

Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica

IAH 15 - Septiembre 2014

Versión Cono Sur

Fertilización con fósforo en secuencias continuas de soja	2
Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de Sabanas Ácidas de Colombia	6
Eficiencia de utilización del nitrógeno en sistemas lecheros pastoriles	11
Aproximaciones para el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en maíz a través de índices espectrales	15
Fertilización con fósforo por ambientes en trigo	22
Cursos y Simposios	26
Publicaciones Disponibles	27



Director: Dr. Fernando O. García
International Plant Nutrition Institute
Programa Cono Sur de Latinoamérica
Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

Propietario: International Plant Nutrition Institute (IPNI)

CUIT: 30-70175611-4
ISSN 2222-0178

No. de Registro de Propiedad Intelectual: 5190057

Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se citen la fuente y el autor.

<http://www.ipni.net>

En este número

- Fertilización con fósforo en soja
- Fertilización de maíz en Colombia
- Eficiencia del nitrógeno en sistemas lecheros pastoriles
- Manejo específico por sitio de N en maíz
- Manejo de P por ambientes en trigo

Oficina para el Cono Sur de Latinoamérica • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso • Buenos Aires - Argentina
Telf/Fax.: 54 11 4798 9939 • Correo electrónico: Lpisauri@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 • 3500 Parkway Lane, Suite 550 • Norcross, GA 30092 - EE.UU
Telf.: 1 770 825 8079 • Fax: 1 770 448 0439 • Correo electrónico: atasistro@ipni.net • <http://mca.ipni.net>

Fertilización con fósforo en secuencias continuas de soja

M. Bermúdez¹, M. Díaz-Zorita^{1,2}, G. Espósito³, G. Ferraris⁴, G. Gerster⁵, M. Saks⁶, F. Salvagiotti⁵, y L. Ventimiglia⁷ (Ex aequo)

Introducción

El cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] cubre en la región pampeana el 53% del área cultivable y es de los cultivos de mayor importancia tanto en el sector productivo, exportador e industrial, alcanzando una superficie implantada superior a los 20 millones de hectáreas (SIIA, 2013). Cubiertas las necesidades de nitrógeno (N), mayormente por el proceso de fijación biológica del N₂ atmosférico, el fósforo (P) es el principal nutriente que limita la productividad del cultivo de soja. Se ha determinado que la respuesta aumenta cuando los niveles extractables de P en la capa superficial de los suelos disminuye, estableciéndose como umbral de respuesta valores inferiores a 16 mg kg⁻¹ de P Bray a 0-20 cm (Ferraris et al., 2008). Aproximadamente el 68% del área sembrada recibe fertilización fosfatada con dosis medias de fertilizantes inferiores a la extracción de nutrientes del cultivo (García y González Sanjuan, 2012). Sainz Rosas et al. (2012) mostraron que, en la mayor parte de los suelos de la región pampeana, aproximadamente en 15 227 000 ha, los niveles de P extractable (Bray y Kurtz 1) son inferiores o iguales a 15 mg P kg⁻¹, por lo que la disponibilidad de este elemento limitaría la normal producción de los cultivos en esta área.

En base a lo expuesto, la aplicación de P en cantidades mayores a las actuales, sería adecuada para mantener e incrementar tanto la productividad como los niveles de P extractable en el suelo. Numerosos estudios analizan el comportamiento de soja, en relación con los niveles de P y la fertilización con este elemento, mayormente desarrollados en secuencias con otros cultivos en rotación. Sin embargo, son escasos los estudios que consideran este análisis en sistemas continuos de soja, situación muy frecuente en los planteos productivos en la región pampeana. En general, se observa que la fertilización con P en bandas próximas a la línea de siembra aporta una mayor eficiencia de aprovechamiento del nutriente, pero en dosis limitadas para el cultivo por el riesgo salino de fitotoxicidad en contacto directo entre

fertilizantes y semillas (Ventimiglia y Carta, 2005; Salvagiotti et al., 2013). Las aplicaciones en superficie son una alternativa de manejo de la fertilización con P, tanto por no presentar riesgos sobre la implantación permitiendo aportar mayores dosis del nutriente como por razones logísticas

mejorando la operación de siembra (Echeverría y García, 2005).

La aplicación en la banda de siembra de dosis de P mayores a las frecuentemente utilizadas, resultarían en un aumento en la respuesta en producción de soja. Sin embargo, este aumento de dosis podría reducir la implantación de los cultivos por riesgo de fitotoxicidad y limitar la respuesta en producción. Es así que la corrección con fertilizante aplicado en superficie mostraría mayor consistencia en la respuesta del cultivo dependiendo de su momento de utilización. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la producción de grano de soja con distintas estrategias de fertilización fosfatada que incluyen variantes de dosis, momento y localización en sitios representativos de la región pampeana.

Materiales y métodos

El estudio se desarrolló entre las campañas 2010/11 y 2012/13 sobre 5 áreas ubicadas en sitios representativos de la región pampeana con un total de 12 sitios. En cada sitio se establecieron 5 estrategias o tratamientos de manejo de la fertilización con P (**Tabla 1**). Estos tratamientos fueron repetidos en el mismo sitio durante 2 o 3 años según el sitio (**Tabla 2**). Es decir que en cada año, las mismas dosis de P fueron aplicadas sobre la misma parcela en igual época y con la misma localización. Las dosis de fertilizante variaron entre sitios representando en el tratamiento 2 ("dosis base de P"), la dosis "frecuente" de aplicación en cada región y en los tratamientos 3, 4 y 5 ("dosis alta de P") un aporte suficiente para reponer la cantidad extraída por la producción de granos del cultivo (**Tabla 1**). En el tratamiento 5, se aplicó un 70% de la dosis al voleo en invierno y el restante 30% en forma localizada a la siembra. En todos los casos se aplicó P como Superfosfato Triple de Calcio (0-20-0). Los tratamientos se arreglaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con 4 repeticiones, contando cada unidad experimental con una superficie que varió de acuerdo a cada sitio experimental entre 12 y 30 m².

Tabla 1. Tratamientos evaluados, dosis, momento y localización del fertilizante con P en el cultivo de soja.

Tratamiento	Descripción	Dosis de P kg ha ⁻¹	Momento de aplicación	Localización
T1	Testigo	-	-	-
T2	Dosis base de P	8-15	Siembra	Localizado
T3	Dosis alta de P	25-29	Invierno	Voleo
T4	Dosis alta de P	25-29	Siembra	Voleo
T5	Dosis alta de P dividida	25-29	Invierno + siembra	Voleo + localizado

¹ Novozymes Bioag S.A. Correo electrónico: mnbz@novozymes.com; ² INBA-CONICET; ³ IUNRC; ⁴ INTA Pergamino; ⁵ INTA Oliveros;

⁶ Bunge Argentina S.A.; ⁷ INTA 9 de Julio.

Tabla 2. Sitios, año de siembra, dosis de P aplicada y análisis de suelo inicial (0 a 20 cm). Pe = P extractable (Bray y Kurtz 1), M.O. = materia orgánica.

Sitios (Provincia)	Siembra			Pe mg kg ⁻¹	Arena	Limo	Arcilla	M.O.	P aplicado, kg ha ⁻¹ *	
	2010	2011	2012						D. base	D. alta
9 de julio (Bs. As.)	Si	Si	Si	10	650	200	150	22	8	28
Ferre (Bs. As.)	Si	Si	Si	14	280	480	230	28	10	25
Aldao (Sta. Fe)	Si	No	No	10	250	727	23	24	15	28
Carcarañá (Sta. Fe)	Si	Si	Si	12	20	740	240	25	15	28
Río cuarto (Cba.)	No	Si	Si	15	320	560	120	18	9	29

* P expresado como P elemental, 10 kg P ha⁻¹ equivalen a 114 kg de SFT ha⁻¹.

Tabla 3. Respuesta en rendimiento de soja al agregado de P y diferencia promedio entre la respuesta a la fertilización en dosis alta y dosis base de P para los 12 sitios evaluados.

Tratamientos	Campaña		
	2010	2011	2012
Fertilizados con P-control	363 a ¹	214 a	378 a
Dosis alta - Dosis base	300 a	491 a	445 a

¹ La ausencia de letras distintas indican la ausencia de diferencias significativas entre campañas ($p > 0.05$).

Tabla 4. Respuesta en rendimiento de soja a la aplicación de P y diferencia entre la dosis alta y la dosis base de P para los doce sitios evaluados en los tres años.

Sitio	Respuesta a la aplicación de P	Diferencia dosis alta vs. dosis base siembra
1	438* ¹	268
2	253	269
3	526*	227
4	550*	848*
5	472*	847*
6	327*	-13
7	175	12
8	230*	61
9	51	113
10	637*	97
11	907*	837*
12	2655*	1046*

¹ Las respuestas y diferencias seguidas con asterisco indican diferencias significativas ($p > 0.05$).

Los cultivos se sembraron con semillas de soja de variedades de alta producción según cada región, inoculadas con *Bradyrhizobium japonicum* para

proveer una adecuada nutrición nitrogenada. Además, en todos los experimentos se aplicó azufre (S) para corregir posibles deficiencias de este nutriente, en dosis que variaron entre 10 y 18 kg de S ha⁻¹ año⁻¹. Los ensayos se mantuvieron libres de plagas, enfermedades y malezas.

En los lugares de estudio, se tomaron muestras compuestas (0-20 cm) en cada sitio experimental, para la caracterización de los suelos. Los suelos donde se realizaron los ensayos son representativos de los lotes agrícolas con contenido de materia orgánica inferior a 28 g kg⁻¹. El contenido de P estuvo en un rango que varió entre 10 y 15 mg kg⁻¹ (Tabla 2).

Al momento de la cosecha se determinó el rendimiento de grano de cada una de las unidades experimentales. Se tomaron muestras de los granos de cada tratamiento para la determinación del contenido de P (espectrometría de emisión atómica por plasma inducido) para calcular el balance aparente de este nutriente. El balance de nutrientes se calculó como la diferencia entre las cantidades de nutrientes aplicadas y removidas de un sistema de producción. La eficiencia en el uso del P (EUP) se calculó como el cociente entre la respuesta a P y la dosis aplicada. Los datos fueron analizados con el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2012), mediante análisis de variancia para cada sitio y para el conjunto de los sitios, se realizaron además pruebas de comparación de medias y análisis de regresión.

Resultados

En las condiciones de este estudio, los rendimientos de soja variaron entre 1501 y 6741 kg ha⁻¹. El análisis en conjunto a través de todos los sitios y años mostró que el rendimiento promedio de soja para los tratamientos sin fertilización de P fue de 3303 kg ha⁻¹ con una respuesta, en promedio para los 4 tratamientos de fertilización en los tres años, de 566 kg ha⁻¹ ($p < 0.05$). Esta respuesta, equivalente a mejoras del 17% en la producción, sustenta la importancia que tiene el agregado de P para alcanzar altos rendimientos del cultivo cuando los niveles extractables son inferiores a 15 mg kg⁻¹. Del mismo modo, se observó que los tratamientos con dosis

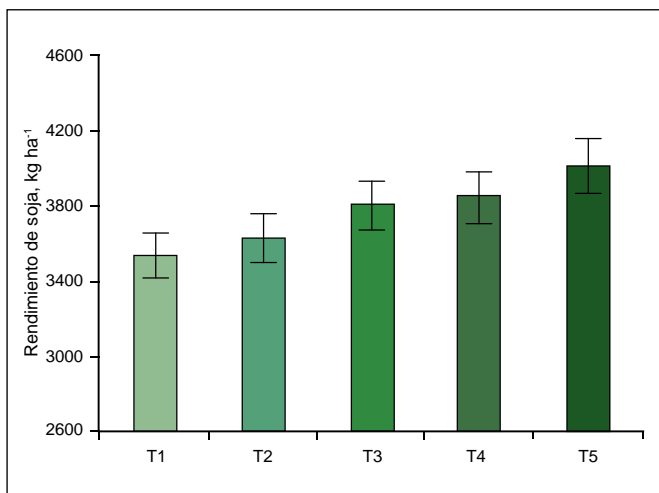


Figura 1. Rendimiento medio del cultivo de soja como resultado de diferentes dosis, momentos y formas de localización de P en 12 sitios y 3 campañas de la región pampeana de Argentina. Medias de tratamientos con distinta letra difieren significativamente entre sí ($p \leq 0.05$). Las barras indican el error estándar.

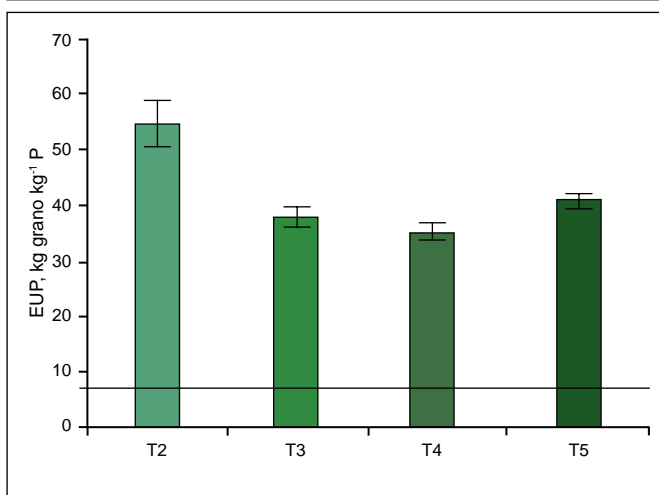


Figura 2. Eficiencia de uso de P (EUP) para los diferentes momentos y dosis de aplicación de P. Promedio de 3 campañas y 12 sitios de experimentación en la región pampeana de Argentina. La línea horizontal continua muestra la relación media de precios históricos entre granos de soja y P del fertilizante fosfato monamónico (Agromercado, 2014). Las barras indican el error estándar.

alta de fertilización con P, aplicados tanto en el invierno como en la siembra, mostraron mayores rendimientos con respecto al tratamiento Testigo (703 kg ha^{-1} , $p \leq 0.05$) o los fertilizados con la dosis base incorporada al sembrar (186 kg ha^{-1} , $p \leq 0.05$). Estos resultados sugieren que los niveles de P aplicados como base a la siembra, definidos según el uso frecuente en cada región estudiada, fueron insuficientes para alcanzar los máximos rendimientos. Por lo tanto, la fertilización con dosis mayores a 8 o $15 \text{ kg de P ha}^{-1}$ permitieron mejorar los rendimientos. Se observó que los aumentos en los rendimientos fueron independientes de la campaña considerada. En las condiciones de estos estudios, tanto la respuesta relativa a la aplicación P como la diferencia

en producción según dosis de fertilización con P fueron indistintas de los años de aplicación (Tabla 3).

La fertilización con P, en la combinación de los tratamientos de dosis base y de dosis alta, mejoró los rendimientos de soja en todos los sitios, variando el incremento de producción entre 51 y 2655 kg ha^{-1} (Tabla 4). Sin embargo, la información disponible no fue suficiente para determinar factores que discriminen entre sitios con diferente nivel de respuesta media a la fertilización. De los 12 sitios analizados, en 9 de estos (75% de los casos), las respuestas positivas fueron estadísticamente significativas a un nivel de $p \leq 0.05$ (Tabla 4). En el análisis para determinar si los incrementos en rendimiento se debieron a los tratamientos con dosis base o de dosis altas, se observó que la respuesta debida al aumento de dosis de fertilización fue de hasta 1046 kg ha^{-1} y en 4 de los 12 sitios (30% de los casos) con diferencias con un nivel de $p \leq 0.05$ entre ambos tratamientos de fertilización. En general, entre los tratamientos con alta dosis de fertilización con P, los mayores incrementos en producción tendieron a observarse cuando la dosis se aplicó fraccionada en superficie anticipada a la siembra y localizada en el momento de la siembra (Figura 1).

Con respecto a la localización del P, las diferencias entre tratamientos de fertilización en superficie, localizada en bandas y fraccionada entre ambas formas de aplicación, fueron significativas ($p \leq 0.05$). La información disponible fue insuficiente para describir diferencias en los rendimientos según la aplicación de los tratamientos con dosis alta de P en superficie ("al voleo") entre la siembra y durante el invierno. La estrategia de mejor comportamiento combinó la aplicación anticipada del P con 70% en el invierno, y el restante 30% localizado durante la siembra (Figura 1). En promedio, se observaron aumentos en la producción de soja de 186 kg ha^{-1} por incrementar la dosis de P de 0 a 8 o 15 kg P ha^{-1} , y de 368 kg ha^{-1} entre los tratamientos de dosis alta de P completa tanto en el invierno como en la siembra y esta dosis alta de P fraccionada entre superficie y localizada en la siembra.

La fertilización de base con P durante la siembra mostró la mayor eficiencia en el uso del P aplicado (EUP) pero con la mayor variabilidad en su comportamiento (Figura 2). Por el contrario, los tratamientos de fertilización con dosis altas de P obtuvieron similares EUP entre sí y una menor variabilidad.

La dosis de P aplicado de base al fertilizar en el momento de la siembra (8 a 15 kg P ha^{-1}) mostró ser insuficiente para reponer la exportación media de P en los granos generando balances aparentes negativos de P (Figura 3). Al superarse los $15 \text{ kg de P aplicado ha}^{-1}$, no solo se incrementaron los rendimientos sino que se lograron balances aparente medios del nutriente positivos. El testigo sin fertilizar y el tratamiento que recibió entre 8 y $15 \text{ kg de P ha}^{-1}$ mostraron un balance aparente negativo

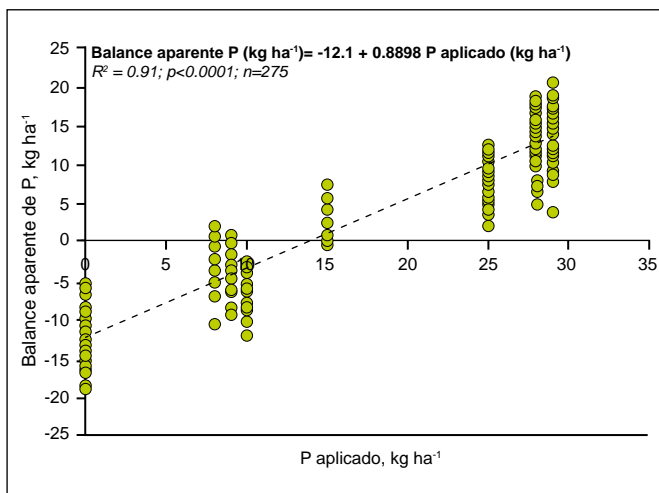


Figura 3. Balance aparente de P según dosis de fertilización con P en 5 sitios representativos de la región pampeana de Argentina y 3 campañas productivas.

Tabla 5. Concentración de P en granos de soja (%) según diferentes dosis y momento de aplicación de P. Promedio de 12 sitios. Entre paréntesis se indica el error estándar de la media.

Tratamiento	P en grano, %
Testigo sin fertilizar	0.39 (±0.010)
P base siembra	0.40 (±0.009)
P alto al voleo	0.42 (±0.006)
P alto fraccionado	0.41 (±0.008)

del P. En cambio, si bien el tratamiento que recibió 15 kg de P ha⁻¹ alcanzó altos rendimientos de soja (3220 kg ha⁻¹), la cantidad aportada de P cubrió la demanda del cultivo alcanzado un balance positivo de 2.8 kg de ha⁻¹. Los tratamientos con la aplicación de entre 25 y 29 kg de P ha⁻¹ mostraron balances positivos de P de entre 7 y 18 kg ha⁻¹.

La concentración de P en grano tendió a ser mejor en los tratamientos fertilizados que en ausencia de esta práctica. En promedio, los contenidos de P en los granos de los tratamientos de fertilización en dosis de base fueron 2.6 % mayores que el control sin fertilizar. La aplicación de altas dosis de fertilización con P, independientemente de la ubicación y momento de fertilización, permitió incrementar en promedio 6.6% la concentración del nutriente en los granos (Tabla 5).

Conclusiones

Los resultados de la evaluación de 12 casos representativos, evaluados en tres años y cinco localidades de la región en suelos con limitaciones en la oferta de P y bajo condiciones continuas de producción de soja, muestran que la aplicación de una dosis de base en el momento de la siembra de entre 8 y 15 kg ha⁻¹ de P, semejante a la práctica de fertilización actual, logra incrementar parcialmente la producción de

granos (186 kg ha⁻¹) y la EUP. Las mayores mejoras en rendimientos se logran con dosis de entre 25 y 29 kg ha⁻¹ de P aplicadas en superficie (“al voleo”) durante el barbecho en el invierno o en pre-siembra de los cultivos o combinando 70% de la dosis en superficie y el resto localizada en el momento de la siembra. En promedio, la fertilización en superficie mostró aumentos de 532 kg ha⁻¹ y 949 kg ha⁻¹ con aplicaciones fraccionadas. Esta última alternativa además de contribuir a incrementar los rendimientos, permitiría desarrollar estrategias de manejo de la fertilización que permitan mejorar los balances aparentes del nutriente al compensar los niveles de exportación de P en los granos.

Agradecimientos

A Fertilizar Asociación Civil por el financiamiento de este estudio.

Bibliografía

Agromercado. 2014. Síntesis Económica. Revista Agromercado 346 (Febrero 2014), 72 p.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González., M. Tablada, y C.W. Robledo. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, F.C.A., Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>

Echeverría, H.E., y F.O. García. 2005. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA. Buenos Aires, Argentina.

Ferraris, G. 2008. Fertilización de la soja. pp. 261-278. En: R. Melgar y M. Díaz Zorita (eds). Fertilización de cultivos y pasturas, 2^{da} edición ampliada y actualizada. 569 p.

García, F.O., y M.F. González Sanjuan. 2012. La nutrición de suelos y el balance de nutrientes ¿Cómo estamos?. Fertilizar Asociación Civil. Diciembre 2012, Revista No. 24.

Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría, y H. Angelini. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA / Vol. 38:(1):33-39.

Salvagiotti, F., M. Barraco, D. Dignani, H. Sanchez, A. Bono, P. Vallone, G. Gerster, C. Galarza, J. Montoya, y V.J. Gudelj. 2013 Plant stand, nodulation and seed yield in soybean as affected by phosphate fertilizer placement, source and application method. European Journal of Agronomy 51:25-33.

SIIA, Sistema Integrado de Información Agropecuaria. 2013 Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. <http://www.sii.gov.ar>, consultado en Marzo 13.

Ventimiglia, L.A., y H.G. Carta. 2005. Soja: Efecto de los fertilizantes aplicados en la línea de siembra sobre el número de plantas y el rendimiento. Informaciones Agronómicas 28:23-28. ♦

Requerimientos y respuestas a la fertilización del maíz en suelos de Sabanas Ácidas de Colombia

Jaime H. Bernal¹, Gloria E. Navas y Ruby Stella Hernández S.

Introducción

Los suelos de sabanas ácidas de Colombia ocupan un área cercana a las 17 millones de hectáreas dedicadas en su gran mayoría a la ganadería extensiva con pastos nativos y algunas áreas con pasturas mejoradas. Gran parte de estos suelos se encuentran clasificados como Oxisoles por su pH muy ácido, baja fertilidad, altos contenidos de aluminio intercambiable y horizontes profundos (Vera, 1996). Se estima que cerca de 3 100 000 hectáreas de estos suelos, ubicadas en los Llanos Orientales de Colombia, pueden ingresar a la agricultura con el uso de enmiendas para corregir los problemas de acidez e incrementar la saturación de bases intercambiables, junto con la utilización de germoplasma adaptado a las condiciones de acidez (Valencia y Leal, 1996). Como resultado del trabajo cooperativo entre el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), fueron liberados en el año 2000 y 2001 dos híbridos de maíz amarillo, 'Corpoica H-108' y 'Corpoica Altillanura H-111' respectivamente, adaptados a las condiciones de suelos ácidos y con un buen potencial de producción. En el año 2013 fueron sembradas 6334 hectáreas de maíz en suelos de sabanas con dos años o más de rotación maíz-soya (FENALCE, 2013).

La aplicación de las cantidades adecuadas de nutrientes es un aspecto clave en el incremento de la producción del maíz, particularmente cuando los agricultores usan maíces híbridos de alto potencial de rendimiento (Attanandana y Yost, 2004). Numerosos estudios sobre fertilización en el cultivo de maíz fueron realizados en suelos de mediana a buena fertilidad (Entisoles e Inceptisoles) por instituciones de investigación estatales y universidades, dando lugar a una serie de recomendaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de acuerdo con el nivel de fertilidad del suelo (ICA, 1992). Sin embargo, existe muy poca información sobre el manejo de la fertilización del cultivo de maíz en suelos de sabanas ácidas. En la actualidad, las recomendaciones de fertilización utilizadas por los agricultores en los suelos de sabana son muy generales y en algunos casos no se relacionan con los requerimientos de nutrientes del cultivo y la disponibilidad en el suelo, dando lugar a un uso desequilibrado e ineficiente de los fertilizantes y a elevados costos de producción. En el año 2013, los productores de maíz en las sabanas invirtieron en el manejo de enmiendas y fertilización un 35.1% de los costos totales de producción (FENALCE, 2013).

En la producción agrícola moderna, los fertilizantes comerciales se utilizan para corregir las deficiencias

nutricionales de las plantas, mantener en los cultivos niveles nutricionales eficientes y balanceados, generar en las plantas resistencia a condiciones de estrés, mejorar la calidad de las cosechas y mantener en nivel óptimo las condiciones de fertilidad del suelo (Guerrero, 1994). Cuando se usa N y P en programas desbalanceados de fertilización, como cuando se aplican en exceso a la demanda, resultan pérdidas que contribuyen a la carga de nutrientes en arroyos, ríos y otros cuerpos de agua. El uso desbalanceado de fertilizantes también causa degradación del suelo, particularmente cuando se usan solamente fertilizantes nitrogenados que promueven la remoción de P y K del suelo que no son repuestos con la adición de fertilizantes portadores de estos nutrientes (Attanandana y Yost, 2004).

Para un buen diagnóstico que permita recomendar fertilizantes y/o enmiendas es preciso conocer cuales son los requerimientos del cultivo, los niveles de extracción de nutrientes, los niveles críticos del elemento en el suelo y tejidos del cultivo, la eficiencia en la extracción de los nutrientes, y trabajos de calibración y ajuste de la fertilización en condiciones de campo (Laegreid et al., 1999).

Por todas estas razones existe una urgente necesidad de generar recomendaciones de fertilización para los híbridos de maíz sembrados en condiciones de suelos de sabana, con el fin de mejorar la eficiencia en la utilización de los nutrientes y mantener la sostenibilidad del sistema productivo.

Materiales y métodos

Para determinar las necesidades de fertilización con N, P y K en el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' se siguieron las siguientes etapas:

- **Determinación de las curvas de respuesta a N, P y K en suelos de sabana nativa y sabana mejorada (con dos rotaciones de maíz-soya).** Experimentos con diferentes dosis de N, P y K fueron establecidos en dos suelos de sabana: sabana nativa (suelos iniciando la producción de cultivos) y sabana mejorada (suelo con dos años de rotación maíz-soya). Fueron evaluadas 5 dosis de N: 0, 50, 100, 150, y 200 kg ha⁻¹. Para P se evaluaron 5 dosis de P₂O₅: 0, 30, 60, 90, y 120 kg ha⁻¹. E igualmente con K, 5 dosis de K₂O; 0, 30, 60, 90 y 120 kg ha⁻¹. En cada uno de los experimentos se adicionaron los nutrientes que no eran objeto del tratamiento para cubrir las necesidades del cultivo. Los tres experimentos fueron establecidos en un diseño de bloques al azar con 4 repeticiones.

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-CORPOICA. Villavicencio-Meta. Correo electrónico: jhbernal@corpoica.org.co

- **Evaluación de la respuesta en producción del cultivo de maíz con diferentes dosis de N-P-K.** La respuesta del híbrido de maíz a tres dosis de N (100, 150 y 200 kg ha⁻¹), dos de P (60 y 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹) y tres de K (30, 60 y 90 kg de K₂O) se estudió en un diseño de bloques al azar con arreglo factorial de tratamientos (3 N x 2 P₂O₅ x 3 K₂O) y 4 repeticiones. Las dosis utilizadas para cada elemento fueron seleccionadas de acuerdo con los resultados de las curvas de respuesta. El experimento fue evaluado en dos suelos de sabana: sabana nativa y sabana mejorada.
- **Establecimiento de los niveles de extracción de N, P y K.** Se tomaron muestras de tres plantas por cada tratamiento del ensayo de curvas de respuesta para raíz, tallo, hojas, espigas y mazorcas. Las cuales fueron llevadas al horno a una temperatura de 60°C por un periodo de 72 horas, para luego ser molidas y determinar los contenidos de nutrientes extraídos por el cultivo al momento de la floración.
- **Relación entre la concentración de nutrientes en la hoja y la producción de grano.** En la época de floración se realizó un muestreo de 10 hojas que subtienden la mazorca en cada uno de los tratamientos del ensayo de curvas de respuesta, para realizar un análisis de concentración de nutrientes (Jones et al., 1991).

Para el análisis de los datos se utilizó el programa estadístico SAS® (Statistical Analysis System, versión 8.0), realizándose análisis de variancia y correlaciones y regresiones entre las variables de importancia.

Condiciones químicas de los suelos

En cada una de las repeticiones fueron tomadas muestras de suelo a una profundidad de 20 cm para su análisis químico. Los análisis fueron realizados siguiendo la metodología propuesta por el IGAC (2006). Los suelos en donde fueron realizados los experimentos de fertilización presentaron contenidos medios de materia orgánica y pH muy ácidos. El suelo de sabana nativa presentó un contenido de saturación de aluminio del 64% y muy bajos contenidos de P y bases intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺), por lo que se tomó la decisión de aplicar 2.5 t ha⁻¹ de cal dolomítica para reducir la toxicidad de aluminio e incrementar la saturación de bases. Por otra parte, el suelo de sabana mejorada (2 años de rotación maíz-soya), presentó una saturación de aluminio del 18%, y mayores contenidos de P y bases intercambiables (**Tabla 1**). Este suelo

había recibido como enmienda inicial 2.5 t ha⁻¹ de cal dolomítica dos años atrás.

Resultados y discusión

Se encontraron diferencias significativas en la producción del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' entre las localidades y dosis de N aplicadas. En el suelo de sabana nativa se observaron incrementos significativos en producción de grano con aplicaciones de N hasta de 100 kg ha⁻¹ (**Figura 1**), mientras que en suelos de sabana mejorada se encontró una respuesta lineal en la producción al incrementar las dosis de N. La baja respuesta en producción de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a dosis superiores a 100 kg ha⁻¹, en la localidad de sabana nativa se debió probablemente a que la fuerte acidez del suelo estaría afectando el normal crecimiento del híbrido a pesar de haberse aplicado la enmienda un mes antes de la siembra. En términos generales, no existe un método de análisis para medir la disponibilidad de N en el suelo que pueda ser utilizado rutinariamente por los laboratorios. La dificultad de no contar con un método adecuado radica en gran parte a las transformaciones del N en el suelo, las que son influenciadas por las condiciones ambientales. Por lo tanto, las recomendaciones sobre las necesidades de N en el cultivo de maíz son basadas en las curvas de respuesta obtenidas en diferentes condiciones edafoclimáticas (EMBRAPA, 1997). Los resultados obtenidos indican la necesidad de realizar los ajustes sobre los requerimientos de N en los nuevos híbridos liberados para las condiciones de suelos ácidos ya que las recomendaciones existentes para el cultivo de maíz están por debajo de la demanda de estos híbridos.

Respuestas significativamente diferentes en rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' fueron encontradas entre las localidades y entre las dosis de P. En la localidad de sabana nativa (P = 2 mg kg⁻¹), se observó un incremento lineal en la producción del híbrido al pasar de 0 a 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹, y alcanzó la máxima respuesta en producción, 3118 kg ha⁻¹, con la dosis de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (**Figura 2**). En suelos de sabana mejorada (P = 14 mg kg⁻¹), se encontraron incrementos significativos en producción en el híbrido hasta la dosis de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, 3786 kg grano ha⁻¹, superando en 1222 kg grano ha⁻¹ a los encontrados con la misma dosis en suelos de sabana nativa. La respuesta del híbrido 'Corpoica H-108' hasta 60 kg de P₂O₅ en el suelo con contenidos de P menores a 15 mg kg⁻¹, se encuentra

Tabla 1. Valores promedio de propiedades de los suelos de las localidades de la Altillanura plana colombiana.

Localidad	pH	M.O.	P	Al	Ca	Mg	K	Sat. Al.	Sat. Bases
		%	mg kg ⁻¹	----- cmol kg ⁻¹ -----			%	%	
Sabana nativa	4.3	3.2	2	2.2	0.44	0.23	0.05	64*	21
Sabana mejorada	4.9	3.5	14	0.6	1.76	0.63	0.06	18	71

* El porcentaje correspondiente a los contenidos de H⁺ de la acidez intercambiable no están referenciados en la tabla.

dentro del rango de respuesta de 50 kg a 75 kg de P_2O_5 reportadas para el cultivo de maíz por Sánchez y Owen (2001) en Inceptisoles de los Llanos Orientales.

En suelos de sabana nativa, el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' respondió significativamente en producción de grano al incremento en la dosis de K_2O por ha, alcanzando el pico máximo de producción, 3378 kg ha⁻¹, con la dosis de 120 kg ha⁻¹, mientras que en suelos de sabana mejorada no se encontraron respuestas en producción de grano a dosis superiores a los 30 kg ha⁻¹ de K_2O (Figura 3). La baja respuesta a K encontrada en suelos de sabana mejorada indica probablemente que la planta de maíz obtiene una buena parte de este elemento de la fracción no disponible del suelo. Krishnakumari and Khera (1983) estudiaron el comportamiento de la disponibilidad de potasio de un Inceptisol con contenidos muy bajos de K disponible y no encontraron respuestas a la aplicaciones de K, aun cuando el suelo fue fertilizado de forma intensa con N y P sin la adición de K por un periodo de 10 años.

Respuesta del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a diferentes dosis de N-P-K. Se encontraron diferencias altamente significativas entre las respuestas en producción de grano en las localidades, entre dosis de N, dosis de K, con interacciones Localidad x N y Localidad x K significativas. No se encontraron interacciones significativas entre los tres elementos en ninguna de las localidades. El promedio de producción del híbrido de maíz en el suelo de sabana mejorada fue 5165 kg ha⁻¹, y superó en 1267 kg ha⁻¹ al rendimiento logrado en la localidad de sabana nativa, demostrando con esto la capacidad del híbrido a incrementar la producción de grano a medida que las condiciones del suelo se mejoran. Los mayores incrementos en producción de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' se encontraron en su orden con el incremento en las dosis de N>K>P en suelos de sabana mejorada, mientras que en suelos de sabana nativa el orden de respuesta fue de K>N=P.

En el suelo de sabana mejorada, el incremento en la dosis de N de 100 kg ha⁻¹ a 150 kg ha⁻¹, ocasionó un incremento significativo en la producción de grano de 848 kg ha⁻¹ (Figura 4), mientras que con la aplicación de 60 kg ha⁻¹ de K_2O se aumentó en 349 kg la producción de grano, comparada con la obtenida con la dosis de 30 kg K_2O . En el suelo de sabana nativa no se encontró respuesta en el rendimiento de grano del híbrido de maíz cuando la dosis de N se incrementó de 100 kg ha⁻¹ a 150 y 200 kg ha⁻¹. Mientras que con la aplicación de 90 kg ha⁻¹ de K_2O se obtuvo un incremento 1108 kg de grano con respecto a la dosis de 30 kg de K_2O (Figura 5).

En cuanto al P no se presentaron diferencias significativas en la producción de grano con el aumento en la dosis de P_2O_5 de 60 kg ha⁻¹ a 90 kg ha⁻¹, a pesar de los bajos contenidos de P presentes en el suelo de sabana nativa.

Los resultados encontrados en producción de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' indican que este material

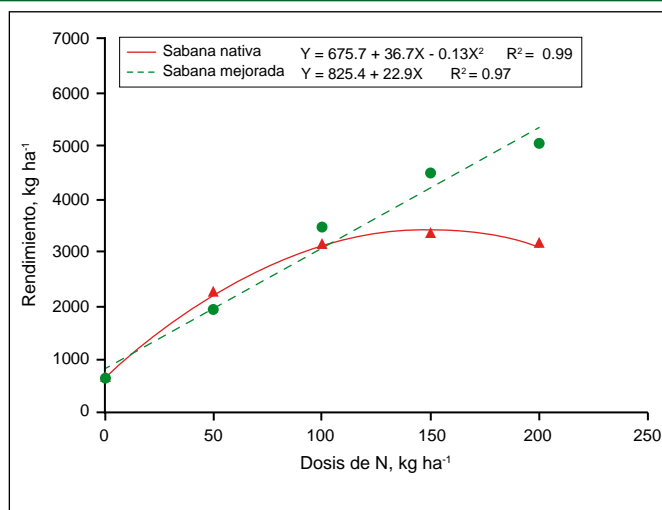


Figura 1. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2002, cultivo del primer semestre.

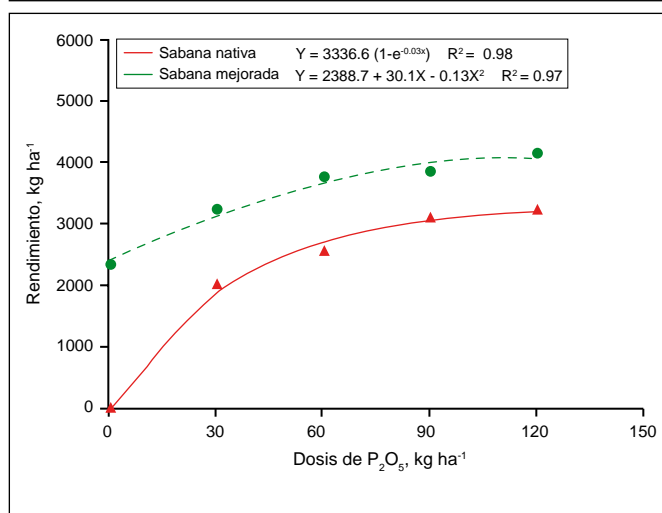


Figura 2. Efecto de la fertilización fosfórica sobre el rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2002, cultivo del primer semestre.

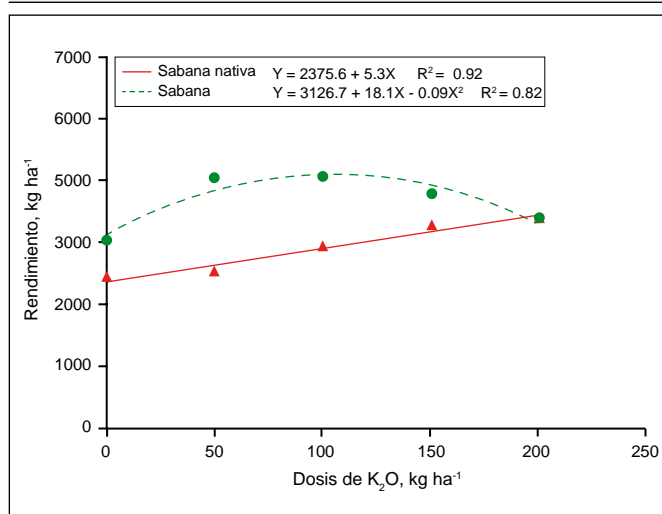


Figura 3. Efecto de la fertilización con K sobre el rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia, 2003 cultivo de primer semestre.

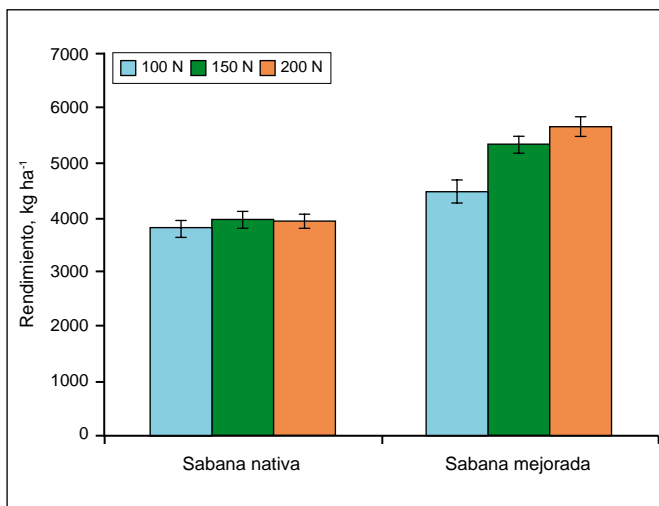


Figura 4. Respuesta en rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a varias dosis de N en suelos de sabana nativa y mejorada. Villavicencio-Meta, Colombia 2003 cultivo de primer semestre.

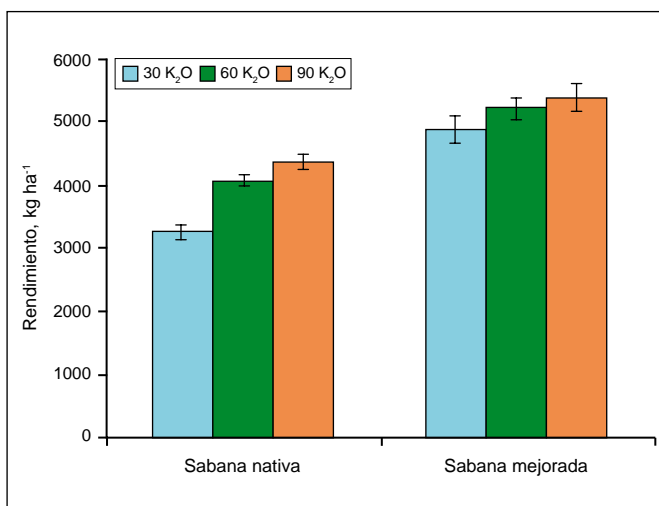


Figura 5. Respuesta en rendimiento de grano del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a varias dosis de K₂O en suelos de sabana nativa y mejorada. Villavicencio-Meta, Colombia 2003, cultivo de primer semestre.

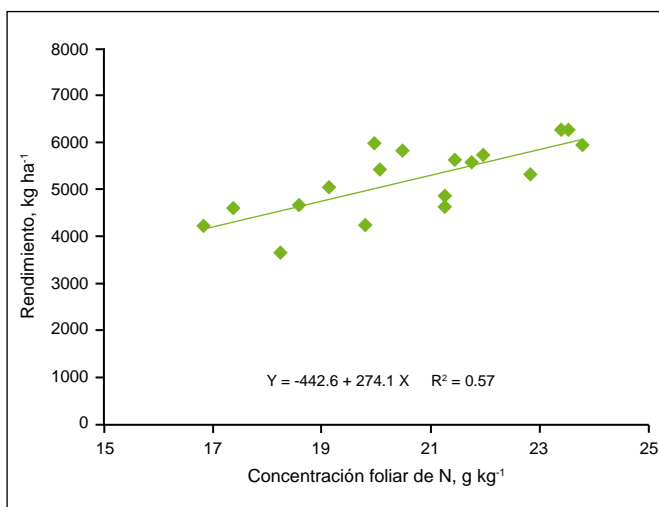


Figura 6. Relación entre la concentración de N en la hoja y el rendimiento de grano del híbrido 'Corpoica H-108' en un suelo de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2003, cultivo de primer semestre.

tiene la capacidad de producir adecuadamente en suelos ácidos de sabanas, recién ingresadas a la producción de cultivos, e incrementar significativamente la producción de grano cuando los niveles de acidez del suelo se reducen y se incrementan los niveles de fertilidad.

Extracción de nutrientes por el cultivo. Bajo las condiciones de suelo de sabana, el híbrido de maíz presentó una extracción de: 25.5 kg N, 1.7 kg P, y 29.2 kg K t⁻¹ grano producida. Los valores de extracción de N y K por tonelada de grano (15% humedad) producida con el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' son muy similares a los reportados por Fageria et al. (1991). Al mismo tiempo, la recuperación aparente de los nutrientes aplicados al suelo fue de 77.4% para N, 14.8% para P y de 135% para K (**Tabla 2**). Valores de recuperación aparente de N por el cultivo de maíz fluctúan entre 31% a 60% en suelos del Brasil (EMBRAPA, 1997).

Relación entre producción de grano y concentración de N-P-K en la hoja. En el suelo de sabana mejorado se encontraron correlaciones positivas entre el rendimiento de grano del híbrido 'Corpoica H-108' y la concentración de N en la hoja, $r=0.43^{**}$, la concentración de P, $r=0.44^{**}$ y la concentración de K, $r=0.36^*$. El incremento en la concentración de N en la hoja del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' estuvo asociado con aumentos lineales en la producción de grano hasta la concentración de 23.8 g de N kg⁻¹ (**Figura 6**). Mientras que en el suelo de sabana nativa solo se presentó una correlación significativa entre el rendimiento y la concentración de K en la hoja, 0.34*. Como se puede ver en la **Figura 7**, el rendimiento de grano presentó un incremento lineal con el incremento en la concentración de K desde 9.0 g kg⁻¹ hasta 14.3 g kg⁻¹.

En el rango de rendimientos y concentraciones foliares de N y K registrados en el híbrido 'Corpoica H-108', el nivel de suficiencia de N estaría alrededor de 24 g kg⁻¹, mientras que el nivel óptimo para el caso de K se estaría cercano a los 15 g kg⁻¹. Jones et al. (1991) reportan valores de suficiencia en la concentración de N de la hoja que subtiende la mazorca entre 27 a 40 g kg⁻¹, P entre 2.5 a 5.0 g kg⁻¹ y K entre 17 a 30 g kg⁻¹.

Tabla 2. Extracción de N, P y K por el híbrido de maíz 'Corpoica H-108' y tasa de recuperación aparente de los elementos aplicados en suelos de sabana. Villavicencio-Meta, Colombia 2003A.

Nutriente	Tasa recuperación aparente % ¹	Cantidad extraída kg t ⁻¹	
		Sabana	Literatura ²
N	77.4	25.5	21.3
P	14.8	1.7	4.2
K	135	29.2	25.4

¹Fageria y Baligar (2008); ²Fageria et al. (1991)

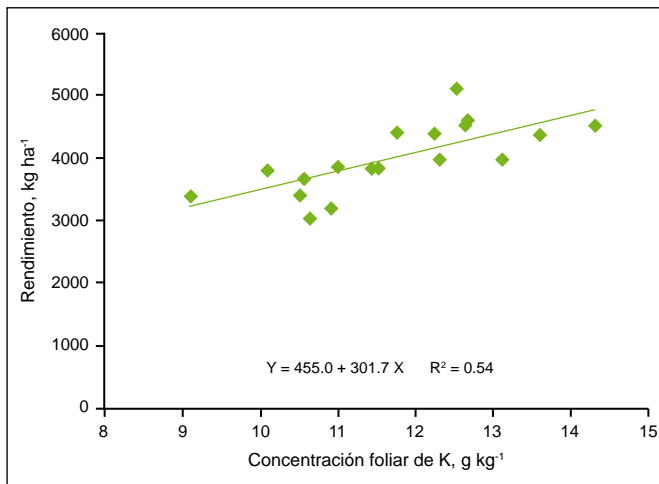


Figura 7. Relación entre la concentración de K en la hoja y el rendimiento de grano del híbrido 'Corpoica H-108' en un suelo de sabana mejorada. Villavicencio-Meta, Colombia 2003, cultivo de primer semestre.

Conclusiones

- La respuesta en rendimiento del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' a las aplicaciones de N, P y K variaron según el grado de fertilidad del suelo.
- En el suelo de sabana nativa las mayores respuestas en rendimiento de grano fueron encontradas con las dosis de 100 kg de N ha⁻¹, 90 kg de P₂O₅ ha⁻¹ y 90 kg de K₂O ha⁻¹.
- En la sabana mejorada el híbrido tuvo mayor rendimiento y se logró una respuesta en producción con dosis de N entre 150 y 200 kg ha⁻¹, 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹, y 60 kg de K₂O ha⁻¹.
- El incremento en las dosis de N y K ocasionó un incremento en la concentración de N y K en la hoja que subtiende la mazorca logrando valores de 23.8 g de N kg⁻¹, y 14.3 g de K kg⁻¹.
- La concentración de N y K en la hoja presentó una correlación positiva y altamente significativa con el rendimiento de grano con valores de 0.43**, y 0.36** para N y K, respectivamente.
- En promedio, una tonelada de grano cosechada del híbrido de maíz 'Corpoica H-108' extrae del suelo 25.5 kg de N, 1.7 kg de P y 29.2 kg de K.

Bibliografía

- Attanandana, T., y R.S. Yost. 2004. Estrategias de manejo de nutrientes por sitio específico. Informaciones Agronómicas, INPOFOS, No. 53. Quito, Ecuador.
- Barber, S.A. 1984. Nutrient uptake by plant roots growing in soil. In: Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. John Wiley & Sons (eds.), New York. pp. 90-113.
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria. 1997. Manejo da fertilidad do solo. En: Recomendações Técnicas para o Cultivo do Milho. 2ª edição, Serviço de produção de Informação, Brasília, DF.

Fageria, N.K., Baligar, V.C. y Jones, C.A. 1991. Corn. In: Growth and mineral nutrition of field crops. Marcel Dekker (eds), New York. pp. 205-227.

Fageria, N.K., V.C. Baligar, Li, Y.C. . (2008). The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. Journal of Plant Nutrition 31:1121-1157.

FENALCE. 2013. <http://www.fenalce.org/nueva/pg.php?pa=19&d=Estadisticas%20Fenalce>.

Guerrero, R.R. 1994. Propiedades generales de los fertilizantes químicos. En: Memorias seminario "Fertilidad de suelos, diagnóstico y control". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, D.C. Colombia.

ICA Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Edit. Produmedios, Bogotá.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2006. Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos, Sexta Edición. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá. ISBN 978-958-9067-98-7. 674 p.

Jones, J.B., B. Wole, y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook, a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro Publishing, Inc., Athens, Georgia. 98 p.

Laegreid, W.H., C. Suwannarat, y T. Vearasilp. 1999. NPK fertilizer management for maize: decision aids and test kits. Thai Journal of Soil and Fertilizer. 22:174-186.

Sánchez, L.F, Owen. E J. 2001. Fertilidad de los suelos y fertilización de cultivos en los llanos orientales. De fertilidad de suelos diagnóstico y control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, segunda edición. Bogota, D.C., Colombia pp 350-361.

Vera, R. 1996. Actividades de Investigación del CIAT del Programa de Tierras Bajas Tropicales en las Sabanas Neotropicales. En: Biodiversidad y funcionamiento de Pastizales y Sabanas en América Latina. CYTED-CIELAD (Ed), Producciones Karol. Venezuela.

Valencia, R.A., y D.M. Leal. 1996. Alternativas genéticas para sistemas de producción en sabanas ácidas de la Orinoquia colombiana. Suelos Ecuatoriales. 26(1):35-43. ❖



Maíz con 150 kg ha⁻¹ de N (izquierda), sin N (derecha). Sabana mejorada.

Eficiencia de utilización del nitrógeno en sistemas lecheros pastoriles

Fernando Bargo^{1*}

Introducción

El uso de pasturas para producir leche resulta en sistemas de producción de bajo costo porque el forraje pastoreado es una fuente de nutrientes barata (Clark y Kanneganti, 1998; Peyraud y Delaby, 2001). Los sistemas de producción de leche pastoriles eficientes están caracterizados por una alta producción de leche por unidad de superficie (leche ha⁻¹), mientras que los sistemas de producción de leche confinados se caracterizan por altos niveles de producción por vaca (Clark y Kanneganti, 1998). Las pasturas utilizadas con vacas lecheras son comúnmente especies templadas de alta calidad y temprano estadio vegetativo con 18 a 24% de materia seca, 18 a 25% de proteína bruta (PB), 40 a 50% de fibra detergente neutro (FDN) y 1.55 a 1.70 Mcal kg⁻¹ MS de energía neta de lactancia (Clark y Kanneganti, 1998; Muller y Fales, 1998).

Los sistemas pastoriles de producción de leche se caracterizan entonces por una alta utilización de pasturas de alta digestibilidad, bajo contenido de fibra y altos niveles de proteína. Las fracciones nitrogenadas de las praderas de alta calidad se caracterizan por contener altos niveles de nitrógeno (N) no proteico y proteína de alta degradabilidad ruminal (Bargo et al., 2003). Esto determina que si bien las praderas aportan mucha energía por su alta digestibilidad, la utilización del N es baja resultando en poca retención en leche y alta excreción al medio ambiente vía orina o heces. La suplementación energética constituye una alternativa efectiva para no solo aumentar la producción de leche de vacas en pastoreo, sino también la utilización del N (Bargo et al., 2003).

El primer nutriente limitante para la producción de leche de vacas de alto potencial genético en pastoreo es la energía (Kolver y Muller, 1998). En comparación con vacas consumiendo una dieta total mezclada (TMR) bien balanceada, las vacas pastoreando pasturas de alta calidad sin suplementación presentaron un menor consumo total de materia seca (19.0 vs. 23.4 kg d⁻¹, sin y con suplementación, respectivamente) y una menor producción de leche (29.6 vs. 44.1 kg d⁻¹, sin y con suplementación, respectivamente). Mientras el consumo de PB y FDN no difirió entre las vacas consumiendo pastura o TMR, el consumo total de material seco y de energía neta de lactancia fue significativamente menor en las vacas en pastoreo, sugiriendo que las vacas de alta producción en pastoreo necesitan de suplementación

energética para alcanzar su potencial genético de consumo y producción.

Materiales y métodos

Con el objetivo de estudiar la eficiencia de utilización del N en vacas lecheras en pastoreo, se realizó un ensayo con vacas lecheras de alto potencial genético de producción que pastoreaban pasturas templadas con o sin suplementación energética (Bargo et al., 2002). Se utilizaron 20 vacas lecheras de raza Holstein [peso vivo, 631 ± 71 kg; producción de leche inicial, 45.8 ± 6.6 kg d⁻¹; parición, 2.8 ± 0.8; días en leche, 101 ± 35] que fueron bloqueadas por días en leche y asignadas al azar a 4 tratamientos en 5 cuadrados latinos de 4 x 4 con periodos de 21 días. Las vacas fueron seleccionadas del Centro de Investigación y Educación de The Pennsylvania State University (University Park, PA, EE.UU.), que promediaron 11 436 kg de leche y 363 kg de proteína por lactancia. Los 4 tratamientos dietéticos fueron arreglados en un experimento factorial de 2 x 2. Los factores evaluados fueron oferta de pastura (OP) (baja vs. alta) y suplementación energética [sin suplementación (SS) vs. con suplementación (SE)]. Los 4 tratamientos dietéticos resultaron entonces de la combinación de los niveles de estos 2 factores: baja OP — sin suplementación (baja OP —SS); baja OP — suplementación energética (baja OP - SE); alta OP — sin suplementación (alta OP - SS); y alta OP — suplementación energética (alta OP - SE).

Los valores objetivo de oferta de pastura fueron 25 y 40 kg MS por vaca por día (cortando a nivel del piso) para los tratamientos de baja y alta OP, respectivamente. La composición botánica de la pastura fue medida al final de cada uno de los 4 periodos y promedió 50% cebadilla (*Bromus inermis* L.), 33% pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.), 7% Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) y 10% malezas y material muerto. La pastura fue fertilizada con N antes del inicio del primer periodo y del inicio del tercer periodo con 50 kg N ha⁻¹. La composición nutricional de la pastura fue de 21.6% MS, 92.1% materia orgánica (MO), 20.1% PB, 55.5% FDN, 27.5% fibra detergente ácido (FDA) y 71.8% de digestibilidad *in vitro* de materia seca (DIVMS). Las vacas sin suplementación no recibieron concentrado energético pero sí una premezcla de minerales y vitaminas a razón de 1 kg d⁻¹ para evitar deficiencias.

La cantidad de suplemento energético ofrecida por vaca en el tratamiento suplementado fue de 1 kg de

¹ Consultor Privado, Servicios Técnicos Lucta S.A. Correo electrónico: fernando.bargo@gmail.com

* Adaptado de la conferencia presentada al XXXVIII Congreso Anual de la Sociedad Chilena de Producción Animal (<http://www.sochipa.cl>) - Frutillar, 23 al 25 de Octubre de 2013.

concentrado cada 4 litros de leche al comienzo de los periodos 1 y 3. Se estableció un límite máximo de 10 kg de MS por vaca por día para aquellas vacas que producían más de 40 kg d⁻¹ de leche. La composición del suplemento energético fue: 62.3% grano maíz, 10.4% afrechillo de trigo, 7.8% grano cebada, 5.2% soja tostada, 5.2% melaza, 2.6% harina de gluten y el resto minerales y vitaminas. Durante cada uno de los 4 periodos de 21 días, los primeros 10 días fueron utilizados para adaptar a las vacas a cada uno de los diferentes tratamientos y los últimos 11 días para tomar las mediciones experimentales.

El consumo de pastura, concentrado y total, fue estimado entre el día 15 y 19 de cada periodo utilizando Cr₂O₃ como marcador indigestible de las heces. La producción de leche fue registrada diariamente del día 11 al 21 durante cada periodo. Se colectaron muestras de leche 3 veces (días 13, 16 y 19) que fueron analizadas por espectrofotometría infrarroja para porcentaje de grasa, proteína total y proteína verdadera (Foss 605B Milk-Scan; Foss Electric, Hillerod, Dinamarca).

Entre los periodos 2 y 3, cuando todas las vacas fueron alimentadas con una dieta TMR, se recolectó la orina total en 8 vacas (2 de los 5 cuadrados Latinos), con el propósito de estimar la excreción diaria de creatinina como marcador interno para estimar la excreción total de orina (Valladares et al., 1999) durante los periodos

de pastoreo. El volumen total de orina en los periodos de pastoreo 1, 2, 3 y 4 fue estimado usando el valor de excreción diaria de creatinina y la concentración de creatinina en la muestra de orina tomada en cada periodo (Valladares et al., 1999). La orina total de cada periodo fue utilizada para estimar la excreción total de N en orina y junto con la excreción de N en heces y leche, se calculó la eficiencia de utilización del N.

Resultados y discusión

La suplementación energética incrementó un 5% el porcentaje de proteína total y proteína verdadera en la leche, y la producción de proteína total y proteína verdadera para ambas ofertas de pastura (P < 0.05; **Tabla 1**). El incremento en la concentración y producción de proteína en leche estuvo relacionada con un mayor consumo total de energía en las vacas suplementadas. La proteína total en leche en las vacas sin suplementar y en las vacas suplementadas promedió 2.96 y 3.10%, respectivamente. Estudios previos en pastoreo han mostrado que la suplementación energética aumenta el contenido proteico de la leche (Petch et al., 1997; Sayers, 1999; Reis y Combs, 2000). La suplementación con 5 kg d⁻¹ de un concentrado en base de cereales incrementó la proteína total y la proteína verdadera en vacas lecheras pastoreando a una oferta de 23 kg MS por vaca por día (Petch et al., 1997). El aumento de 5 a 10 kg d⁻¹ de suplemento energético, incrementó la proteína en leche

Tabla 1. Producción y composición de la leche en vacas lecheras sin suplementación (SS) o suplementadas energéticamente (SE) pastoreando a baja o alta oferta de pastura (OP).

	----- Baja OP ¹ -----		----- Alta OP ² -----		SEM	----- P < -----		
	SS	SE	SS	SE		S	OP	S x OP
Leche, kg d ⁻¹	19.1	29.7	22.2	29.9	0.8	<0.01	0.04	0.03
Leche CG 3.5%, kg d ⁻¹	20.3	28.4	23.3	28.9	0.9	<0.01	0.05	0.05
Grasa, %	3.82	3.29	3.79	3.32	0.07	<0.01	0.96	0.53
Grasa, kg d ⁻¹	0.74	0.96	0.84	0.98	0.04	<0.01	0.08	0.01
Proteína total, %	2.98	3.08	2.93	3.11	0.04	<0.01	0.71	0.27
Proteína total, kg d ⁻¹	0.55	0.89	0.64	0.9	0.02	<0.01	0.03	0.05
Proteína verdadera, %	2.76	2.89	2.73	2.92	0.04	<0.01	0.98	0.42
Proteína verdadera, kg d ⁻¹	0.50	0.83	0.59	0.84	0.02	<0.01	0.03	0.05
MUN, ³ mg dl ⁻¹	13.9	11.6	14.2	11.1	0.4	<0.01	0.74	0.49
Fracciones N,⁴ %								
PV/PT	92	94	93	94	0.3	0.01	0.12	0.20
NNP/PT	8	6	7	6	0.3	0.01	0.12	0.20
MUN/PT	5	4	5	4	0.1	<0.01	0.93	0.36
MUN/NNP	70	65	76	61	2.8	0.01	0.81	0.24

¹ Baja OP – SS = baja oferta de pastura sin suplementación; Baja OP – SE = baja oferta de pastura con suplementación energética.

² Alta OP – SS = alta oferta de pastura sin suplementación; Alta OP – SE = alta oferta de pastura con suplementación energética.

³ MUN = N ureico en leche.

⁴ PV = proteína verdadera; PT = proteína total; NNP = N no proteico.

del 3.37 a 3.55% en vacas pastoreando raigrás (Sayers, 1999). El porcentaje de proteína en leche aumentó en forma lineal (2.85, 2.95 y 3.05%) con 0, 5 ó 10 kg d⁻¹ de un concentrado base grano de maíz en pasturas de alfalfa y raigrás (Reis y Combs, 2000). Delaby et al. (2001) también reportaron incrementos lineales en la proteína de la leche al aumentar linealmente la suplementación energética de vacas lecheras pastoreando a diferentes ofertas de pastura.

La suplementación energética redujo el N ureico en leche (MUN) independientemente de la oferta de pastura (14.1 vs. 11.3 mg dl⁻¹; P<0.05; **Tabla 1**). Esto concuerda con Reis y Combs (2000) quienes reportaron una reducción lineal en MUN (20.2, 16.9 y 13.4 mg dl⁻¹) para vacas suplementadas con 0, 5 ó 10 kg d⁻¹ de un concentrado base maíz. Los menores valores de MUN en las vacas no suplementadas encontrados en nuestro estudio, en comparación a los valores reportados para vacas no suplementadas por Reis y Combs (2000), puede estar relacionado con el hecho de que en nuestro estudio se pastoreó una pastura de gramíneas vs. la pastura de alfalfa en el estudio de Reis y Combs (2000). Vacas consumiendo forraje fresco de gramíneas y leguminosas tuvieron una menor concentración de MUN (10.0 vs. 14.7 mg dl⁻¹) cuando fueron suplementadas con 10 kg d⁻¹ de grano de maíz seco o húmedo en comparación con vacas no suplementadas (Reis et al., 2001). La suplementación energética incrementó la proporción de proteína verdadera sobre la proteína total y redujo

la proporción de N no proteico (NNP) y MUN sobre la proteína total (P<0.05; **Tabla 1**). Un estudio previo en el cual vacas pastorearon a una oferta de 23 kg MS por vaca por día reportó un menor contenido de NNP y MUN en leche cuando fueron suplementadas con 5 kg d⁻¹ de concentrado (Petch et al., 1997).

El consumo total de N no fue afectado por los tratamientos (643 g d⁻¹; P>0.05). El consumo de N de pastura fue numéricamente reducido en 125 g d⁻¹ por la suplementación energética. La excreción diaria de N en heces fue significativamente incrementada por la suplementación energética (158 vs. 190 g d⁻¹; P<0.05), mientras que la excreción diaria de N en orina fue significativamente reducida por la suplementación energética (229 vs. 178 g d⁻¹; P<0.05). La suplementación con concentrados incrementó la excreción de N en leche (97 vs. 135 g d⁻¹; P<0.06) porque las vacas suplementadas produjeron más leche y con un mayor contenido de proteína (**Tabla 1**).

La partición de N entre heces, orina y leche se detalla en la **Tabla 2**. El porcentaje del N consumido excretado en heces no fue afectado por los tratamientos y promedió 27% (P>0.05). Kolver y Müller (1998) reportaron 24% del N consumido en heces en vacas lecheras de alta producción consumiendo pasturas de gramíneas y suplementadas con 9 kg d⁻¹ de concentrado. Mayores excreciones de N en heces (como porcentaje del N consumido) fueron

Tabla 2. Componentes de la eficiencia de utilización del N en vacas lecheras sin suplementación (SS) o suplementadas energéticamente (SE) pastoreando a baja o alta oferta de pastura (OP).

	----- Baja OP ¹ -----		----- Alta OP ² -----		SEM	----- P < -----		
	SS	SE	SS	SE		S	OP	S x OP
Consumo N, g d⁻¹								
Suplemento	11.8	170.4	10.9	178.4	2.8	0.06	0.49	0.47
Pastura	579.3	483.8	646.9	492.4	20.4	0.12	0.28	0.22
Total	0.74	0.96	0.84	0.98	19.4	0.12	0.22	0.16
N heces, g d ⁻¹	156.9	184.3	158.7	196.6	4.6	0.05	0.18	0.17
N orina, g d ⁻¹	244.5	172.9	213.4	182.6	9.3	0.04	0.37	0.20
N leche, g d ⁻¹	92.3	131.2	100.9	138.0	4.9	0.06	0.08	0.58
Balance N, g d ⁻¹	97.4	165.8	184.8	153.6	20.9	0.47	0.32	0.03
Digestibilidad N, %	73.3	71.9	75.7	70.6	0.6	0.08	0.20	0.09
Valor Biológico, ³ %	42.2	61.9	55.8	60.6	2.5	0.18	0.16	0.01
N, % consumo								
N heces	26.7	28.1	24.3	29.4	0.6	0.08	0.2	0.09
N orina	41.8	27.3	33.2	27.8	1.7	0.16	0.17	0.03
N leche	15.7	20.0	15.8	20.6	0.9	0.02	0.59	0.21

¹ Baja OP – SS = baja oferta de pastura sin suplementación; Baja OP – SE = baja oferta de pastura con suplementación energética.

² Alta OP – SS = alta oferta de pastura sin suplementación; Alta OP – SE = alta oferta de pastura con suplementación energética.

³ Valor Biológico = [N consumido – (N heces + N orina)] / (N consumido – N heces) x 100.

reportadas por Van Vuuren (1993) en vacas lecheras con dietas basadas en gramíneas suplementadas con concentrados basados en almidón (35%).

Una interacción significativa fue encontrada entre oferta de pastura y suplementación energética para el N excretado en orina como proporción del N total consumido ($P < 0.05$). A baja oferta de pastura, la suplementación energética redujo el porcentaje de N en orina del 42 a 27%. A alta oferta de pastura, la reducción de N en orina como proporción del N total consumido fue del 33 al 28%. En nuestro estudio, los valores de N en orina como proporción del N total consumido (30%) fueron similares a los reportados en vacas suplementadas consumiendo pasturas de gramíneas por Kolver y Müller (1998). Van Vuuren (1993) encontró en vacas lecheras alimentadas con pasturas de raigrás y 6.6 kg d⁻¹ de concentrados base almidón, que el 38% del N total consumido fue eliminado en la orina. En vacas no suplementadas, el mismo autor también encontró mayores valores (54 a 66%) que en nuestro estudio (33 a 42%).

La suplementación con concentrados incrementó la proporción del N total en la leche del 15.8 al 20.3% para ambas ofertas de pastura ($P < 0.05$). El N en leche como proporción del N total consumido fue menor al 25% reportado por Kolver y Müller (1998) en vacas lecheras de alta producción suplementadas con niveles similares de concentrados (9.2 kg MS d⁻¹) pastoreando pasturas similares. Van Vuuren (1993) reportó en vacas lecheras consumiendo raigrás como único alimento que entre 16 a 23% del N consumido fue excretado en leche. En concordancia con nuestros resultados, Carruthers y Neil (1997) reportaron un aumento en N en heces y N en leche, y una reducción de N en orina como proporción del N consumido en vacas lecheras pastoreando raigrás y suplementadas con carbohidratos no solubles en comparación con vacas no suplementadas.

Conclusión

La suplementación energética en vacas lecheras pastoreando pasturas templadas de alta calidad no solo aumenta la producción de leche y su contenido proteico, sino también que resulta en significativos incrementos en la eficiencia de utilización del N consumido, reduciendo la excreción de N en orina y aumentando la retención de N en leche.

Bibliografía

- Bargo, F., L.D. Muller, J.E. Delahoy, y T.W. Cassidy. 2002. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *J. Dairy Sci.* 85:1777-1792.
- Bargo, F., L.D. Muller, E.S. Kolver, y J.E. Delahoy. 2003. Invited review: Production and digestion of supplemented dairy cows on pasture. *J. Dairy Sci.* 86:1-42.
- Carruthers, V.R., y P.G. Neil. 1997. Milk production and ruminal metabolites from cows offered two pasture diets supplemented with non-structural carbohydrate. *N.Z. J. Agric. Res.* 40:513-521.
- Clark, D.A., y V.R. Kanneganti. 1998. Grazing management systems for dairy cattle. Page 331 in *Grass for Dairy Cattle*. J. H. Cherney, and D. J. R. Cherney, eds. CAB International, Oxon, UK.
- Delaby, L., J.L. Peyraud, y R. Delagarde. 2001. Effect of the level of concentrate supplementation, herbage allowance, and milk yield at turn-out on the performance of dairy cows in mid-lactation at grazing. *Anim. Sci.* 73:171-181.
- Kolver, E.S., y L.D. Muller. 1998. Performance and nutrient intake of high producing Holstein cows consuming pasture or a total mixed ration. *J. Dairy Sci.* 81:1403-1411.
- Muller, L.D., y S.L. Fales. 1998. Supplementation of cool-season grass pastures for dairy cattle. Page 335 in *Grass for Dairy Cattle*. J. H. Cherney y D. J. R. Cherney, eds. CAB International, Oxon, UK.
- Petch, S.F., A.M. Bryant, y A.R. Napper. 1997. Effects of pasture intake and grain supplementation on milk nitrogen fractions. *Proc. N.Z. Soc. Anim. Prod.* 57:154-156.
- Peyraud, J.L., y L. Delaby. 2001. Ideal concentrate feeds for grazing dairy cows responses to supplementation in interaction with grazing management and grass quality. Page 203 in *Recent Advances in Animal Nutrition*. P. C. Garnsworthy and J. Wiseman, eds. Nottingham University Press, UK.
- Reis, R.B., y D.K. Combs. 2000. Effects of increasing levels of grain supplementation on rumen environment and lactation performance of dairy cows grazing grass-legume pasture. *J. Dairy Sci.* 83:2888-2898.
- Reis, R.B., F. San Emeterio, D.K. Combs, L.D. Satter, y H.N. Costa. 2001. Effects of corn particle size y source on performance of lactating cows fed direct-cut grass-legume forage. *J. Dairy Sci.* 84:429-441.
- Sayers, H. J. 1999. The effect of sward characteristics and level and type of supplement on grazing behaviour, herbage intake and performance of lactating dairy cows. Ph.D. Diss. Queen's Univ. Belfast. The Agricultural Research Institute of Northern Ireland, Hillsborough.
- Valladares, R.F.D., G.A. Broderick, S.C. Valadares Filho, y M.K. Clayton. 1999. Effect of replacing alfalfa silage with high moisture corn on ruminal protein synthesis estimated from excretion of total purine derivatives. *J. Dairy Sci.* 82:2686-2696.
- Van Vuuren, A.M. 1993. Digestion and nitrogen metabolism of grassfed dairy cows. Ph.D. Diss. Wageningen Univ., The Netherlands. ❖

Aproximaciones para el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en maíz a través de índices espectrales

H.M. Redel¹ y M.M. Zubillaga¹

Introducción

El rendimiento de los cultivos es el resultado de la interacción entre el genotipo, las propiedades del suelo, las condiciones climáticas de la campaña y el manejo agronómico (Diacono et al., 2012). La cuantificación de la variabilidad espacial de los atributos asociados a la producción agrícola es una herramienta de manejo para evaluar la conveniencia de la implementación de la agricultura de precisión (Diacono et al., 2011; Oliver et al., 2010). Los principios de esta tecnología se basan en la capacidad de reconocer niveles de variación o heterogeneidad de ambientes dentro del lote de producción y adecuar las recomendaciones agronómicas a cada unidad reconocida (Roberts, 2001). Esta variabilidad a escala de lote modifica la tecnología convencional de aplicación uniforme de insumos en el lote de producción (Zubillaga y Urricariet, 2007), pudiendo mejorar la rentabilidad y reducir el impacto ambiental (Ruffo et al., 2006).

La disponibilidad de nitrógeno (N) en la región pampeana es uno de los factores que con mayor frecuencia limita el rendimiento de maíz (Echeverría y Sainz Rozas, 2006; Álvarez, 2007). Cuando no hay funciones de producción que evalúen la respuesta a la fertilización nitrogenada, el método más frecuentemente utilizado para la determinación de la dosis de N es el método del balance de masas. Por un lado, la captura de la variabilidad espacial de los factores que intervienen en el balance permitiría la aplicación específica por sitio del nutriente y por el otro, es importante poder relacionar los distintos pools de N para observar posibles pérdidas de N del sistema o una falta del mismo (sobre y sub fertilización). Se debe tener en cuenta que, en la región pampeana, entre un 10 a 30% del N total aplicado está sujeto a pérdidas de lixiviación (Rimski-Korsakov et al., 2007).

Las herramientas que se utilizan para diagnosticar la deficiencia de N durante el ciclo de los cultivos son diversas. Cuando se utiliza a la planta como indicador, puede determinarse la deficiencia a través del índice de nutrición del N (INN). El INN se puede considerar un parámetro confiable para diagnosticar el estado nutricional del cultivo (Ziadi et al., 2008). Este parámetro tiene en cuenta la concentración de N en vegetal y la concentración crítica de N para un determinado nivel de biomasa. La concentración crítica de N es la concentración mínima de N a la cual el crecimiento es máximo (Plenet y Lemaire, 2000). Para la determinación del INN es necesario el muestreo del vegetal durante el ciclo del cultivo y el procesamiento adecuado de las muestras y su determinación de N en el laboratorio.

Dicha metodología presenta la desventaja del tiempo requerido para llevar a cabo el diagnóstico del estado nutricional del cultivo.

Existen otras herramientas que brindan la posibilidad de predecir el estado nutricional del cultivo utilizando la reflectancia del cultivo. Los índices espectrales (IE) se generan a partir de la información de sensores remotos, los cuales codifican la respuesta de los cultivos a la radiación electromagnética, generando gran cantidad de información con distribución espacial continua (Scottford y Miller, 2005). Las mediciones de las propiedades ópticas del canopeo (o follaje superior) de maíz como la reflectancia y la transmitancia pueden considerarse técnicas tan eficientes como el análisis vegetal (Schepers et al., 1996). La utilización de sensores remotos permite realizar determinaciones en cultivo de manera no destructiva y rápida, facilitando la repetitividad de las determinaciones. El IE más utilizado para caracterizar la vegetación es el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada, por sus siglas en inglés), índice asociado a la biomasa aérea, con ciertas limitantes relacionadas con la saturación a altos niveles de biomasa (Rouse et al., 1973). Cuando el índice de área foliar (IAF) es elevado, se recomienda utilizar el GNDVI (índice verde de vegetación normalizada, por sus siglas en inglés), el cual utiliza la reflectancia del cultivo en la longitud de onda del verde e infrarrojo cercano (Cristiano et al., 2010). El índice denominado REIP (punto de inflexión del borde rojo) fue sensible a las variaciones en los pigmentos fotosintéticos, materiales no fotosintéticos y también a la reflexión del suelo (Dawson y Curran, 1998). Otros índices de interés son: Viopt, índice de vegetación óptimo, desarrollado para predecir el estatus de N en trigo (Reyniers et al., 2006); y el OSAVI, índice de vegetación optimizado por el ajuste del suelo (Rondeaux et al., 1996), el cual tiene en cuenta no solo la reflectancia del cultivo sino también la del suelo, índice de importancia cuando la cobertura no es completa.

Los objetivos de este estudio fueron caracterizar el patrón de distribución espacial de variables del cultivo de maíz, y analizar cómo se comportan distintos IE en la diferenciación de ambientes y dosis y su relación con el INN.

Materiales y métodos

La experimentación fue conducida en la localidad de Vedía (Provincia de Buenos Aires, Argentina) ubicada en la sub-región Pampa Arenosa de la Región Pampeana, donde se identifican ambientes de marcada heterogeneidad a escala intra-lote. La variabilidad encontrada en los suelos se corresponde con el paisaje,

¹ Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA. Correo electrónico: hredel@agro.uba.ar

donde se encuentran Hapludoles énticos, franco gruesos, en las partes más elevadas y convexas de las planicies, y Hapludoles típicos, desarrollados entre las lomas (INTA, 1989).

En la campaña 2012/13 se seleccionó un lote con distintos ambientes productivos, encontrándose zonas de alta, media y baja productividad correspondientes a los bajos, medias lomas y lomas, respectivamente. Se planteó un muestreo sistemático en grilla (o retícula) geo-referenciado en un cultivo de maíz. El ensayo contó con franjas testigo (0N, lugar donde se montó la grilla) y franjas fertilizadas con dosis creciente de N (75 y 150 kg N ha⁻¹). La distancia entre los puntos de muestreo en la grilla fue de 30 m distribuidos en 15 filas x 5 columnas. Además en tres de las columnas se planearon 3 sub-muestréos intensivos cada 10 m, totalizando 111 puntos de muestreo en una superficie total de experimentación de 10 ha (**Figura 1**).

En madurez fisiológica se muestreó en cada punto una superficie de 0.63 m² de biomasa total de maíz, determinándose la biomasa aérea total acumulada y la partición a grano (rendimiento en grano) y rastrojo, previo acondicionamiento de la muestra. Asimismo, se determinó el contenido de N acumulado en rastrojo y en grano (Nelson y Sommers, 1973).

El análisis de estadística clásica se analizó con el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2013). Para estudiar la heterogeneidad espacial de las variables se emplearon técnicas geo-estadísticas (GS+Demo-versión 9.0 de Gamma Design Software, 2013). El análisis consistió en calcular la semi-varianza isotrópica (independiente de

la dirección) según la **Ecuación 1**:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{Ec. 1.}$$

donde $\gamma(h)$ es la semi-varianza para "N" pares de datos separados por una distancia de h , y Z es el valor en las posiciones x_i y $(x_i + h)$ para las variables propuestas a las distintas escalas espaciales posibles de observación ($h < 450$ m), siendo $z(x_i)$ el valor de una variable en una localización (x_i) y $z(x_i + h)$ el valor de la misma variable en un punto distante (h) del anterior. El ajuste de los modelos se evaluó mediante el coeficiente de regresión (R^2) y la relación entre la variancia nugget (Co) y la variancia total ($Co+C$). A partir de los modelos ajustados, se estimaron los valores de las variables para la totalidad de la parcela a través de interpolación por técnicas de kriging.

Para estudiar el comportamiento del INN y los índices espectrales en la diferenciación de ambientes y dosis de N, se realizó un ensayo de fertilización en cada ambiente productivo. La delimitación de los ambientes se realizó mediante el cálculo de cota relativa (CR) de cada sitio, separando las cotas en tres tercios ($CR = ((\text{Cota actual} - \text{cota mínima}) / (\text{cota máxima} - \text{cota mínima}) * 100)$). Se utilizó un diseño experimental en parcelas divididas, donde el factor principal fue el ambiente productivo (determinado por la cota) y las sub-parcelas las dosis de N (0, 75 y 150 kg de N ha⁻¹). Se realizaron tres repeticiones para cada tratamiento, con un total de 27 unidades experimentales. La fuente nitrogenada fue UAN aplicado entre líneas al estadio V4. El muestreo de material vegetal y radiométrico se llevó a cabo para dos estadios del cultivo: V8 y R1. Para el muestreo vegetal se tomaron las plantas comprendidas en una superficie de 0.63 m² centrada en cada punto geo-referenciado. Estas fueron secadas a 60 °C hasta peso constante para determinar biomasa aérea. Las muestras fueron molidas y se determinó la concentración de N en el vegetal (Nelson y Sommers, 1973). Los INN se obtuvieron a través del cociente entre la concentración de N del tejido de la planta entera y la concentración crítica de N (%) calculada a través del algoritmo (**Ecuación 2**):

$$\% N \text{ crítico} = 3.4 (MS)^{-0.37} \quad \text{Ec. 2.}$$

donde % N crítico es la concentración mínima de N a la cual el crecimiento es máximo y MS es la biomasa aérea total acumulada expresada en masa seca. Los valores de INN varían de valores menores a 1 (indicando que el N es limitante para el crecimiento), valores cercanos a 1 (el N no es limitante para el crecimiento) y mayores a 1 (el N se encuentra en exceso) (Plenet y Lemaire, 2000).

El muestreo radiométrico se llevó a cabo con un radiómetro multispectral portátil (Crop-Scan MSR16, Rochester, EE.UU.) en longitudes de onda de 450, 500, 550, 610, 660, 680, 710, 730, 760, 780, 810, 870, 950, 1080, 1220 y 1600 nm. El radiómetro se dispuso sobre el tope del canopeo a 1.1 m de altura, integrando una superficie de 0.52 m². Con la reflectancia en las distintas

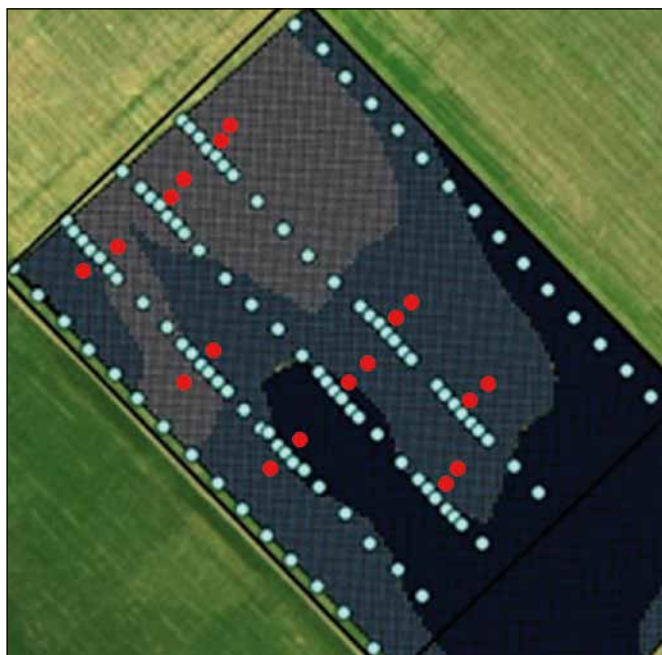


Figura 1. Ambientes del lote seleccionado para el ensayo (zonas oscuras, medias y claras representan la loma, media loma y el bajo, respectivamente). Los puntos de muestreo geo-referenciados se marcan con los círculos celestes. Los puntos rojos representan las unidades experimentales del ensayo de nutrición, mas el punto celeste contiguo (27 unidades en total).

longitudes de onda se calcularon índices espectrales NDVI, GNDVI, OSAVI, Vlopt, REIP, según las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7, respectivamente.

$$NDVI = [(R810_{nm} - R670_{nm}) / (R810_{nm} + R670_{nm})] \quad Ec. 3.$$

$$GNDVI = [(R810_{nm} - R550_{nm}) / (R810_{nm} + R550_{nm})] \quad Ec. 4.$$

$$OSAVI = [(R800_{nm} - R670_{nm}) / (R800_{nm} + R670_{nm} + 0.16)] \quad Ec. 5.$$

$$Vlopt = 1 + 0.45 * [(R800_{nm}^2 + 1) / (R670_{nm} + 0.45)] \quad Ec. 6.$$

$$REIP = 700 + \{40 * [(R670_{nm} + R780_{nm}) / 2] - R700_{nm}\} / (R740_{nm} - R700_{nm}) \quad Ec. 7.$$

donde R# es la reflectancia observada a distintas longitudes de onda (nm).

Adicionalmente, se calcularon los balances hídricos para ambos tipos de suelos por el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). El balance hídrico calculado consiste en la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (Hargreaves y Samani, 1985) y el agua disponible en el perfil (agua almacenada y precipitación).

Los resultados se analizaron utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2013) a través del ANOVA para el diseño en parcelas divididas con arreglo en bloques completamente aleatorizado, y la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) para comparación de medias.

Resultados y discusión

Biomasa aérea del cultivo de maíz

La cantidad de biomasa total acumulada en promedio a madurez fisiológica del maíz fue de 21 281 kg MS ha⁻¹ con una partición a grano del 52%. La variabilidad de la biomasa de rastrojo y grano dada por el coeficiente de variación resultó media, siendo la misma baja, media o alta según los rangos 0-15%, 15-75% y >75%, respectivamente según Dahiya et al. (1984) (Tabla 1).

Los parámetros del semi-variograma que caracterizan a la variabilidad no explicada (varianza nugget), la variabilidad total (Co + C) y el rango de dependencia espacial se

Tabla 1. Estadística descriptiva de la biomasa aérea acumulada en rastrojo y grano a madurez fisiológica a escala intralote (n=111).

Biomasa aérea kg MS ha ⁻¹	Media	C.V.	Mínimo	Máximo
Rastrojo	10 136	16	6048	13 714
Grano	11 144	23	4627	18 333

Tabla 2. Parámetros de los semivariogramas de biomasa aérea total y su partición.

Biomasa aérea kg MS ha ⁻¹	Variancia Nugget Co	Variancia total Co+C	Rango m	R ²	Proporción Co/(Co+C)
Rastrojo	9.7 x 10 ⁵	4.134 x 10 ⁶	546	0.881	0.23
Grano	2.54 x 10 ⁶	7.532 x 10 ⁶	403	0.885	0.33
Total	6.1 x 10 ⁶	25.87 x 10 ⁶	885	0.888	0.24

muestran en la **Tabla 2**. Al evaluar el grado de dependencia espacial se utilizó el criterio propuesto por Cambardella et al. (1994), el cual supone que esta es fuerte cuando la relación Co:(Co+C) es ≤0.25, moderada para valores entre 0.25 y 0.75 y débil para valores >0.75. La estructura espacial de la biomasa total y el rastrojo presentó una fuerte dependencia espacial. Sin embargo, para el rendimiento en grano la estructura espacial fue moderada. Es frecuente en el país el uso de los monitores de rendimiento, los cuales permiten observar la variabilidad espacial del rendimiento. Sin embargo, no es frecuente cuantificar la variabilidad de la biomasa de rastrojo, el cual es importante para estimar los aportes de C en el balance de materia orgánica de los agro-ecosistemas.

Los mapas continuos de la productividad del cultivo de maíz se observan en la **Figura 2**. Ensayos en la región han encontrado que el rendimiento del cultivo de maíz presentó variabilidad espacial relacionada con la capacidad de agua disponible (Urricariet et al., 2011) y el drenaje (Timlin et al., 1998).

Nitrógeno total acumulado

El N acumulado por el vegetal en el lote fue en promedio de 160 kg N ha⁻¹, siendo el mínimo y máximo de 107 y 265 kg N ha⁻¹, respectivamente. La partición de N hacia los granos fue, en promedio, 75% (**Tabla 3**). Las zonas de menor acumulación de N pudieron deberse a un menor potencial de rendimiento relacionado a menor agua disponible en el suelo por sus características texturales más arenosas y menor contenido de materia orgánica. Muchas veces estos sectores son fertilizados suponiendo que su potencial de rendimiento es mayor, por lo que las aplicaciones de N serían superiores a lo requerido por el cultivo pudiendo causar ineficiencias en el uso del N aplicado, con posibles pérdidas de N del sistema (Muschiatti Piana et al, 2012).

El N acumulado total y su partición a grano y rastrojo presentaron moderada estructura espacial (**Tabla 4**). En esta evaluación, la acumulación del N por el vegetal es íntegramente provista por el suelo, como N al momento inicial del cultivo y N aportado por la mineralización. La fracción provista por el suelo es de importancia ya que se ha observado a cosecha que el N proveniente del suelo presentó entre un 56 y 74% del total absorbido por la planta en experimentos con fertilización (Rimski-Korsakov et al., 2008). Adicionalmente se ha encontrado estructura espacial del N mineralizado, el cual se relacionó espacialmente con variables de suelo (Zubillaga et al., 2006).

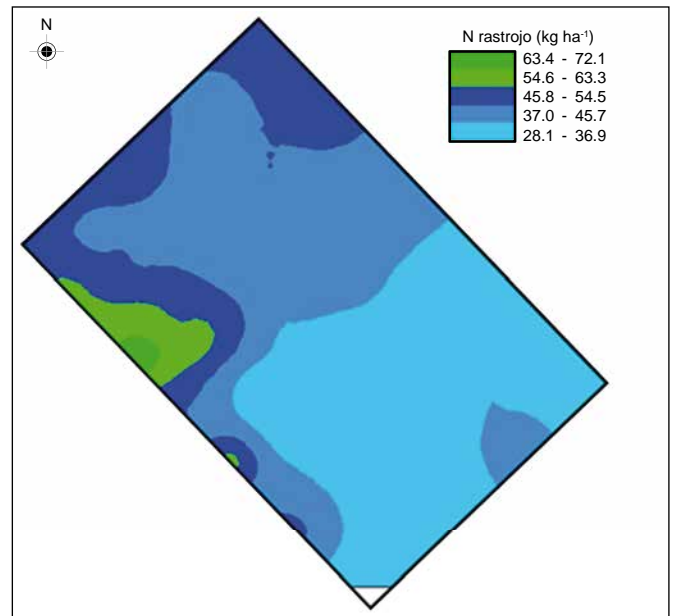
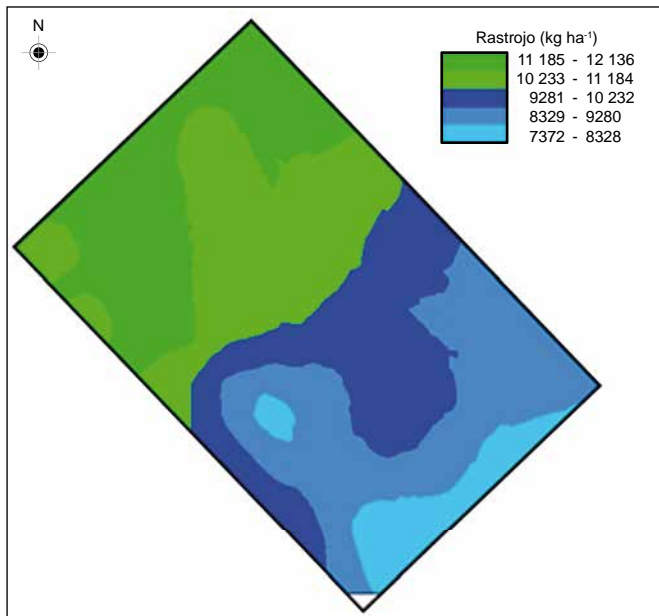
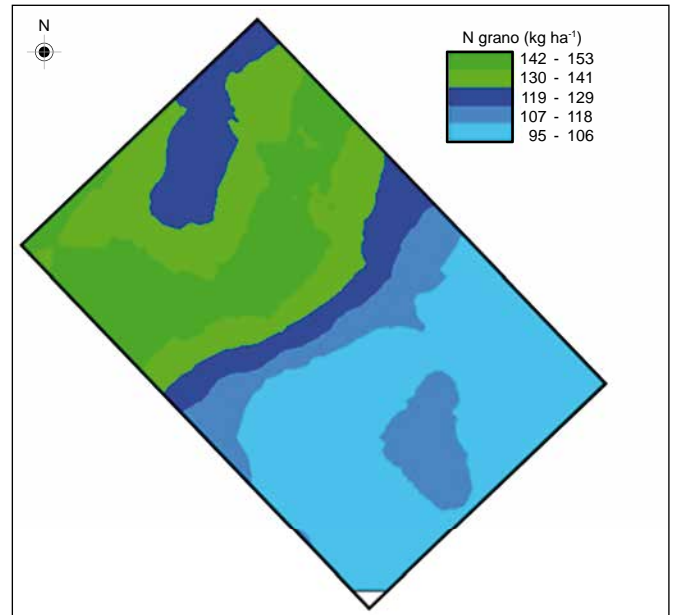
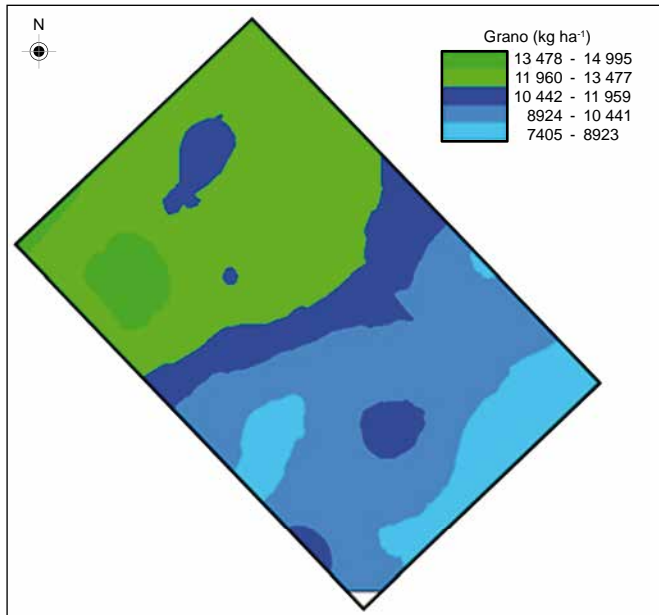
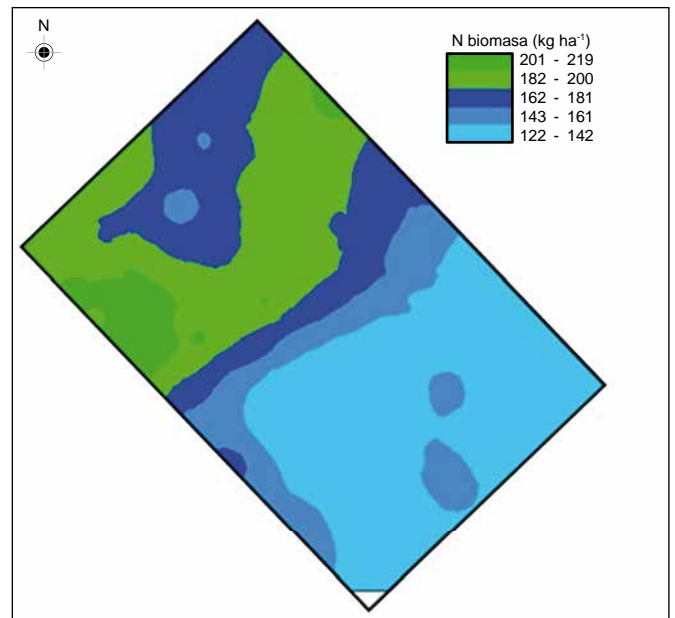
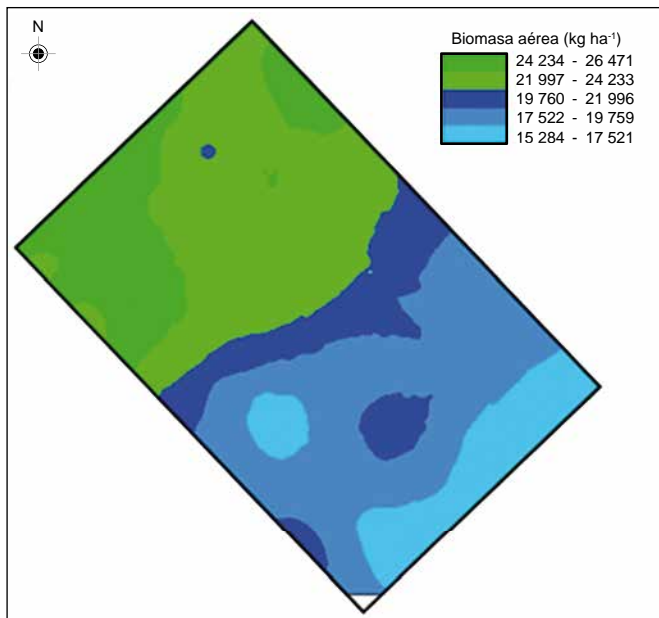


Figura 2. Distribución espacial de la biomasa aérea total acumulada de maíz a madurez, y su partición a grano y rastrojo (kg MS ha⁻¹).

Figura 3. Distribución espacial del N acumulado en biomasa por el cultivo de maíz a madurez, y su partición a grano y rastrojo (kg ha⁻¹).

Los mapas continuos de las variables N acumulado en biomasa y su partición a grano y rastrojo se presentan en la **Figura 3**.

Efecto del ambiente productivo y la dosis de N sobre INN

No se encontró interacción significativa ambiente*dosis por lo que se pudo analizar por separado el efecto de cada uno de ellos sobre el INN. El INN en el estadio V8 presentó diferencias significativas según dosis de N ($p=0.004$), siendo el INN más cercano a la unidad cuanto mayor ha sido la dosis de N. En el estadio R1, el INN no presentó diferencias según la dosis de N, pero discriminó los ambientes productivos ($p=0.0292$). El INN fue mayor solo en el ambiente más productivo (**Tabla 5**).

Tabla 3. Estadística descriptiva del N acumulado por el cultivo de maíz (kg ha⁻¹).

N acumulado kg N ha ⁻¹	Media	CV	Mínimo	Máximo
Rastrojo	40	33	24	102
Grano	120	23	76	198

La falta de diferencia en INN entre los ambientes productivos para el estadio V8 se pudo deber a que no ocurrieron deficiencias hídricas hasta dicho momento. Durante el periodo de barbecho, el perfil se recargó adecuadamente en ambos suelos. La diferencia entre ambientes se comienza a observar a partir de 67 días desde la siembra, donde el balance hídrico estimado muestra que el cultivo presentó restricciones hídricas. El cultivo que se desarrolló sobre los suelos con mayor capacidad de agua disponible (Hapludol típico, media loma y bajo) presentó menos días de estrés hídrico que el cultivo desarrollado en la zonas de menor productividad (Hapludol éntico, loma) (**Figura 4**).

A diferencia de lo observado en el presente trabajo, para la campaña agrícola 2010/11 se encontraron diferencias entre ambientes en INN en V8 (Mosso y Zubillaga, 2012). En dicha campaña, los registros pluviométricos fueron menores (diferencia de 240 mm) y con distinta distribución (en los meses de noviembre y diciembre, la diferencia en la precipitación fue de 260 mm entre campañas) lo que favoreció la expresión de diferencias en INN.

Tabla 4. Parámetros del semivariograma para el N acumulado por el vegetal y su partición.

Variable kg N ha ⁻¹	Variación Nugget Co	Variación total Co+C	Rango m	R ²	Proporción Co/(Co+C)
Rastrojo	58	192	184	0.841	0.31
Grano	375	1213	919	0.874	0.31
N acumulado	486	1871	505	0.905	0.26

Tabla 5. Comparaciones múltiples del factor Dosis y Ambiente (cota) para el parámetro INN. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias de cada factor según la prueba DMS ($p\leq 0.05$).

Estadios del cultivo	Dosis de N kg N ha ⁻¹	Media	Ambiente productivo	Media
V8	0	0.48 c	Cota baja	0.70 a
	75	0.61 b	Cota media	0.58 a
	150	0.81 a	Cota alta	0.63 a
R1	0	0.54 a	Cota baja	0.67 a
	75	0.56 a	Cota media	0.53 b
	150	0.63 a	Cota alta	0.53 b

Tabla 6. Comparaciones múltiples del factor dosis para los distintos IE. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p\leq 0.05$).

Estadios del cultivo	Dosis kg N ha ⁻¹	NDVI	GNDVI	OSAVI	REIP	Vlopt
V8	0	0.44 a	0.59 c	0.79 b	731.5 b	8.3 c
	75	0.52 b	0.67 b	0.89 a	738.0 a	11.9 b
	150	0.59 c	0.70 a	0.92 a	741.7 a	13.5 a
R1	0	0.58 b	0.71 b	0.94 b	741.5 b	16.3 b
	75	0.64 a	0.76 a	1.01 a	744.4 ab	15.4 b
	150	0.66 a	0.77 a	1.01 a	749.8 a	21.0 a

Tabla 7. Comparaciones múltiples del factor Ambiente para los distintos IE en R1 de maíz. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Ambiente	INN	INVI	GNDVI	OSAVI	REIP
Cota Baja	0.67 a	0.59 b	0.72 b	0.96 b	740.57 b
Cota media	0.53 b	0.62 b	0.74 b	0.98 b	744.56 ab
Cota alta	0.53 b	0.68 a	0.78 a	1.01 a	750.66 a

Tabla 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre INN e índices espectrales (correlación significativa $p \leq 0.10^*$ y $p \leq 0.05^{}$).**

Índice	Momento	
	V8	R1
NDVI	0.70 **	0.50 **
GNDVI	0.70 **	0.48 **
OSAVI	0.69 **	0.40 *
REIP	0.67 **	0.62 **
Vlopt	0.68 **	0.22

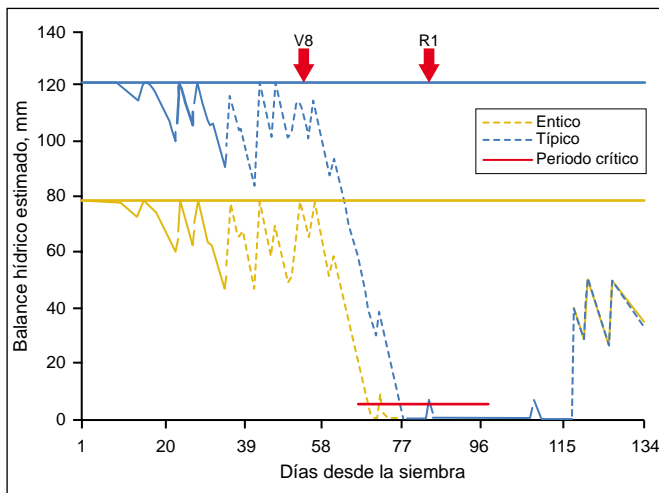


Figura 4. Periodo crítico para la determinación del rendimiento, balance hídrico estimado (línea punteada) y capacidad de agua disponible (línea llena) en función de días desde la siembra para los distintos tipos de suelo en estudio.

Efecto del ambiente productivo y la dosis de N sobre índices espectrales

No se encontró interacción ambiente*dosis por lo que se pudo analizar por separado el efecto de cada uno de ellos sobre los distintos IE. Los IE discriminaron las distintas dosis de N para los dos estadios analizados (Tabla 6). Para el estadio V8, los índices NDVI, GNDVI y Viopt presentaron la mayor sensibilidad al diferenciar las tres dosis de N ($p < 0.001$, para todos los casos). Esto puede deberse a que estos índices, que relacionan la reflectancia del cultivo en las bandas del rojo (R670nm) e infrarrojo cercano (R810nm), se saturan en canopeos densos (Haboudane et al., 2004). Los índices OSAVI y

REIP discriminaron solo el tratamiento sin N del resto ($p < 0.0003$). En el estadio R1, todos los índices han discriminado al tratamiento sin fertilizar del resto ($p < 0.004$, para todos los casos).

El efecto del ambiente productivo solo fue significativo en el estadio R1 (Tabla 7). Los índices NDVI, GNDVI, OSAVI y REIP discriminaron el ambiente de alta productividad respecto al de media y baja ($p < 0.0093$, para todos los casos). Este comportamiento fue similar al del INN, donde a partir de esta etapa fenológica el cultivo experimentó déficit hídrico.

Relación entre INN e índices espectrales

La correlación entre INN e índices espectrales fue estadísticamente significativa en ambos momentos de toma de datos (Tabla 8). En el estadio V8, todos los índices registraron elevados coeficientes de correlación. En R1, los coeficientes resultaron menores en todos los casos y no se encontró correlación significativa entre INN y Vlopt. En este estadio, el índice que mejor se relacionó al estatus nitrogenado del cultivo resultó REIP.

Conclusión

Las variables estudiadas presentaron un patrón de distribución espacial definido. Por lo tanto, la tecnología de aplicación variable de insumos a nivel intra-lote podría generar un avance hacia un uso más eficiente del nitrógeno. Las mediciones espectrales y el INN permitieron diferenciar ambientes productivos y dosis de N. Por un lado, las dosis de N se diferenciaron en V8 para el INN y en ambos estadios para los índices espectrales. Por otro lado, los ambientes se diferenciaron en R1, momento en el cual el cultivo presentó estrés hídrico diferencial según ambiente.

La relación encontrada entre INN e índices espectrales permitiría utilizar a estos últimos como indicadores confiables del estatus nitrogenado de los cultivos. Este indicador presenta mayor sensibilidad en el estadio vegetativo, lo cual podría ser beneficioso para la detección y corrección de deficiencias nitrogenadas en etapas tempranas del ciclo del cultivo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por UBACyT20020100100757. Y al convenio de vinculación tecnología Expte CD 239966/12 FAUBA.

Bibliografía

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organisation, Land and Water. Rome, Italy.
- Álvarez, R. 2007. Fertilización en maíz. En Álvarez, R (ed). Fertilización de cultivos de grano y pasturas. Editorial Facultad de Agronomía. 131-156.
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, y B.H. Broker. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1240-1248.
- Cristiano, P.M., G. Posse, C.M. Di Bella, y F.R. Jaimes. 2010. Uncertainties in fPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture¹, *International Journal of Remote Sensing.* 31(15):4095-4109.
- Dahiya, I.S., J. Richter, y R.S. Malik. 1984. Soil spatial variability: A review. *Intern. J. Trop. Agric.* 2(1):1-102.
- Dawson, T.P., y P.J. Curran. 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position.
- 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.
- Diacono, M., A. Castrignanó, A. Troccoli, D. De Benedetto, B. Basso, y P. Rubino. 2012. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research* 131(2012):49-62.
- Diácono, M., A. Troccoli, G. Girone, y A. Castrignanó. 2011. Field-Scale Variability and Homogeneous Zone Delineation for Some Qualitative Parameters of Durum Wheat Semolina in Mediterranean Environment. *World Journal of Agricultural Sciences* 7(3):286-290.
- Echeverría, H.E., y H.R. Sainz Rozas. 2006. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. 255-282.
- GS+9.0. Gamma Design Software. 2013. GS+. Geostatistics for the environmental sciences. Plainwell, Michigan USA.
- Haboudane, D., J.R. Miller, E. Pattey, P.J. Zarco-Tejada, e I.B. Strachan. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90:337-352.
- Hargreaves, G.H., y Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2):96-99.
- INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. 527 p. Bs. As. Argentina.
- Mosso, J.E., y M.M. Zubillaga. 2012. Comparación entre índices espectrales para predecir INN en condiciones contrastantes de ambientes de manejo y dosis de N en maíz. CD R XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Muschietti Piana, M.P., P.A. Cipriotti, y S. Urricariet. 2012. Simulación de las pérdidas de nitratos por lixiviación en fertilizaciones nitrogenadas del cultivo de maíz. V Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida y VI Congreso de Ambiente y Calidad de Vida, Catamarca, Argentina. Presentación oral.
- Nelson, D.W., y L.E. Sommers. 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal* 65:109-112.
- Oliver, Y.M, M.J. Robertson, y M.T.F. Wong. 2010. Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Europ. J. Agronomy.* 32:40-50.
- Plenet, D., y G. Lemaire. 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops: determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216:65-82.
- Reyniers, M., D.J.J. Walvoort, y J. De Baardemaaker. 2006. A linear model to predict with a multi-spectral radiometer the amount of nitrogen in winter wheat. *International Journal of Remote Sensing.* 27:4159-4179.
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio y R.S. Lavado. 2007. Potential losses of nitrate by leaching in soils of the pampas Argentina. *Agricultural Water Management* 65:83-94.
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio, I. Pino, y R.S. Lavado. 2008. Destino del nitrógeno del fertilizante en un cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI Cono Sur.* 39:1-5.
- Roberts, R., B. English, y S. Mahajanashetti. 2001. Environmental and economic effects of spatial variability and weather. En: Blackmore, E y G Grenier (eds.). European conference on precision agriculture. pp. 545-550. Montpellier, Francia.
- Rondeaux, G., M. Steven, y F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment.* 55:95-107.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, y D.W. Deerin. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. N. SP-351. Ed Third ERTS Symposium. 1:309-317. Whashington. NASA.
- Ruffo, M.L., G.A. Bollero, D.S. Bullock, y D.G. Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agriculture* 7:327-342.
- Schepers, J.S., T.M. Blackmer, W. Wilhelm, y M. Resende. 1996. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *J. Plant Physiol.* 148:523-529.
- Scotford, I.M., y P.C.H. Miller. 2005. Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A Review. *Biosystems Engineering* 90:235-250.
- Timlin, D.J., Y. Pachepsky, V. Snyder, y R. Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 62:764-773.
- Urricariet, S., M. Niborski y C.M. Kvolek. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo.* 29(1):49-59.
- Ziadi, N., M. Brassard, G. Bélanger, A. Claessens, A.N. Cambouris, y M.C. Nolin. 2008. Chlorophyll Measurements and Nitrogen Nutrition Index for the Evaluation of Corn Nitrogen Status Agron. *J.* 100:1264-1273.
- Zubillaga, M.M., M. Carmona, A. Latorre, M. Falcon, y M.J. Barros. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel lote en Vedia Pcia de Buenos Aires. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta, CD R: ISBN-10:987-21419-5-9.
- Zubillaga, M.M., y S. Urricariet. 2007. Caracterización de la variabilidad en la fertilidad de los suelos según la tecnología de fertilización. pp. 119-133. En Prystupa P. (ed) Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. EFA. FAUBA. Buenos Aires, Argentina. ❖

Fertilización con fósforo por ambientes en trigo

F. Ross y L. Elgart¹

Introducción

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

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

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

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

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

Materiales y métodos

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

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

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

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

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

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

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

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

Resultados y discusión

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

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

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

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

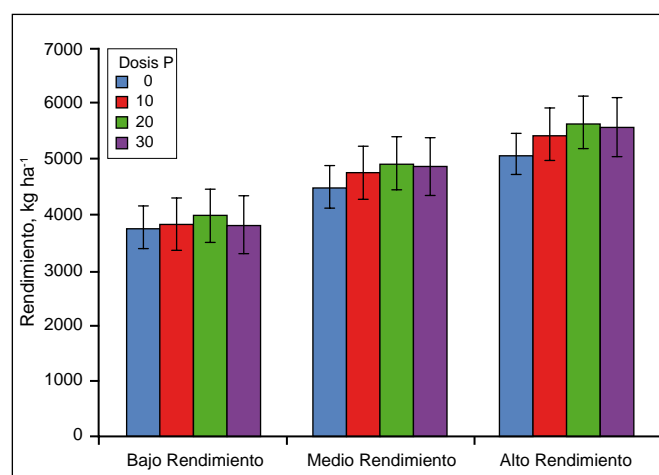


Figura 1. Rendimientos promedio de 5 experimentos del cultivo de trigo (kg ha⁻¹) en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio y Alto Rendimiento) para distintas dosis de P. La barra superior representa el error estándar. EEA INTA Barrow.

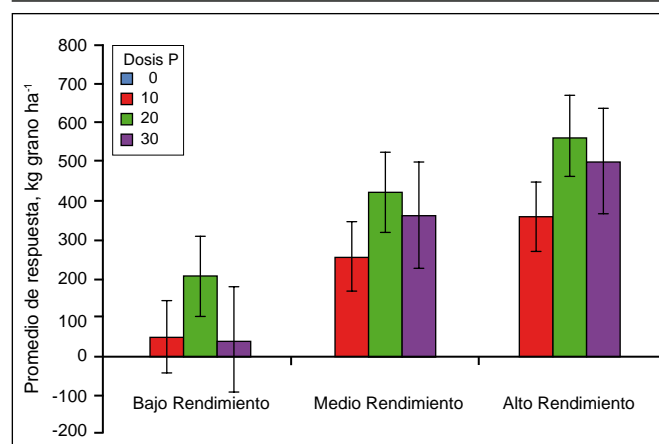


Figura 2. Respuesta, promedio de 5 experimentos, a la aplicación de fósforo (kg P ha⁻¹) en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio y Alto Rendimiento) para distintas dosis de P aplicada (0-10-20 o 30 kg P ha⁻¹). Las barras negras representan el error estándar. EEA INTA Barrow.

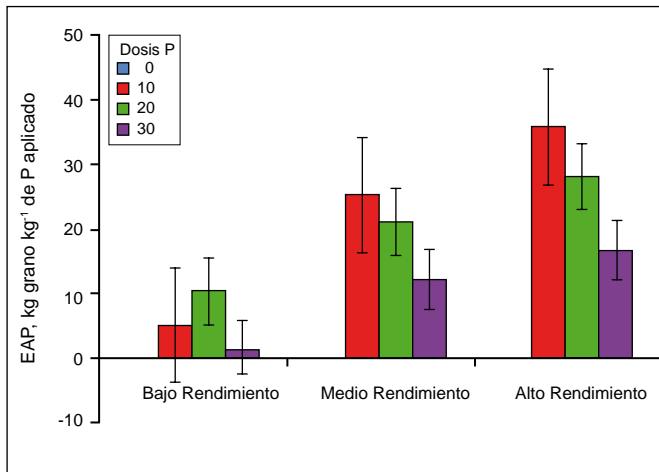


Figura 3. Eficiencia de uso del P del fertilizante (EAP, kg grano kg⁻¹ de P aplicado) en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio o Alto Rendimiento) para distintas dosis de P (0-10-20 o 30 kg P ha⁻¹). El rango superior representa el error estándar. Promedio de 5 experimentos. EEA INTA Barrow.

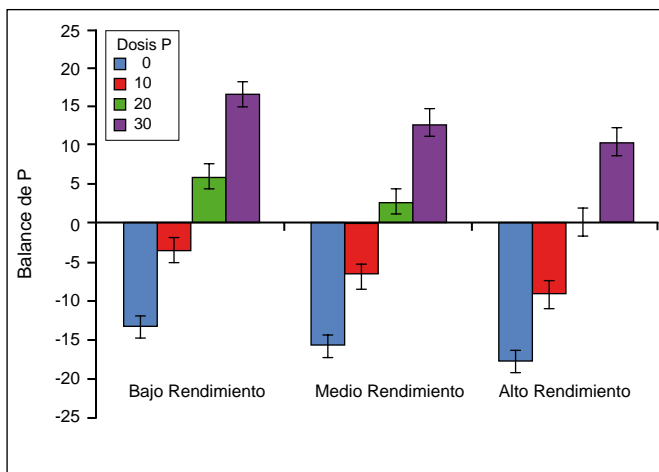


Figura 4. Balance de P en distintas zonas de productividad (Bajo, Medio y Alto Rendimiento) para distintas dosis de P (0-10-20 o 30 kg P ha⁻¹). Las barras verticales representan el error estándar. Promedio de 5 experimentos. EEA INTA Barrow.

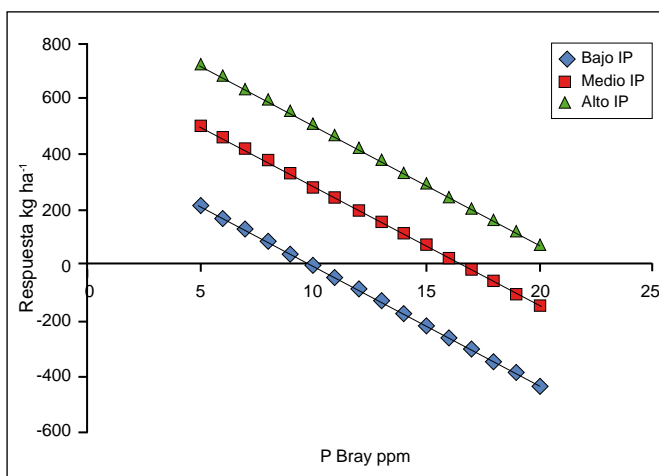


Figura 5. Respuesta esperable a la fertilización con 15 kg P ha⁻¹ en función del Índice de Productividad (Bajo IP: 3990 kg ha⁻¹, Medio IP: 4900 kg ha⁻¹ y Alto IP: 5650 kg ha⁻¹) y del nivel de P Bray (ppm).

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

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

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

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

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

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

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

Consideraciones finales

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

Agradecimientos

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

Bibliografía

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



Vista general de uno de los sitios de ensayo.

Cursos y Simposios

- 1. Taller Medición de Gases de Efecto Invernadero y I Conferencia de Gases de Efecto Invernadero en Sistemas Agropecuarios de Latinoamérica (GALA)**

Organiza : INIA Remehue
Lugar : INIA Remehue, Osorno, Chile
Fecha : Octubre, 1-3, 2014
Información : ejeda@inia.cl
<http://www.inia.cl/remehue>
- 2. VII Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental y el XII Encuentro de Química Analítica y Ambiental**

Organiza : Centro de Tecnologías Ambientales U. Técnica Federico Santa María
Lugar : Viña del Mar, Chile
Fecha : Octubre, 6-10, 2014
Información : www.congresofyq2014.usm.cl
- 3. XVI Congreso Mundial de Fertilizantes del CIEC**

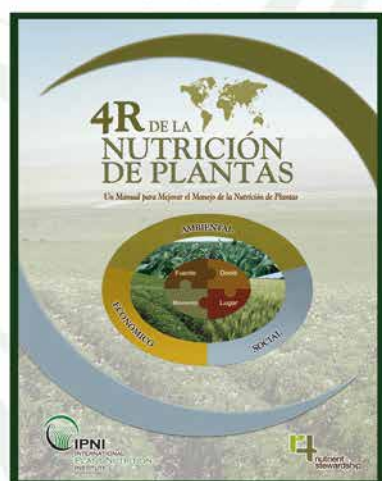
Organiza : EMBRAPA
Lugar : Río de Janeiro, RJ, Brasil
Fecha : Octubre, 20-24, 2014
Información : www.16wfc.com
- 4. Reunión Anual de la Asociación Americana de Agronomía (ASA)**

Organiza : ASA-CSSA-SSSA
Lugar : Long Beach, California, EE.UU.
Fecha : Noviembre, 2-5, 2014
Información : Inavis@sciencesocieties.org
www.acsmeetings.org/
- 5. II Simposio Internacional sobre Magnesio**

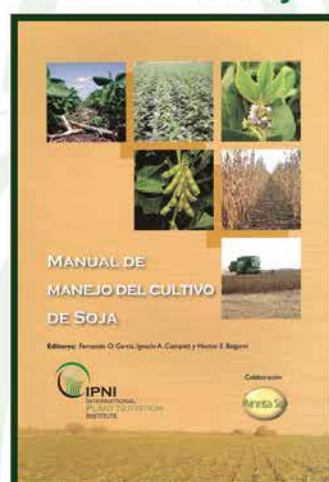
Organiza : Institute of Applied plant Nutrition
Lugar : Sao Paulo, Brasil
Fecha : Noviembre, 4-6, 2014
Información : www.iapn-goettingen.de
- 6. XX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo**

Organiza : IUSS
Lugar : Cuzco, Perú
Fecha : Noviembre, 9-15, 2014
Información : <http://xxcongresolatinoamericano desuelos.org>

Manual 4R



Manual de Soja



Simposio 2013



Oferta especial: \$ 400,00

Para conocer los gastos de envío de las publicaciones enviar un correo electrónico a: Lpisauri@ipni.net

Publicaciones Disponibles

Titulo de la Publicación	Costo (US\$)	Costo (\$ arg.)
Manual 4R de la Nutrición de Plantas. El Manual 4R brinda una idea general de la base científica que define a los cuatro requisitos de manejo de la fertilización: aplicar la fuente correcta de nutrientes, en la dosis, el momento y el lugar correctos, discutiendo la adopción de prácticas a campo y enfoques para la planificación del manejo de nutrientes.	30.00	250.00
Actas CD del Simposio Fertilidad 2013 "Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable". Trabajos orales y posters presentados en el Simposio organizado por el IPNI y Fertilizar AC en Rosario (Argentina) en Mayo del 2013.	12.50	100.00
Simposio Fertilidad 2011. La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de Producción. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2011.	10.00	80.00
Manual de Manejo del Cultivo de Soja. Aborda temáticas de fenología, manejo, nutrición y fertilidad, malezas, enfermedades y plagas del cultivo.	20.00	160.00
Simposio Fertilidad 2009. Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2009.	5.00	40.00
Simposio Fertilidad 2007. Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Mayo de 2007.	2.50	20.00
Como se Desarrolla una Planta de Soja. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	5.00	40.00
Como se Desarrolla una Planta de Maíz. Edición en español de la guía fenológica y de manejo publicada por Iowa State University.	5.00	40.00
Síntomas de Deficiencias Nutricionales de Trigo, Maíz y Soja. Set de tres posters que muestran y describen los síntomas de deficiencia de nutrientes en los tres cultivos.	5.00	40.00
Simposio Fertilidad 2005. Nutrición, Producción y Ambiente. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Abril de 2005.	2.50	20.00
Simposio Fertilidad 2004. Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sustentable. Actas del Simposio organizado por IPNI y Fertilizar en Rosario en Abril de 2004.	2.50	20.00
Simposio El Fósforo en la Agricultura Argentina. Actas del Simposio efectuado en Rosario en Mayo de 2003.	2.50	20.00
Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Publicación didáctica sobre el uso y el manejo de suelos y fertilizantes.	15.00	120.00
Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI Cono Sur en http://Lacs.ipni.net		

Consulte la forma de pago de las publicaciones y la versión completa de Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica en su versión digital en: <http://Lacs.ipni.net>

XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo

*“Educar para Preservar el Suelo y
Conservar la Vida en la Tierra”*

Cusco - Perú

9 al 15 de Noviembre del 2014



Sociedad Peruana de la Ciencia del Suelo

Más información en:

<http://xxcongresolatinoamericanodesuelosperu.org>



Forma de pago de las publicaciones

Argentina

- Giro postal o telegráfico a través de Correo Argentino - Los datos para realizar su envío son los siguientes:
Sra. Laura Nélica Pisauri - DNI: 17.278.707 • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina
Agencia de correos de destino: Sucursal Acassuso, Buenos Aires, Argentina
- Depósito bancario a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta. Cte.
Nº 3856/4 053/5
- Transferencia bancaria a INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, Banco Galicia, Sucursal Olivos, Cta.
Cte. Nº 3856/4 053/5, CBU 0070053520000003856451 CUIT 30-70175611-4

Otros países

- Envío de dinero a través de Western Union - Los datos para realizar su envío son los siguientes:
Sra. Laura Nélica Pisauri - DNI: 17.278.707 • Av. Santa Fe 910 (B1641ABO) Acassuso, Buenos Aires, Argentina
Agencia de correos de destino: Sucursal Acassuso, Buenos Aires, Argentina

Solicitamos nos haga saber por teléfono, fax o correo electrónico, la opción elegida y nos envíe los datos para acreditar su pago (Nº de giro y fecha, datos de depósito o transferencia bancaria).

*Para conocer los gastos de envío y cualquier otra consulta de publicaciones
por favor enviar un correo electrónico a Lpisauri@ipni.net*