determinaciones de aparición de hojas, área foliar y senescencia (ver detalles en Arias Usandivaras et al., 2018). El área foliar total se calculó como la suma de las áreas foliares individuales (ILA) de las hojas verdes y senescentes. La senescencia se expresó como una fracción del área foliar total (FSLAI = LAI senescentes / área foliar total). El GLAI se estimó como la diferencia entre el área total y la senescente.

Se calculó el tiempo térmico (°C d) desde la emergencia usando una temperatura base de 8 °C. La LAR se calculó como la pendiente de la relación linear entre el número de hojas visibles y el tiempo térmico. (Ecuación 2).

Hojas visibles =
$$1 + LAR x$$
 Ec. 2

dónde x es el tiempo térmico.

La progresión de la senescencia se describió utilizando una función exponencial. (Ecuación 3).

$$FSLAI = Y_0 e^{kx}$$
 Ec. 3

dónde k es la tasa relativa de senescencia, y x el tiempo térmico.

Se utilizó la **Ecuación 1** para describir la distribución del área foliar a lo largo del tallo. Para estas tres funciones ajustadas, se compararon los parámetros para los distintos tratamientos con un test de F. Cuando la diferencias entre tratamientos no fue significativa, se utilizó una sola función para esos tratamientos.

Para evaluar el efecto de las deficiencias de P y K sobre el crecimiento del cultivo, se realizaron cosechas de biomasa aérea en cinco (V5, V12, R1, R2 y R6) y seis (V4, V6, V11, R1, R2 y R6) estadios fenológicos del cultivo en el **Experimento 1 y 2**, respectivamente. Luego de madurez fisiológica, se determinó el rendimiento en grano cosechando un área de 5 m² y separando los granos con una trilladora estacionaria. El rendimiento se expresó con una humedad del 14%.

Se realizó un ANVA para el número final de hojas y el GLAI. Para evaluar los efectos principales de P y K, y la interacción P*K se realizaron tres contrastes ortogonales:
1) Efecto principal de P: POKO y POK2 vs. P2KO y P2K2, 2) Efecto principal de K: POKO y P2KO vs. POK2 y P2K2, 3) Interacción P*K: P2K2 y POKO vs. POK2 y POK2.

Resultados

Crecimiento y rendimiento

A madurez fisiológica, el cultivo en el tratamiento P2K2 acumuló 18 600 y 19 900 kg ha⁻¹ de biomasa aérea en

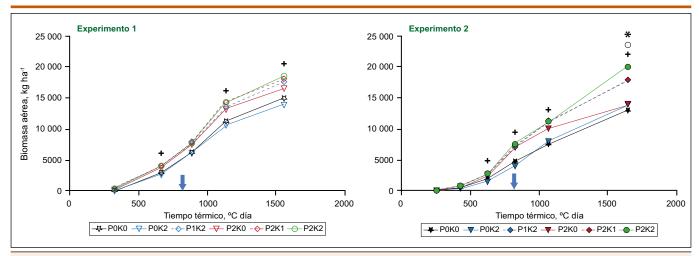


Figura 1. Biomasa aérea en función del tiempo térmico desde emergencia hasta madurez fisiológica en maíz, bajo distintos niveles de fertilización con P y K en los dos experimentos. En cada muestreo, cruces negras indican diferencias significativas entre P2K2 y P0K2 (ejemplo, efecto de P), círculos indican diferencias significativas entre P2K2 y P2K0 (ejemplo, efecto de K), y asteriscos indican interacción P*K significativa. Las flechas indican aparición de estigmas.

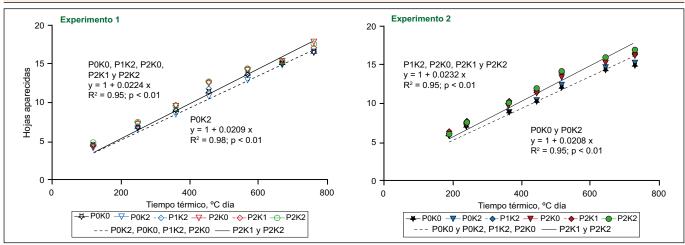


Figura 2. Número de hojas visibles en función del tiempo térmico en ambos experimentos. Los tratamientos que no mostraron diferencias en esta relación fueron agrupados en una función común (líneas rectas).

Tabla 1. Rendimiento en grano de maíz.

Tratamientos	Experimento 1	Experimento 2
РОКО	7099 a	7298 a
P0K2	7092 a	7340 a
P1K2	8858 b	9532 b
P2K0	8759 b	6817 a
P2K1	9269 b	9733 b
P2K2	9577 b	10 515 b
Efecto tratamientos	< 0.01	< 0.01
Contrastes		
Efecto P	< 0.01	< 0.01
Efecto K	0.26	< 0.01
Interacción P*K	0.26	< 0.01

el Experimento 1 y 2, respectivamente. No aplicar P (ejemplo, POK2 vs. P2K2) disminuyó el crecimiento desde el comienzo del ciclo del cultivo en los dos experimentos (Figura 1). La mayor diferencia relativa fue en V5 en el Experimento 1 (una reducción del 57%), y de V6 a R1 en el Experimento 2 (una reducción del 46%). A madurez fisiológica, la no aplicación de P (POK2 vs P2K2) redujo la acumulación de biomasa un 24 y 31% y el rendimiento en grano un 26 y 30% en el Experimento 1 y 2, respectivamente (Figura 1, Tabla 1). La omisión de la aplicación de K (ejemplo, P2KO vs. P2K2) no produjo efectos sobre la acumulación de biomasa en el Experimento 1, pero en madurez fisiológica se observó una tendencia a una menor acumulación de biomasa aérea (reducción del 11%, p < 0.08), sin efectos sobre el rendimiento en grano. En el Experimento 2, la deficiencia de K provocó una disminución de la biomasa aérea de 30%, y del rendimiento en un 35% (Figura 1, Tabla 1).

Aparición y tamaño de las hojas

La LAR en el tratamiento P2K2 fue similar en los dos experimentos. La deficiencia de P (P0K2 vs. P2K2) disminuyó la LAR en 7% en el **Experimento 1 (Figura**

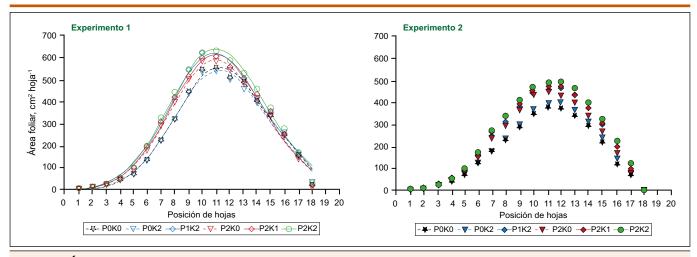


Figura 3. Área individual de cada hoja en función de la posición de la hoja en el tallo en ambos experimentos. Los parámetros de las funciones ajustadas y su análisis estadístico se muestran en la Tabla 2.

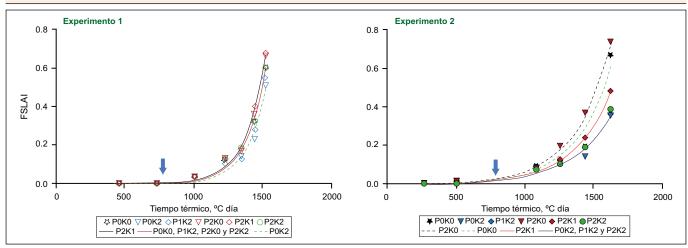


Figura 4. Fracción del índice de área foliar senescida (FSLAI) en función del tiempo térmico en ambos experimentos. Los tratamientos que no mostraron diferencias entre sí se agruparon en una sola función. La flecha indica el momento de aparición de estigmas. Los valores del parámetro k (tasa relativa de senescencia) en el experimento 1 fueron POK2: 6.75 10-3; POKO, P1K2, P2KO y P2K2: 6.87 10-3; P2K1: 6.97 10-3; y en el experimento 2 fueron POK2, P1K2, y P2K2: 3.53 10-3; POKO: 3.85 10-3; P2K0: 3.97 10-3; P2K1: 3.70 10-3. Para todas las funciones ajustadas el R² > 0.93 y p < 0.01.

2). En el **Experimento 2**, la LAR disminuyó 10% en los dos tratamientos sin agregado de P (P0K0 y P0K2) en comparación con el promedio de los otros cuatro tratamientos. No se observó ningún efecto del agregado de K sobre la LAR en los dos experimentos. El número final de hojas no fue afectado por los tratamientos en ambos experimentos promediando las 17 hojas.

Tanto la deficiencia de P como la de K disminuyeron el ILA en todas las posiciones en el tallo. El efecto de la no aplicación de P (POK2 vs. P2K2) fue mayor que el de la omisión de K (P2K0 vs. P2K2). La deficiencia de P provocó una disminución de 14% y 22% en promedio de todas las posiciones, en el **Experimento 1 y 2**, respectivamente, mientras que la disminución por la deficiencia de K fue de 11% y 16% en el **Experimento 1 y 2**, respectivamente. La **Ecuación 1** describió adecuadamente la ILA a lo largo del tallo, con valores de r² mayores a 0.98 (**Figura 3**). Las deficiencias de P y K afectaron alguno de los parámetros de la **Ecuación 1 (Tabla 2)**. El parámetro A₀ (área de la hoja más grande) disminuyó en los tratamientos POKO (13% y 25%), POK2 (15% y 20%), y P2KO (7% y 10%) con respecto

a P2K2, en los **Experimento 1 y 2**, respectivamente. En el **Experimento 2**, se observó un 17% de aumento del parámetro b (amplitud de la curva) en los tratamientos sin el agregado de P (P0K0 y P0K2). La falta de efectos sobre el parámetro c (grado de simetría), mostraron que no hubo cambios en la simetría de la curva debido a deficiencias de P y K.

Senescencia foliar

En el **Experimento 1**, la tasa relativa de senescencia (parámetro k en la **Ecuación 3**) fue mayor que en el **Experimento 2**. **(Figura 4)**. La senescencia progresó muy lentamente hasta los 1100 °C d (el comienzo del llenado efectivo de los granos), y mostró valores de FSLAI menores a 0.1 (ejemplo, menos del 10% del área foliar senescente) en los dos experimentos en ese momento. La omisión de P (POK2 vs. P2K2) redujo ligeramente (2%) la tasa de senescencia en el **Experimento 1**, y mostró una tendencia similar en el **Experimento 2**. En el **Experimento 1**, el tratamiento P2K1 fue el único que tuvo una senescencia ligeramente mayor (1%) que el tratamiento P2K2. En el **Experimento 2**, todos los tratamientos con

Tabla 2. Parámetros de la ecuación 1, ajustada al perfil de área foliar individual en (cm²) función de su posición para cada tratamiento y experimento (Figura 3).

Tueteurieute		Parám	Parámetro		
Tratamiento	$\mathbf{A}_{_{0}}$	b	$\mathbf{x}_{_{0}}$	С	
Experimento 1					
РОКО	554.7**	0.044	11.30	7.3 x 10 ⁻⁴	
P0K2	541.1**	0.043	11.28	7.9 x 10 ⁻⁴	
P1K2	617.8	0.043	10.86	8.2 x 10 ⁻⁴	
P2K0	589.9**	0.043	10.99	5.8 x 10 ⁻⁴	
P2K1	610.9	0.043	11.02	5.5 x 10 ⁻⁴	
P2K2	640.6	0.041	11.02	6.6 x 10 ⁻⁴	
Experimento 2					
РОКО	383.0**	0.048*	11.52	1.6 x 10 ⁻³	
P0K2	406.3**	0.048*	11.63	1.6 x 10 ⁻³	
P1K2	480.1(*)	0.043	11.47	8.6 x 10 ⁻⁴	
P2K0	456.0**	0.044	11.34	8.5 x 10 ⁻⁴	
P2K1	490.5	0.041	11.33	6.6 x 10 ⁻⁴	
P2K2	510.1	0.041	11.43	6.5 x 10 ⁻⁴	

 A_o : área de la hoja más grande (cm²), b: Amplitud, X_o : Posición de la hoja más grande, c: Simetría. Diferencias con el tratamiento P2K2: ** p < 0.01, * p < 0.05, (*) p < 0.10

niveles intermedios o sin K (ejemplo, POKO, P2K1 y P2KO) tuvieron tasa de senescencias mayores que el tratamiento P2K2. El tratamiento P2K0 tuvo el mayor aumento en la tasa de senescencia (12%) comparado con el tratamiento P2K2. Además, se observó una interacción P*K, ya que el efecto de la deficiencia de K dependió del nivel de P. El tratamiento P0K0 tuvo una tasa de senescencia significativamente menor que la del tratamiento P2K0.

Evolución del área foliar verde

El GLAI máximo del tratamiento P2K2 fue similar en los dos experimentos (3.6 y 3.2 en el Experimento 1 y 2, respectivamente), y se alcanzó alrededor de la aparición de estigmas (757 y 776°C d en el Experimento 1 y 2, respectivamente) (Figura 5). La deficiencia de P redujo el GLAI 20% y 32%, en promedio de todas las fechas de muestreo, en el **Experimento 1 y 2**, respectivamente. La disminución del GLAI por la deficiencia de K fue menor que la de P (13% y 25% en el Experimento 1 y 2, respectivamente). Se observó una interacción P*K significativa en los estadios intermedios del cultivo en los dos experimentos (Figura 5). En términos relativos, con la dosis más alta de K (K2), la deficiencia de P produjo una disminución del GLAI de 34% y 38% (P0) ó 10% y 14% (P1) en el periodo previo a la aparición de estigmas. Después de la aparición de estigmas, esta disminución fue de 7% y 26% (P0), ó 0 y 8% (P1), en el **Experimento** 1 y 2, respectivamente. En el caso de la deficiencia de K, sin deficiencia de P (P2), K0 y K1 mostraron una mayor disminución relativa del GLAI después de la aparición de

estigmas (13% y 29% en K0, 10 y 11% en K1) que antes de este estadio (12% y 20% en K0, 4% y 2% en K1).

En los dos experimentos se observó una tendencia similar en el GLAI relativo al tratamiento P2K2, independientemente de las diferencias en términos absolutos (Figura 6). P0K0 y P0K2 tuvieron valores similares de GLAI relativo al comienzo del ciclo del cultivo. Por el contrario, al final del ciclo los valores de GLAI relativo de P0K0 fueron similares a los del tratamiento P2K0. Estos resultados podrían estar indicando que P fue más limitante para GLAI al comienzo del ciclo, mientras que K lo fue al final del ciclo. En los estadios intermedios, cuando los efectos de P y K fueron similares, se observó una significativa interacción P*K.

Discusión

La magnitud de la deficiencia de P, medida en términos de acumulación de biomasa, fue de 24% y 31% en los dos experimentos. La deficiencia de K provocó una reducción de la biomasa del 30% sólo en **Experimento 2**. Por lo tanto, la deficiencia de P fue severa en los dos experimentos, y de una magnitud similar a la deficiencia de K en el **Experimento 2**. Este estudio mostró que la deficiencia de K hacia el final del ciclo del cultivo disminuyó el crecimiento del maíz, mientras que los efectos de la deficiencia de P fueron evidentes desde etapas tempranas del desarrollo del cultivo. Grant et al. (2001) observaron mayores reducciones relativas de biomasa al comienzo del ciclo en cultivos deficientes en P. Mallarino et al. (1999) observaron que los aumentos

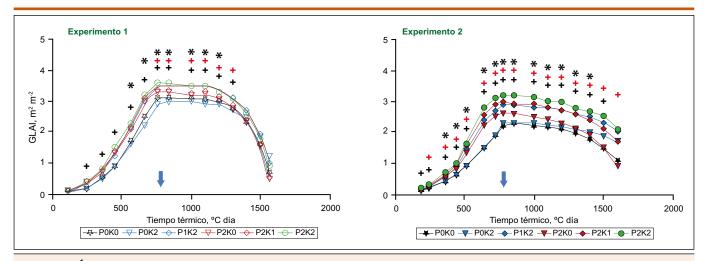


Figura 5. Índice de área foliar verde (GLAI) en función del tiempo térmico desde la emergencia en ambos experimentos. Las cruces negras indican diferencias significativas entre P2K2 y P0K2 (ejemplo, efecto de P), las cruces rojas indican diferencias significativas entre P2K2 y P2K0 (ejemplo, efecto de K), y los asteriscos indican interacción P x K significativa. Las flechas indican aparición de estigmas.

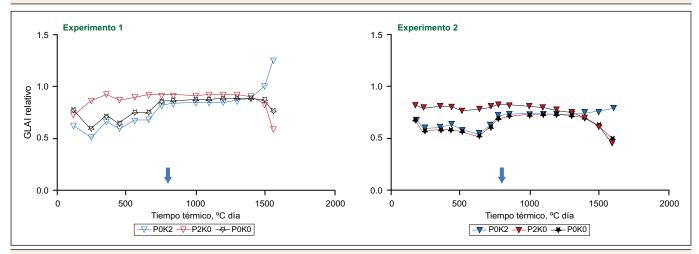


Figura 6. Índice de área foliar verde (GLAI) relativo al tratamiento P2K2, en función del tiempo térmico desde emergencia en los dos experimentos. Las flechas indican aparición de estigmas.

en el crecimiento inicial del maíz (V5-V6) en respuesta a la fertilización con P rara vez son acompañados con un aumento similar en los rendimientos. En el caso de la fertilización con K, estos autores observaron que cultivos que no mostraban respuestas en el crecimiento inicial, podían presentar luego aumentos en el rendimiento.

La deficiencia demoró la aparición de hojas, lo que coincidió con estudios previos no sólo en maíz (Plenet et al., 2000), sino también en trigo (Gutiérrez Boem y Thomas, 1998) y cebada (Prystupa et al., 2003) bajo condiciones controladas. En nuestro estudio, no se observaron efectos del K sobre la LAR, a diferencia de lo reportado por Jordan-Meille y Pellerin (2004), quienes observaron pequeñas diferencias en dicha tasa en cultivos de maíz deficientes en K. La inversa de la LAR, el filocrono (el tiempo que media entre la aparición de dos hojas), depende de la tasa de iniciación de hojas en el ápice del tallo, y de la duración de la elongación de la hoja dentro de las vainas de las hojas ya emergidas. La duración de la elongación depende de la tasa de elongación y del largo de la vaina (Skinner y Nelson, 1995). El aumento del filocrono observado en nuestro estudio, pudo ser consecuencia de una reducción de la tasa de expansión foliar, como la que se observó en maíz deficiente en P (Colomb et al., 2000; Plenet et al., 2000).

El número final de hojas en maíz es sensible a cambios que afectan el desarrollo del cultivo, como el fotoperiodo (Muchow y Carberry, 1989) y temperatura (Tollenar y Hunter, 1983). Algunos estudios no observaron cambios en el número final de hojas debido a deficiencias de agua (Muchow y Carberry, 1989), N (Uhart y Andrade, 1995), P (Colomb et al., 2000; Plenet et al., 2000) o K (Jordan-Meille y Pellerin, 2004). En coincidencia, nuestro estudio no mostró ningún efecto de la deficiencia de P, K o su interacción sobre el número final de hojas.

El área foliar individual en todas las posiciones en el tallo disminuyó fuertemente por la deficiencia de P y, en menor medida, por la de K, aún en el **Experimento 2** donde la magnitud de la deficiencia de P y K fue similar en términos de acumulación de biomasa. Estudios previos también mostraron una disminución de la ILA por deficiencias de P (Plenet et al., 2000) y de K (Jordan-Meille y Pellerin, 2004). El tamaño de la hoja más grande (A₀ en la **Ecuación 1**) fue el parámetro más afectado por la deficiencia de P y K. Por el contrario, no se detectaron

IAH 31 - Diciembre 2018 25

efectos de P o K sobre la simetría del perfil de las ILA a lo largo del tallo. Yang y Alley (2005) propusieron que la disponibilidad de asimilados para el crecimiento de una hoja depende de los fotosintatos producidos por las hojas ya expandidas (que explica la parte ascendente de la curva) y de la fuerza de los otros destinos para esos fotosintatos como el tallo, raíces o espiga (que determina la parte descendente de la curva). Más allá de este modelo teórico, hay una gran correlación entre los parámetros de la **Ecuación 1** (Keating y Wafula, 1992; Yang y Alley, 2005) que, junto con la gran estabilidad de los parámetros (con la excepción de A_o), ha permitido realizar un modelado preciso, sólo conociendo el valor de A_0 (Fournier y Andrieu, 1998; Valentinuz y Tollenaar, 2006; Boomsma et al., 2009). Nuestros resultados muestran que las deficiencias de P y K afectaron principalmente a A_o. Una aproximación alternativa al modelado del área foliar de cultivos deficientes en P o K podría ser vincular A con un índice de la deficiencia, como el factor de stress de P del modelo APSIM (Delve et al., 2009). De esta manera, la expansión del área foliar se podría desacoplar de la rutina de carbono del modelo, lo cual es importante debido al efecto diferencial de muchos factores sobre la expansión y el crecimiento (Tardieu et al., 1999).

En nuestro estudio la deficiencia de K aceleró la senescencia en forma significativa. Este resultado contrasta con lo observado en maíz por Jordan-Meille y Pellerin (2004), quienes detectaron un pequeño aumento (5%) en la senescencia al comienzo del ciclo del cultivo, y una fuerte reducción en la expansión del área foliar. En coincidencia con nuestros resultados, un efecto similar de una deficiencia de K sobre la senescencia se observó en algodón (Brouder y Cassman, 1990; Wright, 1999). Estos autores propusieron factores de suelo (Brouder y Cassman, 1990) o un desbalance fuente-destino por el crecimiento de los destinos como posibles explicaciones a esta expresión tardía de la senescencia. Desde el punto de vista de la fisiología vegetal, una deficiencia de K puede reducir el transporte de asimilados a las raíces, ya que el K es necesario para la carga de sacarosa en el floema (Cakmak et al., 1994; Marshner et al., 1996; Hermans et al., 2006), lo que puede causar una reducción

en la relación raíz:tallo (Hermans et al., 2006). Ma et al. (2013) observaron una disminución de la relación raíz:tallo durante estadios reproductivos en plantas de trigo deficientes en K. En un estudio con híbridos de girasol que diferían en el rasgo *stay-green* que fueron regados o sometidos a una sequía terminal, se observó que la pérdida de funcionalidad de las raíces precedió a la senescencia del canopeo (dosel) (Lisanti et al., 2013). Es probable que la deficiencia de K afectara la funcionalidad de las raíces, disparando la senescencia del canopeo (dosel). Además de esta posible explicación, la disponibilidad de K del suelo puede haber disminuido hacia el final del ciclo del cultivo, dado los bajos niveles en el suelo de K intercambiable y no intercambiable (Horra et al., 2000).

La ligera disminución en la tasa de senescencia foliar en maíz por la deficiencia de P que se observó en este estudio es coherente con reportes previos de Colomb et al. (2000) y Plenet et al. (2000).

El área foliar verde es la consecuencia de los procesos contrapuestos de expansión y senescencia foliar. La deficiencia de P tuvo los mayores efectos al comienzo del ciclo del cultivo, a través de la reducción de la tasa de aparición de las hojas y su tamaño individual. Por el contrario, la deficiencia de K disminuyó ligeramente el área foliar verde al comienzo del ciclo del cultivo, pero la redujo fuertemente hacia el final del ciclo, debido a un fuerte aumento en la tasa de senescencia foliar.

En resumen, en base a estos resultados rechazamos nuestra hipótesis de trabajo, ya que 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. Como consecuencia de los distintos efectos de la deficiencia de P y K sobre la expansión y senescencia foliar, 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.





Efecto de retraso de floración por deficiencia de P: Parcelas tratamiento P0-K75 (A), Parcelas tratamiento P60-K75 (B)

Agradecimientos

Agradecemos al personal de la EEA INTA Mercedes, en especial a Juan Ramón Fernández y Rubén Molina, por su asistencia en el trabajo del campo. Este estudio fue financiado por el INTA y el IPNI.

Bibliografía

- Arias Usandivaras, L.M., F.H. Gutierrez Boem, y F. Salvagiotti. 2018. Contrasting Effects of Phosphorus and Potassium Deficiencies on Leaf Area Development in Maize, Crop Science, 58:2099-2109.
- Barber, S.A. 1995. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Boomsma, C.R., J.B. Santini, M. Tollenaar, y T.J. Vyn. 2009. Maize per-plant and canopy-level morpho-physiological responses to the simultaneous stresses of intense crowding and low nitrogen availability. Agron. J. 101:1426-1452.
- Bordoli, J.M., y A.P. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. Agron. J. 90:27-33.
- Borrás, L., G.A. Maddonni, y M.E. Otegui. 2003. Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kernel set effects. Field Crops Res. 82:13-26.
- Bray, R.H. 1954. A nutrient mobility concept of soil plant relationships. Soil Science, 78:9-22.
- Brouder, S.M., y K.G. Cassman. 1990. Root development of two cotton cultivars in relation to potassium uptake and plant growth in a vermiculitic soil. Field Crops Res. 23:187-203.
- Cakmak, I., C. Hengeler, y H. Marschner. 1994. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. J. Exp. Bot. 45:1251-1257.
- Clover, M.W., y A.P. Mallarino. 2013. Corn and soybean tissue potassium content responses to potassium fertilization and relationships with grain yield. Soil Sci. Soc. Am. J. 77:630-642.
- Colomb, B., J.R. Kiniry, y P. Debaeke. 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. Agron. J. 92:428-435.
- Delve, R., M. Probert, J. Cobo, J. Ricaurte, M. Rivera, E. Barrios, y I. Rao. 2009. Simulating phosphorus responses in annual crops using APSIM: Model evaluation on contrasting soil types. Nutr. Cycling Agroecosyst. 84:293-306.
- Dwyer, L.M., y D.W. Stewart. 1986. Leaf area development in field-grown maize. Agron. J. 78:334-343.
- Escobar, E.H., H.D. Ligier, R. Melgar, y H. Matteio, O. Vallejos. 1996. Mapa de suelos de la provincia de Corrientes (escala: 1:500.000). INTA, Corrientes, Argentina.
- Fletcher, A.L., D.J. Moot, y P.J. Stone. 2008. Solar radiation interception and canopy expansion of sweet corn in response to phosphorus. Eur. J. Agron. 29:80–87.
- Fournier, C., y B. Andrieu. 1998. A 3D architectural and process-based model of maize development. Ann. Bot. 81:233-250.
- Grant, C.A., D.N. Flaten, D.J. Tomasiewicz, y S.C. Sheppard. 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. Can. J. Plant Sci. 81:211-224.
- Gutiérrez-Boem, F.H., y G.W. Thomas. 1998. Phosphorus nutrition affects wheat response to water deficit. Agron. J. 90:166-171.
- Hermans, C., J.P. Hammond, P.J. White, y N. Verbruggen. 2006. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? Trends Plant Sci. 11:610-617.
- Horra, A.M., M.E. Conti, y M.P. Jimenez. 2000. Potassium supplying capacity in Argentine soils and plant uptake rate. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31:2717-2726.

- Jordan-Meille, L., y S. Pellerin. 2004. Leaf area establishment of a maize (*Zea mays* L.) field crop under potassium deficiency. Plant Soil 265:75-92.
- Keating, B.A., y B.M. Wafula. 1992. Modelling the fully expanded area of maize leaves. Field Crops Res. 29:163-176.
- Lisanti, S., A.J. Hall, y C.A. Chimenti. 2013. Influence of water deficit and canopy senescence pattern on *Helianthus annuus* (L.) root functionality during the grain-filling phase. Field Crops Res. 154:1-11.
- Ma, Q., C. Scanlan, R. Bell, y R. Brennan. 2013. The dynamics of potassium uptake and use, leaf gas exchange and root growth throughout plant phenological development and its effects on seed yield in wheat (*Triticum aestivum*) on a low-K sandy soil. Plant Soil 373:373-384.
- Maddonni, G.A., y M.E. Otegui. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. Field Crops Res. 48:81-87.
- Maddonni, G.A., M.E. Otegui, y A.G. Cirilo. 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. Field Crops Res.71:183-193.
- Mallarino, A.P., J.M. Bordoli, y R. Borges. 1999. Phosphorus and potassium placement effects on early growth and nutrient uptake of no-till corn and relationships with grain yield. Agron. J. 91:37-45.
- Marschner, H., E.A. Kirkby, y I. Cakmak. 1996. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilate and cycling of mineral nutrients. J. Exp. Bot.47:1255-1263.
- Muchow, R.C., y P.S. Carberry. 1989. Environmental control of phenology and leaf growth in a tropically adapted maize. Field Crops Res. 20:221-236.
- Pettigrew, W.T. 2008. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. Physiol. Plant. 133:670-681.
- Plenet, D., S. Etchebest, A. Mollier, y S. Pellerin. 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. I. Leaf growth. Plant Soil 223:119-132.
- Prystupa, P., G.A. Slafer, y R. Savin. 2003. Leaf appearance, tillering and their coordination in response to NxP fertilization in barley. Plant Soil 255:587-594.
- Skinner, R.H., y C.J. Nelson. 1995. Elongation of the grass leaf and its relationship to the phyllochron. Crop Sci. 35:4-10.
- Tardieu, F., C. Granier, y B. Muller. 1999. Modelling leaf expansion in a fluctuating environment: Are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate? New Phytol. 143:33-43.
- Tollenaar, M., y T.B. Daynard. 1982. Effect of source-sink ratio on dry matter accumulation and leaf senescence of maize. Can. J. Plant Sci. 62:855-860.
- Tollenaar, M., y R.B. Hunter. 1983. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number of maize. Crop Sci. 23:457-460.
- Uhart, S.A., y F.H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. Crop Sci. 35:1376-1383.
- Valentinuz, O.R., y M. Tollenaar. 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area-per-leaf profile in maize. Agron. J. 98:94-99.
- Wright, P.R. 1999. Premature senescence of cotton (*Gossypium hirsutum* L.): Predominantly a potassium disorder caused by an imbalance of source and sink. Plant Soil 211:231-239.
- Yang, J., y M. Alley. 2005. A mechanistic model for describing corn plant leaf area distribution. Agron. J. 97:41-48. ❖

Respuesta a la fertilización NS en el cultivo de colza-canola en el centro-este de Entre Ríos

Carolina Alaluf^{1,*}, Juan José De Battista^{1,2}, Luciano Dobler³, Isabella Rampoldi³, Damián Gastán³, Nahuel Arlettaz³ y Florencia Sittoni³

- La colza es uno de los principales cultivos de invierno alternativos al trigo en Argentina; no obstante, no son abundantes los ensayos realizados en el este de Entre Ríos sobre manejo y respuesta a la fertilización.
- El presente trabajo tuvo como objetivo cuantificar el efecto de estrategias de fertilización con nitrógeno (N) y azufre (S), y la aplicación de fungicidas sobre el crecimiento y el rendimiento.
- No se encontró efecto de los fungicidas ni interacción fungicida x fertilización en ninguna de las variables. Se determinó que S tiene un rol importante en dosis altas de fertilización nitrogenada.

Introducción

La colza (*Brassica napus* L.) es uno de los principales cultivos de invierno de Entre Ríos, cuya superficie de siembra se ha incrementado notablemente en los últimos 10 años, pasando de 750 hectáreas en la campaña 2006-07 a 15 700 hectáreas en 2014-15, habiendo llegado a un pico de 42 000 hectáreas en la campaña 2012-13 (SIIA, 2015). A lo largo de esta última década, los rendimientos del cultivo en la provincia han variado entre 1059 y 1861 kg ha⁻¹ (SIIA, 2015), encontrándose dentro del promedio del país (1400 kg ha⁻¹), con una gran variabilidad interanual (Takashima et. al., 2013), lo que hace suponer que sea uno de los motivos por los cuales el cultivo no se ha establecido de forma firme en las rotaciones de la región.

Estudios realizados por Coll y Larrosa (2010) en Paraná demuestran que en condiciones experimentales es factible lograr rendimientos mayores a 3000 kg ha⁻¹, que son, sin embargo, difíciles de alcanzar comercialmente, lo que indicaría que es necesario ajustar las prácticas de manejo del cultivo como la fertilización.

Además del aceite comestible extraído de las semillas de colza y de la torta utilizada para la alimentación de ganado últimamente se ha observado un gran interés en su uso como biodiesel para la industria. La colza se presenta como una opción, tanto para los productores como para la industria, ya que al ser un cultivo invernal sirve como rotación para las zonas que se limitan sólo a cereales de invierno. Por el mismo motivo, abastece a la industria aceitera, que sólo se enfoca en cultivos estivales.

Sin embargo, muchos son los factores limitantes de este cultivo: estrés hídrico, efectos residuales de herbicidas, calidad de siembra (implantación), plagas y enfermedades, calidad del lote, fertilización, y adversidades climáticas (heladas), entre otros. Cada uno de ellos y la sumatoria de los mismos, puede ser traducida en un detrimento del rendimiento del cultivo.

La colza es una especie oleaginosa con altos requerimientos nutricionales de N y S, por ende, puede presentar una gran respuesta a la fertilización nitrogenada y/o azufrada, siendo más sensible a las deficiencias de S que los cereales (Mengel y Kirkby, 2000). También se ha informado en numerosos trabajos sobre mejoras en la eficiencia de uso del N para la colza cuando se fertiliza complementariamente con S (Fismes et al., 2000; Orlovius, 2003; Gambaudo y Fontanetto, 2008). Esto se debe a que la mayor consecuencia de la deficiencia de S es reducir significativamente la eficiencia de uso del N (Melgar, 2013).

Numerosos estudios demostraron que el crecimiento y rendimiento del cultivo están relacionados con la aplicación de N; dependiendo la respuesta de tres condiciones: (i) la dosis de aplicación, (ii) el momento de la aplicación y (iii) la composición del fertilizante. Por su parte, el contenido de aceite en grano tiende a disminuir con elevadas dosis de N (Allen et al. 1971; Bilsborrow et al., 1993; Ahmad y Abdin, 2000; Rathke y Schuster, 2001).

Melchiori et al. (2010) observaron una gran respuesta a la fertilización con N y S sobre suelos Molisoles y a N sobre Vertisoles. Ellos proponen un umbral de N disponible (suelo + fertilizante) de 143 kg de N ha⁻¹ que permitiría obtener rendimientos de al menos 2800 kg ha⁻¹ cuando el S no es limitante. Por otra parte, la adecuada disponibilidad de S puede lograrse fertilizando con 15 kg ha⁻¹ de S

El presente trabajo tuvo como objetivo cuantificar el efecto de la estrategia de fertilización NS, y la aplicación de fungicidas sobre el crecimiento y el rendimiento del cultivo de colza en el centro-este de la provincia de Entre Ríos, con el propósito de poder generar recomendaciones de manejo.

Docentes Universidad de Concepción del Uruguay, U.C.U., Entre Ríos, Argentina

² INTA EEA Concepción del Uruguay

³ Alumnos colaboradores, U.C.U.

^{*} Autor de contacto. Correo electrónico: carolina.alaluf@gmail.com

Tabla 1. Características del suelo del sitio experimental (0-20 cm de profundidad). Villa Elisa, Entre Ríos.

Р	C orgánico	N total	N - NO ₃
ppm	%	%	ppm
7.3	2.17	0.172	19.6

Materiales y métodos

El ensayo se ubicó en un lote comercial sobre la ruta provincial 130, km 24, de la localidad de Villa Elisa (Entre Ríos, Argentina), en un suelo serie La Paulina, Peluderte argiudólico, cuyas características se muestran en la **Tabla** 1. El cultivar utilizado fue 'Nuvette 2286', de Nuseed, sembrado el 13 de junio de 2016. El lote se laboreó con una pasada de disco y un rastrón. El control de malezas se realizó con clorpiralid (Lontrel) 200 cc ha⁻¹ en estado de roseta.

El ensayo se realizó con un diseño de parcela dividida con tres repeticiones, siendo la parcela principal la estrategia NS (5 niveles) y la sub-parcela la aplicación de fungicida (2 niveles) (Tabla 2). Para garantizar la suficiencia de fósforo (P), se realizó una fertilización de base en todas las parcelas que constó de 100 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (11-52-0) a la siembra, cuyo aporte de N (11 kg N ha) fue el mismo para todas las parcelas (Tabla 2). En estado de V3-4 se aplicaron los tratamientos referidos a la estrategia de fertilización NS, donde las fuentes de nutrientes fueron urea granulada (46-0-0) y sulfato de amonio (21-0-0-24S). El fungicida fue aplicado en estado de silicuas menores a 4 cm, para los cual se utilizó Pyraclostrobin + Epoxiconazole (Ópera) 1 L ha⁻¹.

Durante el ciclo del cultivo se hicieron 2 muestreos de biomasa aérea en G2 (silicuas de 4 cm) el 30/09 y G3 (silicuas mayores a 4 cm) el 17/10 sobre una superficie de 0.40 m⁻². La cosecha se realizó en forma manual sobre

una superficie de 2 m⁻² (2 surcos por 5 m de largo) el 22/11. Además, se determinó contenido de humedad edáfica hasta el metro de profundidad (cada 20 cm) en ambos muestreos.

En los 2 primeros muestreos la biomasa aérea se particionó en hojas, tallos y silicuas. A la cosecha se separó grano de rastrojo. Los resultados se expresaron en materia seca (kg ha⁻¹) a 60 °C.

Se realizó un análisis de varianza para un diseño en parcelas divididas utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2013). Las diferencias de medias se compararon mediante el Test de Duncan.

Resultados

Para todas las variables analizadas en ninguno de los muestreos hubo efecto de fungicidas ni de interacción fertilización x fungicida. Esto estaría asociado a la baja presión de enfermedades registrada en el lote, posiblemente por ausencia de inóculo debido a no tener antecedentes de colza en el mismo y al laboreo previo a la siembra. A partir de estos resultados solo analizaremos el efecto de la fertilización.

Las precipitaciones se concentraron principalmente en el momento de llenado (126 mm) mientras que de siembra a floración llovieron 104 mm, principalmente al inicio del ciclo (Figura 1). El cultivo no presentó síntomas de estrés hídrico a pesar de haber transitado por un periodo de 40 días sin precipitaciones en prefloración. En V4 contaba con el 73% de agua útil a 1 m y en G2 con el 57%.

Biomasa

En los 2 primeros muestreos se encontraron diferencias entre el testigo y los tratamientos fertilizados (p < 0.10), mientras que en cosecha se observó la misma tendencia, pero debido a la alta variabilidad no fue significativa (CV

Tabla 2. Descripción de los tratamientos aplicados sobre el cultivo de colza. Campaña 2016. Villa Elisa, Entre Ríos.

Tratamiento	Fosfato monoamónico 11-52-0	Urea granulada 46-0-0	Sulfato de amonio 21-0-0-24S	N	S	Fungicida
			kg ha ⁻¹			
1-N11	100	0	0	11	0	Sin
2-N11f	100	0	0	11	0	Con
3-N61	100	109	0	61	0	Sin
4-N61f	100	109	0	61	0	Con
5-N78S	100	109	83	78	20	Sin
6-N78Sf	100	109	83	78	20	Con
7-N111	100	218	0	111	0	Sin
8-N111f	100	218	0	111	0	Con
9-N128S	100	218	83	128	20	Sin
10-N128Sf	100	218	83	128	20	Con

24.5%). En ninguno de los casos se observó efecto de la dosis de N o de S (Figura 2).

En cuanto al índice de cosecha no presentó diferencias entre tratamientos, aunque los tratamientos fertilizados mostraron una tendencia a presentar valores relativamente superiores de partición a grano respecto al testigo (Tabla 3).

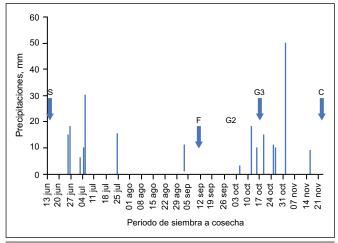


Figura 1. Precipitaciones (mm) desde siembra a cosecha. Las flechas indican distintos estados fenológicos S (siembra), F (floración), G2 (silicuas menores a 4 cm), G3 (silicuas de 4 cm) y C (cosecha). Campaña 2016. Villa Elisa, Entre Ríos.

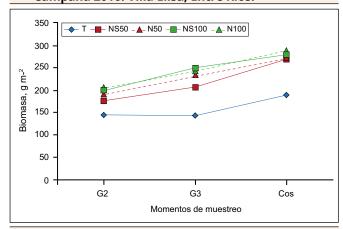


Figura 2. Evolución de la biomasa (g m⁻²) en los diferentes tratamientos de fertilización en colza. Campaña 2016. Villa Elisa, Entre Ríos.

Rendimiento

El rendimiento promedio del ensayo fue de 2264 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación (CV) de 17.6%. El efecto de los tratamientos de fertilización fue significativo (p < 0.05). El tratamiento N128S con 2920 kg ha⁻¹, se diferenció de los demás tratamientos fertilizados en aproximadamente 600 kg ha⁻¹, y éstos del testigo en 900 kg ha⁻¹ (Tabla 4).

La respuesta a N sin S llegó a un plateau con 95 kg de N disponible a 0-20 cm, mientras que con S la respuesta resultó prácticamente lineal hasta los 145 kg de N disponible **(Figura 3)**. Esto indicaría que la respuesta a altos niveles de N estaría limitada a la disponibilidad de S. Este comportamiento fue similar al reportado por Burzaco et al. (2013) en una revisión de experimentos de fertilización en colza.

Tabla 3. Índice de cosecha para los diferentes tratamientos. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas (5%).

Tratamiento	Medias
N111S	0.36
N61	0.35
N111	0.33
N61S	0.31
N11	0.30

Tabla 4. Rendimiento de colza para los tratamientos de fertilización NS. Medias de tratamientos sin y con fungicida para cada tratamiento de fertilización.

Tratamiento	Rendimiento, kg ha ⁻¹
N11	1451 c
N61	2327 b
N78S	2285 b
N111	2336 b
N128S	2920 a

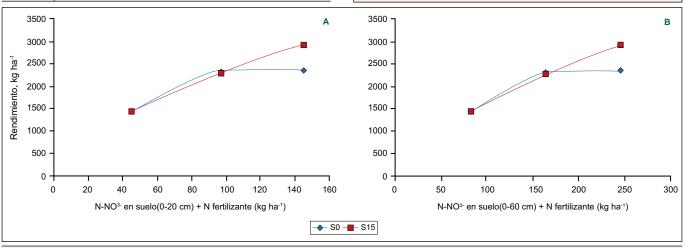


Figura 3. Relación entre el rendimiento del cultivo y el N disponible a 0-20 cm (A) y a 0-60 cm (B) para tratamientos con y sin S. Campaña 2016. Villa Elisa, Entre Ríos.

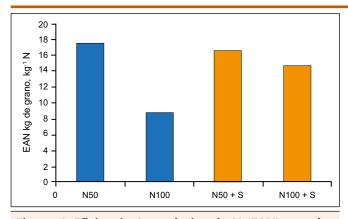


Figura 4. Eficiencia Agronómica de N (EAN) para los distintos tratamientos con y sin S.

Para una profundidad de 0-60 cm los valores de N disponible estimados según la ecuación propuesta por Melchiori y Barbagelata (2002) fueron de 94.5, 176 y 258 kg ha⁻¹ para N11, N61 y N111, respectivamente. Esto nos permitió comparar resultados con los obtenidos por Melchiori et al. (2010) quienes reportaron saturación de la respuesta a N con niveles menores de disponibilidad de N (143 kg N ha⁻¹). Sin embargo, Burzaco et al. (2013) reportaron, en una revisión, casos donde la fertilización con S incrementó la respuesta a N hasta niveles de alrededor de 200 kg N ha⁻¹ (Zamora y Massigoge, 2008).

La eficiencia agronómica de N (EAN) para la dosis de N50 de urea fue similar con y sin S, con un valor medio de 17.1 kg de colza kg de N⁻¹ (Figura 4). Estas respuestas fueron superiores a los 7 kg de colza kg N⁻¹ encontradas por Melgar (2013) como mediana de una serie de ensayos realizados en la zona pampeana. Con N100 de urea, la EAN se mantuvo relativamente alta con el aporte de S y se redujo a casi la mitad sin S.

Comentarios finales

Si bien el trabajo fue realizado en una sola compaña, permitió dar cuenta de la importancia de la fertilización nitrogenada, así como también sugiere un rol importante del S asociado a altas dosis de N.

En este caso no se detectó efecto de fungicida por hallarse el cultivo con un buen estado sanitario debido a la ausencia de *Phoma lingam*, principal enfermedad del cultivo.

Bibliografía

Ahmad, A., y M.Z. Abdin. 2000. Interactive effect of sulphur and nitrogen on the oil and protein contents and on the fatty acid profiles of oil in the seeds of rapeseed (*Brassica campestris* L.) and mustard (*Brassica juncea* L. Czer. and Coss). J. Agron. Crop Sci. 185:49-54.

Allen, E.J., D.G. Morgan, y W.J. Ridgman. 1971. A physiological analysis of the growth of oilseed rape. J. Agric. Sci. Camb. 77:339-341.

Bilsborrow, P.E., E.J. Evans, y F.J. Zhao. 1993. The influence of spring nitrogen on yield, yield components and glucosinolate content of autumnsown oilseed rape. J. Agric. Sci. Camb. 120:219-224.

Burzaco, J.P., I.A. Ciampitti, y F.O. García. 2013. Mejores Prácticas de Manejo para la Nutrición del Cultivo de Colza-Canola: Una revisión. IPNI Canola Council of Canada. 2000. Canola Growers Manual. http://www.canolacouncil.org/

Coll, L., y L. Larrosa 2010. Efecto de la fecha de siembra y el ciclo sobre el rendimiento de colza. Actualización técnica en cultivos de invierno. INTA EEA Paraná. Serie Extensión N° 57.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Fismes, J., P.C. Vong, A. Guckert, y E. Frossard. 2000. Influence of sulphur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. European Journal of Agronomy 12:127-141.

Gambaudo, S., y H. Fontanetto. 2008. Fertilización de colza en la región central de Santa Fe. En: Cultivo de Colza. Eds. Iriarte, L., y O. Valetti. pp. 77-85.

Melchiori, R.J.M., y P.A. Barbagelata. 2002. Recomendación de Fertilización Nitrogenada en trigo. Actualización Técnica en Trigo. EEA INTA Paraná. Serie Extensión. N° 22. pp. 33-38.

Melchiori, R.J.M., P.A. Barbagelata y L. Coll. 2010. Fertilización de Colza con nitrógeno y azufre en Entre Ríos. Actualización Técnica № 1 — Cultivos de Invierno 2010.

Melgar, R. 2013. Manejo de la fertilización de la colza. Un cultivo en ascenso. Revista Fertilizar N°26.

Mengel, K., y E.A. Kirkby. 2000. Azufre. En: Principios de Nutrición Vegetal, 4ta. Edición 1ra. en español. Instituto Internacional de la Potasa, Basilea, Suiza. pp. 339-354.

Orlovius, K. 2003. Oil seed rape. In: E. A. Kirbky (ed), Fertilizing for High Yield and Quality, Bulletin 16. IPI, Basel.

Rathke, G.W., y C. Schuster. 2001. Yield and quality of winter oilseed rape related to nitrogen supply. In: W. J. Horst, M. K. Schenk and A. Bürkert (eds), Plant Nutrition – Food Security and Sustainability of Agro-ecosystems, pp. 798-799. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.

Sistema Integrado de Información Agropecuaria. 2015. www.SIIA.gov.ar

Takashima, N.E., D.P. Rondanini, L.E. Puhl, y D.J. Miralles. 2013. Environmental factors affecting yield variability in spring and winter rapeseed genotypes cultivated in the southeastern Argentine Pampas. Europ. J. Agronomy 48:88-100.

Zamora, M. y J. Massigoge. 2008. Colza: fertilización con nitrógeno y azufre. Visión Rural Año XV N° 72. Mayo-Junio, 2008. pp. 5-9. ❖

Mapas de fertilidad como herramienta para zonificación de suelos en Panamá

José E. Villarreal^{1.*}

- Se gestionó una base de datos de 19 200 análisis de suelos en todo el territorio de Panamá, con información de nueve elementos disponibles, materia orgánica (MO), pH y textura.
- Sobre la base de datos se crearon mapas de elemento disponible en categorías generales (alto, medio, bajo).
- Los mapas indican áreas con deficiencias nutricionales y limitantes químicas. Estos mapas son instrumentos de interpretación y planificación del manejo de suelos para cultivos con altos rendimientos.

Introducción

El suelo es uno de los factores claves en la producción agropecuaria, sirve tanto como fuente y reserva de nutrimentos, pero además ahí las raíces encuentran oxígeno, agua y sostén para los cultivos. La oferta de nutrimentos varía espacialmente en función de los factores formadores del suelo y del manejo dado al mismo. Una medición adecuada de la disponibilidad de nutrientes se convierte en una herramienta para mejorar el manejo de abonos, fertilizantes y enmiendas por zonas o unidades espaciales. Los mapas de fertilidad de suelos son herramientas base que permiten la toma de decisiones, pero igualmente pueden anticipar diferencias entre suelos de distinta naturaleza y apoyar la evaluación del uso del suelo.

Con el fin de planificar mejor el uso del suelo y mejorar el rendimiento de los cultivos en Panamá, era necesario conocer la variabilidad espacial de los nutrimentos en el suelo, utilizando para ello mapas digitalizados y georreferenciados con información detallada de diferentes localidades en todo el país. Anteriormente, información similar se guardaba en bases de datos sin georreferenciar y poco actualizada.

Por ejemplo, en la India, en varios países de Sur América, Europa, Asia y algunos estados de Norte América, se han elaborado mapas de fertilidad que han servido como punto de partida para practicar la agricultura de precisión (Delalibera et al., 2012; Bonfante et al., 2015; Zeraatpisheh et al., 2017).

En Brasil, el IAPAR (1998) realizó la zonificación de cultivos de la cuenca hidrográfica del Riberao do Meio II en el estado de Paraná, ubicado en el sur del país. El estudio sirvió para ordenar el uso del suelo y zonificar la producción agrícola en esa región.

Los mapas de fertilidad de suelo son una herramienta básica para una futura zonificación de cultivos. Permiten seleccionar zonas que presentan suelos con características adecuadas para un determinado cultivo, complementariamente con información como el clima, topografía, uso actual del suelo, rendimientos, entre otros.

El objetivo del estudio fue elaborar mapas digitales de fertilidad para Panamá, basados en los resultados de análisis de muestras de suelo durante 30 años.

Materiales y métodos

Se utilizaron cartas fotogramétricas de Panamá a la escala de 1:100000, elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia. La base de datos consistió en 100 000 resultados de análisis de muestras de suelo realizados en el Laboratorio de Fertilidad de Suelo del Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) entre 1984 y 2004. De ese total, se utilizaron 19 193 resultados ya que el resto no contaba con la información necesaria para ubicar dentro del mapa geopolítico de Panamá.

Además, se utilizó el mapa base físico político digital de Panamá (CGRP, 2000) que contiene los datos georreferenciados de todos los 1767 poblados existentes en el país, lo que sirvió para ubicar los sitios que estaban cerca a las fincas donde se había muestreado el suelo.

Se elaboraron mapas de 15 variables de fertilidad del suelo: Composición textural, pH, contenido de materia orgánica (MO), aluminio (AI), porcentaje de saturación de aluminio, contenido de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), hierro, (Fe), cobre (Cu) y zinc (Zn), suma de bases intercambiables y uno de la combinación de todos los micronutrimentos (Villarreal et al., 2013).

La variables fueron clasificadas como nivel alto, medio o bajo de acuerdo con los niveles críticos utilizados por el Laboratorio de Suelos del IDIAP **(Tabla 1)** para interpretar los análisis de suelos (Name y Cordero, 1987; Villarreal y Name, 1996).

¹ Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá – IDIAP

^{*} Autor de contacto. Correo electrónico: jevilla38@gmail.com

Tabla 1. Niveles críticos utilizados por el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del IDIAP.

. Cramada de S	ueios dei IDIAP.	
Elemento	Valores	Interpretación
_	0 - 18	Bajo
P mg L ⁻¹	19 - 54	Medio
J	> 55	Alto
	0 - 44	Bajo
K mg L ⁻¹	44.1 - 151	Medio
J	> 151	Alto
	0 - 2.0	Bajo
Ca cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	2.1 - 5.0	Medio
(+) Kg	> 5.0	Alto
	0 - 0.6	Bajo
Mg cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.7 - 1.6	Medio
(+) 1.8	> 1.6	Alto
	0 - 2.0	Bajo
Cu mg L ⁻¹	2.1 - 6.0	Medio
J	> 6.1	Alto
	0 - 0.5	Bajo
Al	0.6 - 1.0	Medio
cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.1 - 3.0	Alto
	> 3.0	Muy alto
_	0 - 25	Bajo
Fe mg L ⁻¹	25.1 - 75	Medio
-	> 75	Alto
	0 - 14	Bajo
Mn mg L ⁻¹	14.1 - 49	Medio
C	> 49	Alto
-	0 - 4	Bajo
Zn mg L ⁻¹	4.1 - 14	Medio
-	> 14	Alto
	<5.1	Muy ácido
	5.2 - 5.9	Ácido
рН	6.0 - 6.9	Poco ácido
relación 1:2.5	7.0	Neutro
	7.1 - 8.0	Alcalino
	> 8.0	Muy alcalino
Materia	0 - 2.0	Bajo
Orgánica	2.1 - 6.0	Medio
%	> 6.0	Alto
D. K. Cu. Fo. Zn. v. Man	evtraídos con Mehlich	. 1

P, K, Cu, Fe, Zn y Mn extraídos con Mehlich-1. Materia orgánica por medio de digestión húmeda de Walkley-Black. Ca, Mg y Al intercambiables extraídos con KCl 1N.

Elaboración de la base de datos georreferenciada

Cada muestra fue georreferenciada de acuerdo con el sitio poblado más cercano (1767 localidades). La base de datos estaba compuesta por 19 193 resultados de análisis de fertilidad del suelo. En aquellos sitios donde se superponían varias muestras de suelo se utilizó la moda, o sea, el valor que más se repetía. Finalmente se obtuvo una nueva base de datos de 1727 registros conteniendo las clases de mayor frecuencia por variable.

En la base de datos cada sitio aparece con su localización geográfica en el sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), número de registro, provincia, distrito, corregimiento, sitio poblado, y valores de cada variable del suelo determinada.

Proceso de interpolación y generación de los mapas

Se obtuvo un archivo vectorial tipo punto ("shape file") que muestra la distribución espacial de los 1767 poblados de todo el país. Esto permitió obtener una resolución adecuada para la interpolación (200 m²).

Lasvariables de suelo fueron interpoladas individualmente, generando archivos en formato raster tipo GRID (ESRI-GIS®, ARCINFO NT 9.0®) con tamaño de pixel de 200 m² para todo Panamá. Se utilizó el método de Interpolación Inversa a la Distancia (IDW) el cual estima los puntos del modelo, realizando asignación de pesos a los datos del entorno en función inversa a la distancia que los separa del punto en cuestión. O sea, mientras más cercano al punto z, más contribuye.

Las herramientas del sistema de información geográfica (SIG) utilizadas fueron: ARCVIEW 3.2, modulo SPATIAL ANALYST 1.0 y ARCINFO NT 9.0 (ESRI-GIS).

Resultados

Se generaron 15 mapas digitales, 12 de ellos contienen resultados de la interpolación de datos de variables de suelo (pH, MO, Al, porcentaje de saturación de Al, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Cu y Zn), uno de textura y dos con la combinación de las bases intercambiables y los micronutrimentos agregados (**Figuras 1 al 15**, respectivamente) (Villarreal et al., 2013).

Estos quince mapas se convierten en una herramienta de visualización gráfica muy útil para la toma de decisiones gubernamentales y la planificación a nivel regional de políticas agropecuarias, concentrar recursos públicos y privados. Asimismo, se puede zonificar el riesgo de la producción agropecuaria a una escala operativa a nivel nacional, regional y local, planificar el uso de los suelos de acuerdo con sus propiedades, establecer programas y proyectos en determinadas áreas basados en sus condiciones de fertilidad.

En la península de Azuero, localizada al sur del país en el denominado Arco Seco de Panamá, región productora de maíz, utilizando como base el mapa de textura del suelo, se correlacionó el rendimiento del cultivo de

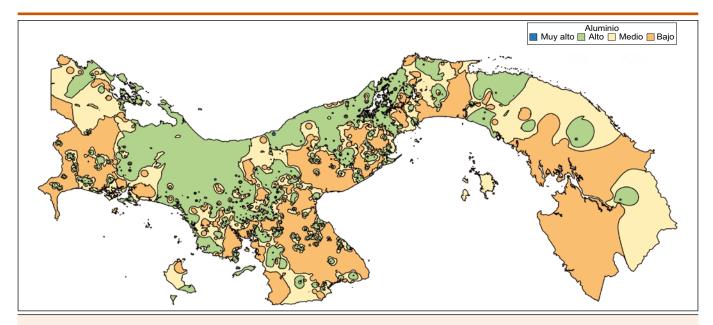


Figura 1. Contenido de aluminio (Al) en los suelos de Panamá.

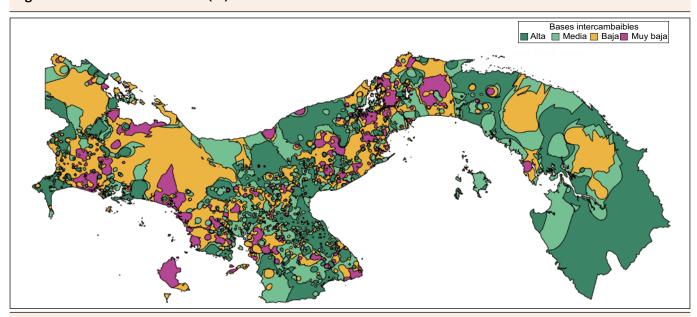


Figura 2. Bases intercambiables en los suelos de Panamá.

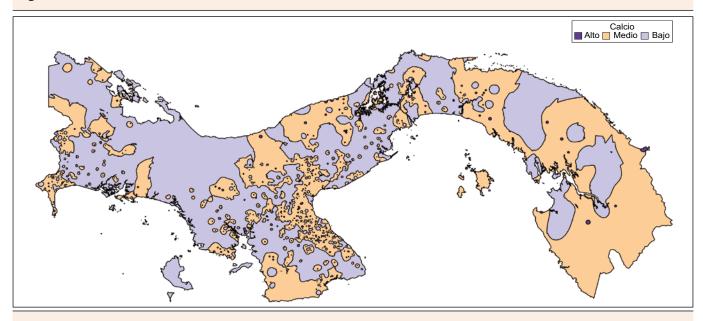


Figura 3. Contenido de calcio (Ca) en los suelos de Panamá.

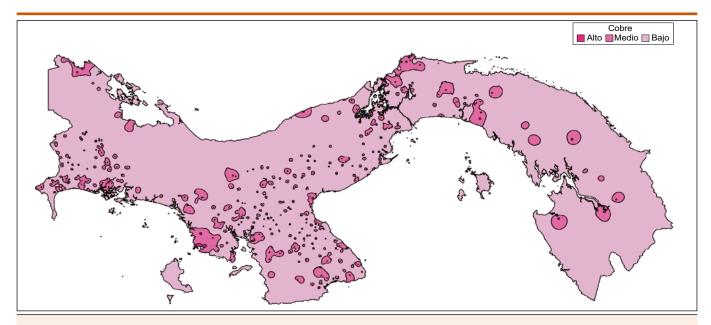


Figura 4. Contenido de cobre (Co) en los suelos de Panamá.

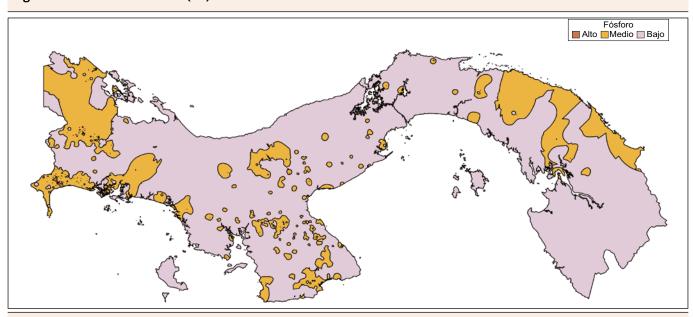


Figura 5. Contenido de fósforo (P) en los suelos de Panamá.

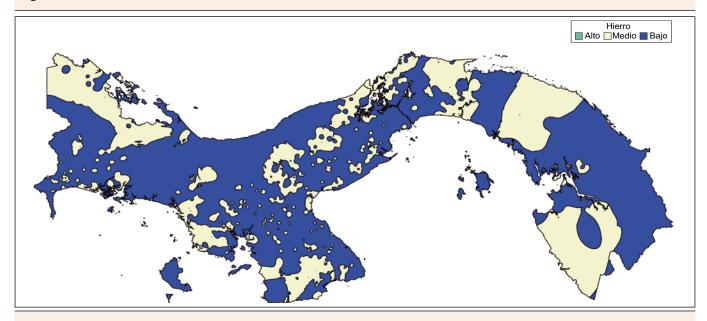


Figura 6. Contenido de hierro (Fe) en los suelos de Panamá.

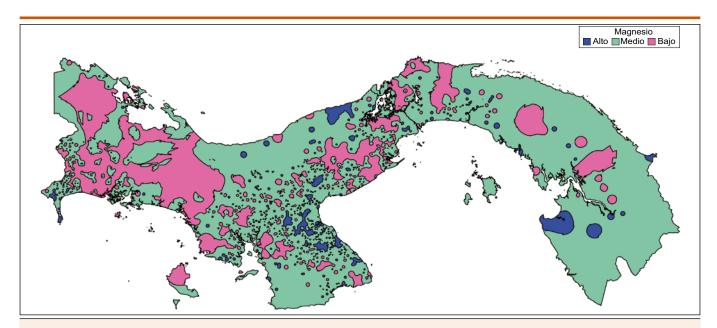


Figura 7. Contenido de magnesio (Mg) en los suelos de Panamá.

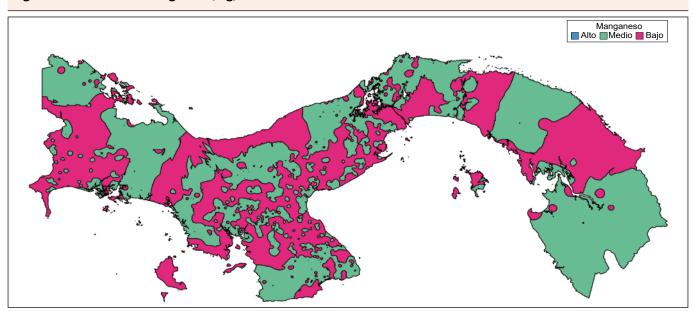


Figura 8. Contenido de manganeso (Mn) en los suelos de Panamá.

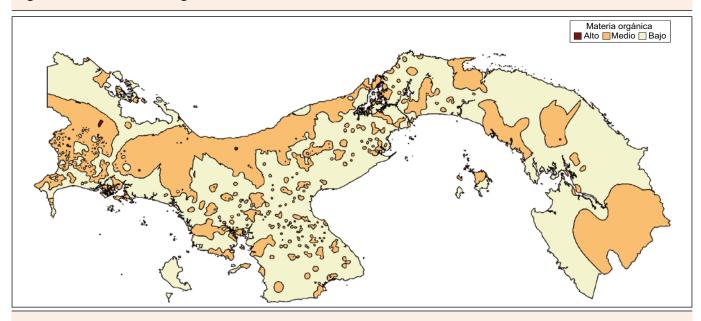


Figura 9. Contenido de materia orgánica (MO) en los suelos de Panamá.

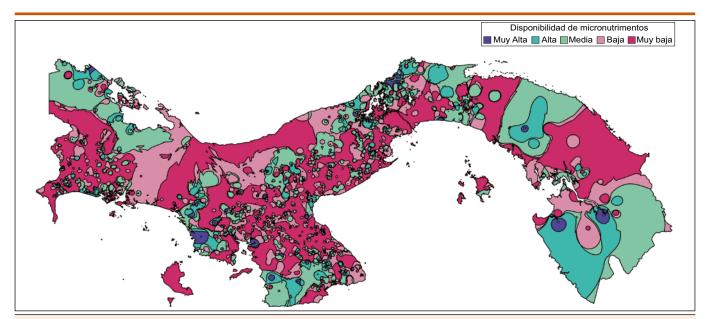


Figura 10. Disponibilidad de micronutrimentos en combinación (disponibilidad interpretada) en los suelos de Panamá.

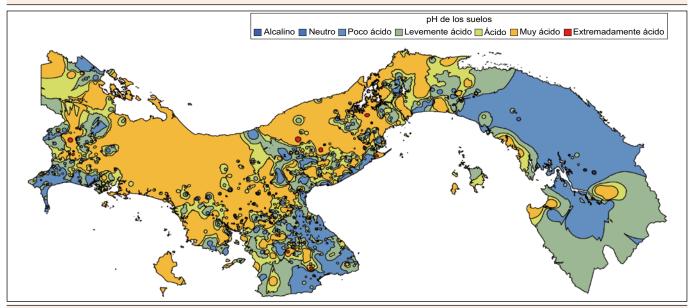


Figura 11. Contenido de pH de los suelos de Panamá.

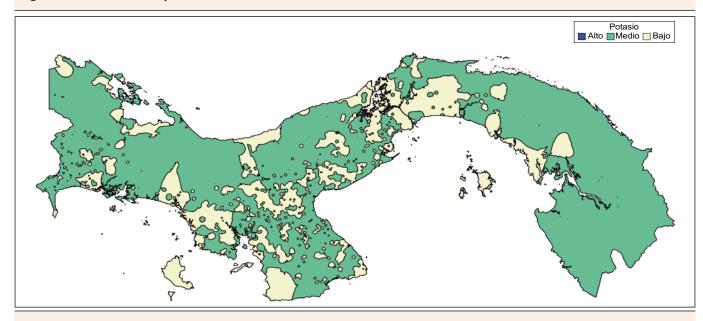


Figura 12. Contenido de potasio (K) en los suelos de Panamá.

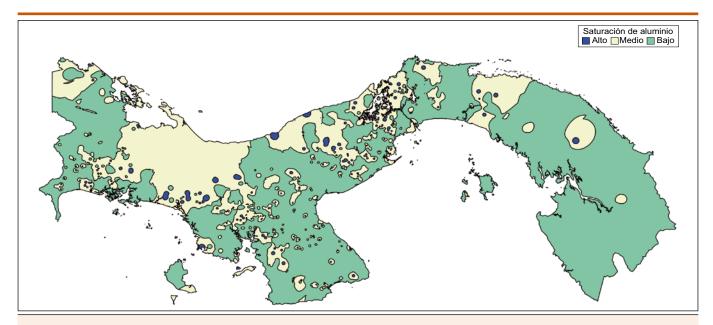


Figura 13. Contenido de saturación de aluminio en los suelos de Panamá.

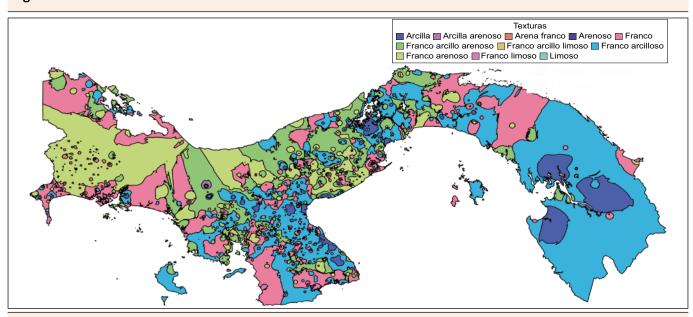


Figura 14. Contenido de texturas en los suelos de Panamá.

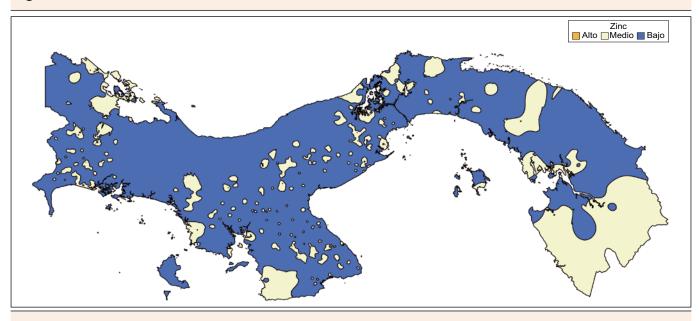


Figura 15. Contenido de zinc (Zn) en los suelos de Panamá.

maíz en diferentes localidades versus textura del suelo, encontrándose que en aquellos sitios donde predominaba la textura arcillosa se presentaba un menor rendimiento del cultivo. Esto sirvió para comprobar la utilidad de los mapas (Gordon, 2007).

En Panamá existen amplias zonas influenciadas por el manejo del suelo y que pueden estar expuestas a los efectos del cambio climático. En nuestro análisis se encontró que predominan los terrenos con bajo contenido de MO, pH ácido y bajo contenido de bases (K, Ca y Mg).

Conclusiones

Los mapas generados son una herramienta útil que sirve de apoyo para la planificación y la toma de decisiones, asimismo, permite estimar una primera aproximación del riesgo de la producción, esto a una escala operativa nivel nacional o regional.

Con la interpretación por cultivo, los mapas de fertilidad muestran las características de fertilidad más adecuadas para cultivos de agroexportación y también áreas donde no es recomendable la actividad agropecuaria.

Bibliografía

Bonfante, A., A. Agrillo, R. Albrizio, A. Basile, R. Buonomo, R. De Mascellis, A. Gambuti, P., Giorio, G. Guida, G. Langella, P. Manna, L. Minieri, L. Moio, L. Siani, F. Terribile. 2015. Functional homogeneous zones (fHZs) in viticultural zoning procedure: an italian case of study on Aglianico vine. Soil. 1:427-441.

- CGRP (Contraloría General de la República de Panamá). 2000. Mapa físico de sitios poblados de Panamá. Contraloría General de la República.
- Delalibera, H., P. Weirich, N. Nagatan. 2012. Management zones in agriculture according to the soil and landscape variables. Eng. Agric., Jaboticabal 32(6):1197-1204.
- Gordon, R. 2007. Guía técnica del cultivo de maíz. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Panamá. 47 pp.
- IAPAR (Instituto Agronómico do Paraná). 1998. Zonificación agroecológica y económica de la cuenca hidrográfica del Riberao do Meio II, en el distrito municipal de Carlópolis, estado de Paraná. Londrina, IAPAR. 17 pp.
- Name, B., A. Cordero. 1987. Alternativas para uso y manejo de suelos ácidos en Panamá. In: Compendio de resultados de investigación presentados en la Jornada Científica. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, Región Central. 23 pp.
- Villarreal, J.E., B. Name, R.A. García. 2013. Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. Ciencia Agropecuaria. 21:71-89.
- Villarreal, J.E., B. Name. 1996. Técnicas analíticas del Laboratorio de Suelos del IDIAP. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Región Central, Divisa. 110 pp.
- Zeraatpisheh, M., S. Ayoubi, A. Jafari, P. Finke. 2017. Comparing the efficiency of digital and conventional soil mapping to predict soil types in a semi-arid region of Iran. Geomorphology. 285:186-204.

Cursos y Simposios

Esta sección presenta eventos futuros en el ámbito regional e internacional que pueden ser de interés de los lectores

1. Reunión Anual de SSSA (Soil Science Society of America)

Organiza : SSSA

Lugar : San Diego, California, EE.UU.

Fecha : 6-9 Enero, 2019

Información : https://www.acsmeetings.org

2. 2019 Western Nutrient Management Conference (WNMC)

Organiza : WNMC

Lugar : Reno, Nevada, EE.UU. Fecha : 7-8 Marzo, 2019

Información : https://conference.ipni.net/

conference/wnmc2019

3. Conferencia y Exhibición InfoAg International

Organiza : New Ag International e IPNI

Lugar : Dublín, Irlanda Fecha : 27-29 Marzo, 2019

Información: https://lifesciences.knect365.

com/infoag-international-conference-exhibition/

4. Simposio sobre Optimización de la Productividad y Rentabilidad en Sistemas de Producción Soja-Maíz

Organiza : IPNI

Lugar : Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

Fecha : 24-26 Abril, 2019

Información : https://conference.ipni.net/

conference/sojamilho2019

5. Simposio Fertilidad 2019

Organiza : Fertilizar Asociación Civil e IPNI
Lugar : Rosario, Santa Fe, Argentina
Fecha : Mayo, 2019 (fecha a confirmar)
Información : https://www.fertilizar.org.ar

http://lacs.ipni.net

6. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SUCS-SLCS

Lugar : Montevideo, Uruguay Fecha : 7-11 Octubre, 2019 Información : http://clacs.org

7. Reunión Anual de ASA, CSSA, y SSSA (American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, y Soil Science Society of America)

Organiza : ASA,CSSA, SSSA

Lugar : San Antonio, Texas, EE.UU.
Fecha : 10-13 Noviembre, 2019
Información : https://www.acsmeetings.org





"Diversidad Productiva:
pilar del manejo sostenible de los suelos"
7 al 11 de octubre de 2019 | www.clacs.org | Montevideo, Uruguay