

Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica

IAH 8 - Diciembre 2012

Respuesta a la fertilización y eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa	2
Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero	6
Densidad de plantas en maíz: Ajuste por ambiente	11
Fertilización aditiva en maíz	15
Influencia de la fertilización inorgánica sobre la actividad microbiana del suelo	18
La fertilización inorgánica y los hongos micorrízicos en el cultivo de maíz	22
El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica: Estado actual y principales cambios en el tiempo	27
Reporte de Investigación Reciente	34
Cursos y Simposios	36
Publicaciones Disponibles	37

En este número

- Fertilización y eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz
- Fertilización nitrogenada en sorgo granífero
- Densidad de plantas en maíz
- Fertilización aditiva en maíz
- Fertilización inorgánica y actividad microbiana
- Fertilización inorgánica y hongos micorrízicos
- Fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica



Editores :

Dr. Fernando O. García
Dr. Raúl Jaramillo
Dr. Armando Tasistro

International Plant Nutrition Institute (IPNI)

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>

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>

Respuesta a la fertilización y eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa*

Fernando Salvagiotti, Facundo Ferraguti y Amalia Manlla¹

Introducción

La fertilización nitrogenada en maíz es imprescindible para el logro de altos rendimientos y una alta eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) es deseable. En la región pampeana norte argentina, tradicionalmente, se siembra entre septiembre y octubre. Es decir, a la salida del invierno donde coinciden bajas temperaturas y un bajo nivel de precipitaciones, por lo que la oferta de nitrógeno (N) a la siembra es baja. En estas condiciones, Salvagiotti et al. (2011) observaron concentraciones de N-NO₃ de hasta 15 ppm en los 60 cm superficiales del suelo, determinando umbrales de N disponible a la siembra (Nds) entre 135 y 161 kg N ha⁻¹ según el potencial de producción del sitio. Dada la amplitud de la ventana agroclimática en la región, en los últimos años se ha difundido la siembra de maíz en fechas tardías, a partir de mediados de diciembre. La dinámica del N en el suelo en esta época es diferente con respecto de siembras tempranas, ya que las temperaturas son mayores y la disponibilidad hídrica es más alta, afectando la mineralización de la materia orgánica (MO). Por otra parte, los cultivos se siembran sobre diferentes cultivos antecesores (i.e. sobre rastrojo de trigo como cultivo de segunda, o sobre rastrojo de soja). Dada la diferente calidad de estos residuos, también se afectará la mineralización del N y la respuesta a la fertilización nitrogenada. Todos estos aspectos relacionados con la respuesta del cultivo a la fertilización con N en siembras tardías, no han sido explorados profundamente.

Muchas veces la fertilización nitrogenada se realiza haciendo aplicaciones al voleo de urea. Las pérdidas por volatilización de N como amonio a partir de urea, pueden llegar a ser importantes dependiendo de la temperatura y humedad imperante y de la cantidad de rastrojos. En siembras de diciembre, Salvagiotti y Vernizzi (2006) midieron pérdidas por volatilización de hasta 30 kg N ha⁻¹, cuando la urea fue aplicada al voleo, equivalentes a un 25% de pérdida del fertilizante aplicado. Una de las formas de disminuir las pérdidas por volatilización es a través del uso de aditivos que inhiban la actividad de la enzima ureasa como, por ejemplo, el aditivo nBTPT [triamida N-(n-butyl) tiofosfórica]. Este aditivo presenta potencial para ser utilizado cuando los cultivos de verano son fertilizados en condiciones extremas de temperatura sin ser incorporados al suelo.

Estudios previos realizados en el SE de Buenos Aires (Sainz Rozas et al., 1999; Barbieri et al., 2010) mostraron que el aditivo fue efectivo para reducir las pérdidas por volatilización desde urea aplicada en superficie, pero sin impacto en el rendimiento. Sin embargo, estos experimentos fueron realizados con temperaturas más bajas en contraposición a lo que se puede registrar en maíz de siembra tardía en la región pampeana norte, con temperaturas que superan en promedio los 25 °C. El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto del agregado de nBTPT en urea sobre la respuesta a la fertilización nitrogenada y la EUN en maíces de siembra tardía sobre diferentes antecesores en la región pampeana norte.

Materiales y métodos

Durante las campañas 2009-10 y 2010-11, se realizaron ensayos de fertilización nitrogenada en maíz sobre antecesores trigo y soja en la EEA INTA Oliveros. Los ensayos se implantaron en siembra directa, sobre un suelo Argiudol típico, serie Maciel, con más de 40 años de historia agrícola. En cada ensayo, los tratamientos surgieron de la combinación de 6 dosis (0, 60, 90, 120, 150 y 180 kg N ha⁻¹) y 2 fuentes (urea y urea + nBTPT) aplicadas al voleo luego de la siembra. El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Todas las parcelas fueron fertilizadas con 20 kg P ha⁻¹ y 20 kg S ha⁻¹. A la siembra se realizó un muestreo de suelo para determinar el contenido de N-NO₃ hasta los 60 cm, pH, P extractable y MO. En madurez fisiológica se determinó, sobre 1 m², la biomasa producida por el cultivo en estructuras vegetativas y grano. Las muestras fueron molidas y se determinó el contenido de N en tejido a través de una digestión Kjeldahl. A cosecha se determinó rendimiento y peso de los granos. Los datos fueron analizados a través del procedimiento PROC MIXED de SAS para detectar los efectos de dosis de N, nBTPT, antecesor, y sus interacciones, sobre las variables medidas. Se analizaron los diferentes componentes de la EUN en la dosis óptima económica (DOE, para relación de precios N:grano de 10:1): eficiencia agronómica (EAN, kg grano kg N aplicado⁻¹), eficiencia fisiológica (EFN, kg grano kg N absorbido⁻¹), eficiencia de absorción (EAbN, kg N absorbido kg N aplicado⁻¹) y la productividad parcial del factor (PPF, kg grano kg N aplicado⁻¹).

¹ EEA INTA Oliveros, Ruta 11 km 353, (2206) Oliveros, Santa Fe, Argentina. Correo electrónico: fsalvagiotti@correo.inta.gov.ar

* Trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina.

Resultados y discusión

El rendimiento promedio de los dos años de ensayo fue de 12 410 kg ha⁻¹, observándose una interacción de la respuesta del cultivo a la fertilización con N según el cultivo antecesor ($P < 0.06$) (Tabla 1). La interacción significativa sitio-año(sa)*Cultivo antecesor(Ant) estuvo explicada por los efectos significativos del antecesor en la campaña 2010-11 ($P < 0.05$) (Tabla 1). En promedio, la fertilización con N incrementó el rendimiento significativamente hasta un 31% con la dosis más alta de N, aunque dicha respuesta fue diferente de acuerdo al cultivo antecesor. La respuesta en rendimiento a la

dosis más alta de N fue de 2186 y 4159 kg ha⁻¹ para antecesor soja y trigo, respectivamente (Figura 1a). Esta diferencia de respuesta entre antecesores fue debida a la mayor disponibilidad de N cuando el antecesor fue soja, en promedio 146 kg N ha⁻¹, respecto de los 53 kg N ha⁻¹ disponibles a la siembra cuando el cultivo previo fue trigo. La relación entre el N absorbido en R6 (madurez fisiológica) y la disponibilidad de N a la siembra fue lineal (Figura 1b). Las pendientes de esta relación, que indican la eficiencia de absorción de N a lo largo de todos los niveles de N estudiados, fueron similares en los dos antecesores (ca. 40% de eficiencia de absorción). Sin embargo, las ordenadas al origen,

Tabla 1. Análisis de la varianza de rendimiento, N absorbido en parte aérea en R6, y contenido de N en grano en maíz de siembra tardía sobre dos cultivos antecesores (Ant= soja y trigo) fertilizado con diferentes dosis de N (Nf) utilizando dos fuentes de fertilizante nitrogenado (Urea y Urea + nBTPT) en dos sitio-año (SA).

Fuente de variación	Rendimiento	N absorbido en R6	Contenido de N en grano
	kg ha ⁻¹		
	Probabilidades Test F		
Sitio Año (sa)	0.19	0.87	0.04
Antecesor (Ant)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Fuente (F)	0.58	0.64	0.29
Dosis de N (Nf)	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Ant*Nf	<0.0001	0.84	0.44
F*Nf	0.43	1.00	0.92
sa*Nf	0.30	0.75	0.39
Ant*F	0.06	0.45	0.04
sa*Ant	<0.0001	<0.0001	<0.0001
sa*F	0.05	0.08	0.23
sa*Ant*F	0.21	0.93	0.36
sa*Ant*Nf	0.56	0.01	0.81
Ant*F*Nf	0.64	0.82	0.32
sa*F*Nr	0.78	0.90	0.98
sa*Ant*F*Nf	0.63	0.84	0.99

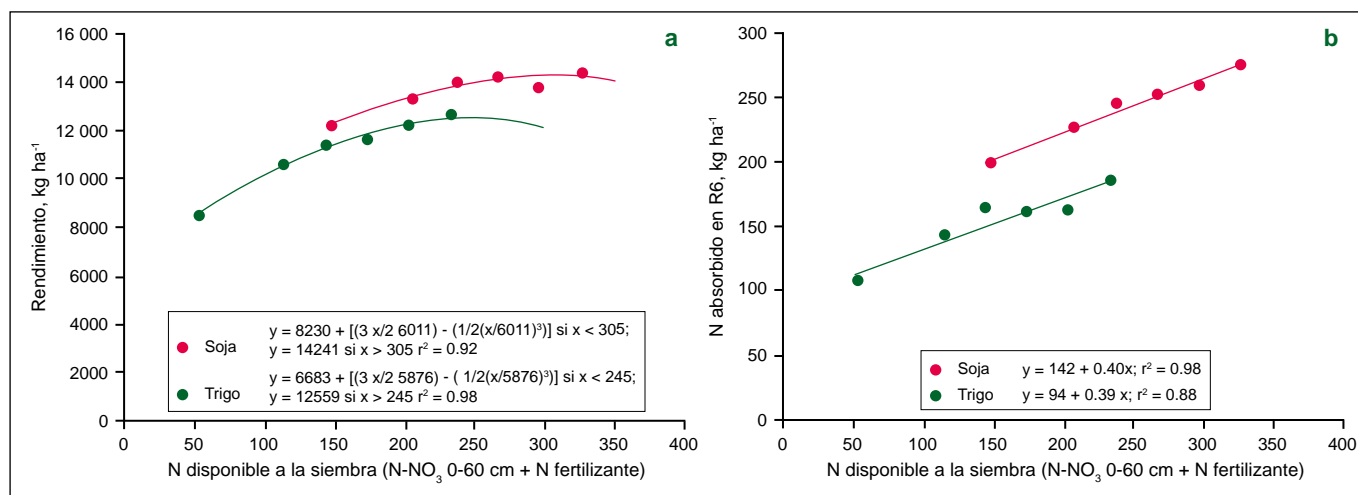


Figura 1. Rendimiento (a) y N absorbido en R6 (b) en respuesta a la fertilización nitrogenada en cultivo de maíz de siembra tardía según el cultivo antecesor. Los datos son promedio de dos años y dos fuentes de N.

que indicarían la disponibilidad de N que tuvo el cultivo en ausencia de fertilización, fue mayor luego de soja respecto de trigo (142 vs 94 kg N ha⁻¹) indicando el efecto del cultivo antecesor sobre la disponibilidad de N a lo largo del ciclo del cultivo (**Figura 1**). El contenido de N en grano fue en promedio de 125 kg N ha⁻¹, siguiendo la misma tendencia de respuesta a los tratamientos que la observada con el N absorbido en R6 (**Tabla 1**). El N en grano representó en promedio el 64% del N total absorbido.

La utilización del aditivo nBTPT mostro interacción con el cultivo antecesor para la variable rendimiento (P<0.06) (**Tabla 1**). La adición de este aditivo solo mostró incrementos significativos en el rendimiento de ca. 12% cuando el cultivo antecesor fue trigo. El efecto positivo de la adición de nBPT a la urea fue observada en la campaña 2009-10, no detectándose diferencias en 2010-11 (interacción sa * fuente (F)

significativa) (**Tabla 1**). Las diferencias observadas en el rendimiento no fueron detectadas al evaluar el N absorbido en R6 (**Figura 2**). Es importante remarcar que el periodo entre la aplicación de los fertilizantes y la ocurrencia de lluvias que incorporaron el mismo (mayores a 10 mm) fue de 10 días en los dos años. En 2009-10, la temperatura media fue 26.7 °C, con valores de 34.2 y 19.9 °C para las temperaturas medias máxima y mínima, respectivamente; mientras que en 2010-11 la temperatura media fue de 26 °C, con valores de 33.6 y 18.9 °C para las temperaturas medias máxima y mínima, respectivamente. Al cabo de estos periodos se registraron precipitaciones de 40 mm que incorporaron el fertilizante.

Dado que el N disponible fue inferior cuando el cultivo previo fue trigo, la DOE fue un 86% superior respecto de la observada cuando el cultivo antecesor fue soja (P<0.06) (**Tabla 2**). Cuando el cultivo antecesor fue trigo,

Tabla 2. Efecto del cultivo antecesor y la fuente de N sobre indicadores de la eficiencia del uso del N en la dosis óptima económica (DOE): Eficiencia agronómica del uso del N (EAN, kg grano kg N fertilizante⁻¹), Eficiencia fisiológica del uso del N (EFN, kg grano kg N absorbido⁻¹), Eficiencia de absorción de N (EAbsN, kg N absorbido kg N fertilizante⁻¹) y Productividad parcial de factor (PPF, kg grano kg N fertilizante⁻¹).

Cultivo Antecesor (Ant)	Fuente (F)	DOE *	N disponible en DOE	Rendimiento en DOE	EAN	EFN	EAbsN	PPF
Trigo	Urea+nBTPT	200	54	13 214	16.9	35.2	0.60	244
	Urea	193	47	13 360	16.8	36.4	0.54	297
Soja	Urea+nBTPT	143	90	11 223	27.3	71.6	0.52	124
	Urea	153	100	11 023	21.6	61.1	0.46	109
Fuente de variación			Probabilidades Test F					
Ant			0.06	0.41	0.02	0.19	0.68	0.005
F			0.93	0.99	0.17	0.82	0.74	0.45
Ant*F			0.60	0.94	0.19	0.77	0.98	0.22

* DOE estimada con una relación de precios N: grano = 10:1.

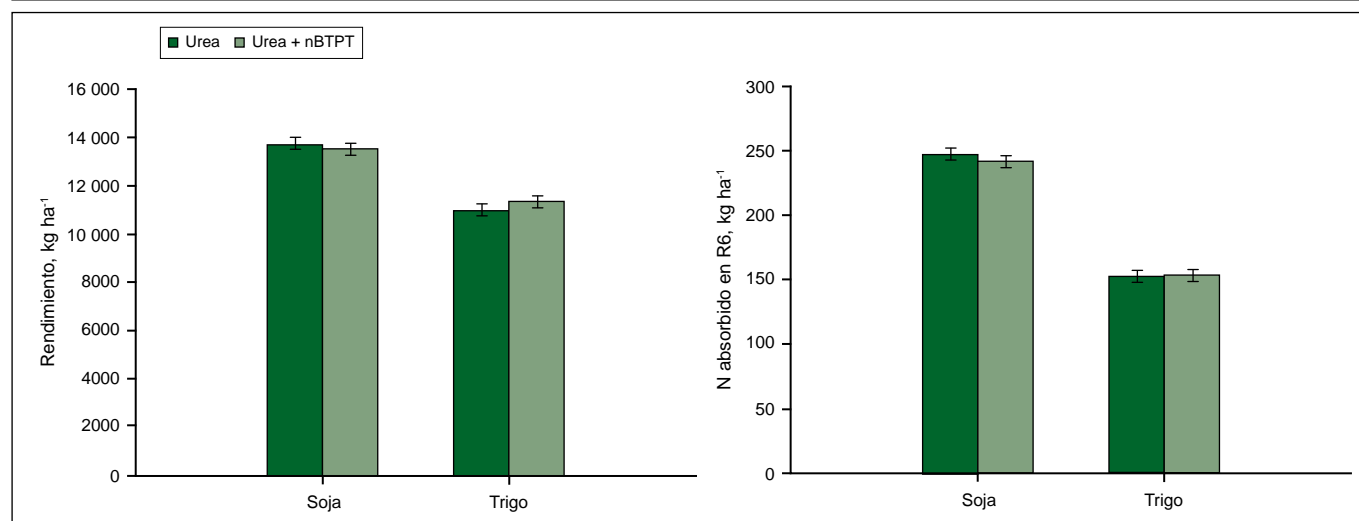


Figura 2. Rendimiento y N absorbido en R6 en función del cultivo antecesor y fuente de N utilizada. Los datos son promedio de dos años y seis niveles de N.

la EAN en la DOE fue un 45% superior respecto de la observada para soja (24.5 vs 16.9 kg de incremento en grano por kg de N aplicado como fertilizante). Por otra parte, la PPF fue 2.3 veces superior cuando el cultivo antecesor fue soja (**Tabla 2**). Este índice integra todas las fuentes de N del suelo en relación a la productividad del cultivo, por lo que el menor valor observado en trigo muestra la menor disponibilidad de N cuando el cultivo antecesor es trigo, ya sea por inmovilización inmediata del rastrojo, como así también por el mayor consumo de N que haría el trigo como cultivo predecesor. Wortmann et al. (2011) también habían observado mayores PPF cuando los cultivos antecesores eran soja o poroto, respecto de antecesor maíz. No se observaron efectos significativos de la aplicación del nBTPT en urea sobre los distintos componentes de la EUN evaluados a la DOE.

Conclusión

El potencial de producción de los maíces de siembra tardía en los experimentos realizados fue alto y mostró respuesta a la fertilización de diferente magnitud dependiendo del cultivo antecesor. El uso de nBTPT tuvo efecto cuando el cultivo antecesor fue trigo. Sin embargo, estas ventajas no se vieron reflejadas en algún componente de la EUN cuando se evaluó la DOE. Esto sugiere que los mayores efectos se notarían a mayores niveles de fertilización nitrogenada.

Agradecimientos

Estos ensayos fueron parcialmente financiados por el proyecto SANFE 610021 y Profértil S.A.

Bibliografía

- Barbieri, P.A., H.E. Echeverria, H. Sainz Rozas, y M. Maringolo. 2010. Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: Pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 28:57-66.
- Sainz Rozas, H., H.E. Echeverria, G.A. Studdert, y F. Andrade. 1999. No-till maize nitrogen uptake and yield: Effect of urease inhibitor and application time. *Agronomy Journal* 91:950-955.
- Salvagiotti, F., y A. Vernizzi. 2006. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su efecto en el rendimiento del cultivo de maíz. Para mejorar la producción - INTA Oliveros 32:96-102.
- Salvagiotti, F., J.M. Castellarin, F.J. Ferraguti, y H.M. Pedrol. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29 (2), en prensa.
- Wortmann, C., D.D. Tarkalson, C.A. Shapiro, A.R. Dobermann, R.B. Ferguson, G.W. Hergert, y D. Walters. 2011. Nitrogen Use Efficiency of Irrigated Corn for Three Cropping Systems in Nebraska. *Agron J* 103:76-84.*



Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización nitrogenada en sorgo granífero*

Manuel Ferrari^{1,2}, L.A. Rivoltella¹ y J.M. Casado¹

Introducción

El sorgo granífero (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) es un cultivo que en los últimos años ha comenzado a recobrar importancia en Argentina. En los sistemas de producción de distintas zonas del país se lo incluye por su rusticidad, adaptabilidad a suelos de inferior calidad, resistencia a la sequía y menor costo de implantación que el cultivo de maíz. Debido a la abundante producción de rastrojo de alta perdurabilidad y a su denso sistema radical, este cultivo realiza también un aporte importante a la sustentabilidad de los esquemas de agricultura continua a través de una mejora en el balance de carbono y de la estructuración de los suelos.

Un aspecto clave para lograr una buena rentabilidad y competitividad frente a otras opciones productivas es la adecuada nutrición nitrogenada del cultivo. El sorgo granífero posee un alto requerimiento de nitrógeno (N) (30 kg N t⁻¹ de grano producido; Ciampitti y García, 2007) y en numerosos trabajos realizados en diferentes regiones de la Argentina se han registrado respuestas positivas al agregado de este nutriente (De Battista et al., 2010; Fontanetto et al., 2010; Zamora et al., 2010). A pesar de ello, la información local sobre métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada que posibilite elaborar recomendaciones de fertilización con N sobre bases objetivas es aún escasa.

Fontanetto et al. (2008, 2010) evaluaron el nivel de N disponible a la siembra (suelo + fertilizante) hasta los 60 cm de profundidad en la zona central de Santa Fe, encontrando una buena asociación entre la oferta inicial de N y el nivel de rendimiento de grano alcanzado. Sin embargo, dicha herramienta no ha sido validada en otras zonas productivas. Por otro lado, no se conocen investigaciones en las cuales se hayan estudiado las posibilidades que otros elementos de diagnóstico, tanto de suelo (e.g., nitratos al estado de 6 hojas desarrolladas), como de planta (e.g., índice de verdor y reflectancia del canopeo determinados en distintos estados fenológicos), puedan ofrecer para predecir la respuesta del cultivo a la fertilización con N. Adicionalmente, tampoco se dispone de información sobre el momento más conveniente de aplicación del fertilizante nitrogenado (i.e., a la siembra y/o durante el

ciclo del cultivo), ni hasta qué estado fenológico podría demorarse el agregado de N para la corrección de las deficiencias.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar la utilidad de varios indicadores de suelo y planta como herramientas de diagnóstico de la condición de nutrición nitrogenada en el cultivo de sorgo granífero; y ii) estudiar el efecto de diferentes estrategias de aplicación del fertilizante nitrogenado sobre la productividad de grano de dicho cultivo.

Materiales y métodos

Durante la campaña 2009-10 se condujo un ensayo en el campo experimental de la EEA-INTA Pergamino (33° 56' S; 60° 34' W) sobre un suelo Argiudol típico, serie Pergamino, fase moderadamente erosionada (Capacidad de uso: IIe). El sitio tenía una historia de 15 años de agricultura continua, de los cuales los últimos 10 fueron manejados bajo un sistema de siembra directa. El cultivo antecesor fue soja.

Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones. Los tratamientos consistieron en 5 niveles de N aplicados como urea a la siembra en forma superficial (N₀=0, N₁=60, N₂=120, N₃=180 y N₄=240 kg N ha⁻¹) más un sexto tratamiento (N1R) en el cual la dosis de 120 kg N ha⁻¹ se aplicó en forma dividida (60 kg N ha⁻¹ a la siembra y 60 kg N ha⁻¹ con el cultivo en 10-11 hojas expandidas). El tamaño de las unidades experimentales



El manejo correcto del nitrógeno es un aspecto clave para mejorar la competitividad del cultivo de sorgo granífero.

¹ EEA-INTA Pergamino. Correo electrónico: mferrari@pergamino.inta.gov.ar

² UNNOBA.

* Trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina.

fue de 4725 m (9 surcos) x 12 m. A fines de asegurar la suficiencia de fósforo (P) y azufre (S), todas las parcelas fueron fertilizadas con 25 kg P ha (como superfosfato triple) localizados en banda a la siembra y con 15 kg S ha⁻¹ (como sulfato de calcio) aplicados en cobertura total a la emergencia del cultivo.

El sorgo se sembró en forma directa el 05/11/09 a una densidad de 16 semillas m⁻¹ en surcos distanciados a 0.525 m entre sí y utilizando el híbrido Máximo (Criadero El Sorgal).

Las malezas fueron controladas convenientemente mediante tratamientos con herbicidas realizados en el barbecho y en pre-emergencia del cultivo. No se registraron ataques de insectos de importancia durante el ciclo, por lo que no fue necesario efectuar controles químicos.

A la siembra y antes de la aplicación del fertilizante nitrogenado se tomaron muestras de suelo de los espesores 0-20, 20-40 y 40-60 cm para la determinación de N-NO₃⁻ (método del ácido fenoldisulfónico). En cada bloque se extrajo una muestra compuesta (15 submuestras) para cada profundidad. La dotación de N en el suelo (Ns; 0-60 cm) fue obtenida en base a las concentraciones de N-NO₃⁻ y la densidad aparente de cada espesor de suelo. La disponibilidad de N a la siembra (Nd) en cada uno de los 5 tratamientos básicos fue luego calculada como la suma de Ns y la dosis de N del fertilizante (Nf) aplicada (Nd = Ns + Nf [kg N ha⁻¹]).

Cuando el cultivo alcanzó el estado de 6 hojas desplegadas se realizó otro muestreo de suelos (0-30 cm de profundidad) para la determinación de N-NO₃⁻. En este caso se tomó una muestra compuesta (10 submuestras) en cada parcela ubicando los piques en el centro de los entresurcos.

En los estados de 6-7 y 9-10 hojas expandidas se determinó el índice de verdor (IV) con un clorofilómetro

Minolta SPAD-502 (Minolta Camera Co., Ltd., Japón). Las lecturas de clorofila fueron efectuadas en 15 plantas representativas por parcela, realizando las mediciones en la última hoja expandida y aproximadamente en la mitad del largo de la lámina.

En dos momentos durante el ciclo del cultivo (6-7 y 10-11 hojas desplegadas), en todas las parcelas se tomaron también mediciones de reflectancia (NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada) con un sensor manual GreenSeeker (NTech Industries, Inc., Ukiah, CA, USA), manteniendo una altura de lectura de 0.8-1.0 m por encima del canopeo.

Los rendimientos de grano (RG) fueron evaluados mediante cosecha manual de panojas el 19/04/10, tomando una muestra de 3.15 m² por parcela (en los mismos surcos en los que se habían efectuado las determinaciones de NDVI). Las panojas fueron luego desgranadas con una trilladora estacionaria y el rendimiento fue corregido a un contenido de humedad de 13.5%. El peso de 1000 granos (PMG) fue determinado en base al peso (corregido a 13.5% de humedad) de 4 muestras de 100 granos por parcela. La eficiencia agronómica de uso del N (EUN) fue calculada como el cociente entre la respuesta al N y la dosis de N utilizada:

$$EUN = \frac{[RG \text{ de la parcela fertilizada} - RG \text{ de la parcela testigo}]}{\text{Dosis de N}}$$

Los resultados de IV, RG, PMG y EUN fueron sometidos a análisis de varianza, y se compararon las medias de los tratamientos con el test de diferencias mínimas significativas (DMS; $\alpha=0.05$). Para el análisis conjunto de las respuestas a N obtenidas, los rendimientos medios de los tratamientos impuestos a la siembra fueron expresados como rendimiento relativo (RR), dividiendo su valor por el rendimiento medio alcanzado por el tratamiento N4. Los niveles críticos de las variables diagnóstico evaluadas fueron determinados mediante el

Tabla 1. Rendimiento de grano (RG), peso de mil granos (PMG) y eficiencia de uso del N (EUN) obtenidos en el ensayo.

Tratamiento	Dosis de N kg	RG* kg ha ⁻¹	PMG* g	EUN* kg grano kg N ⁻¹
N ₀	0	8612 c	26 954 a	-
N ₁	60	8974 bc	26 774 a	6.0 b
N ₁ R	120 (en 2 aplicaciones)	10 746 a	25 684 a	17.8 a
N ₂	120	9818 ab	26 669 a	10.1 ab
N ₃	180	9767 b	26 743 a	6.4 b
N ₄	240	9613 b	26 424 a	4.2 b
DMS ($\alpha=0.05$)		942.5	1392	8811
CV (%)		5.4	2.88	52.66

* Dentro de cada columna, letras distintas indican diferencias significativas (DMS; $p<0.05$).

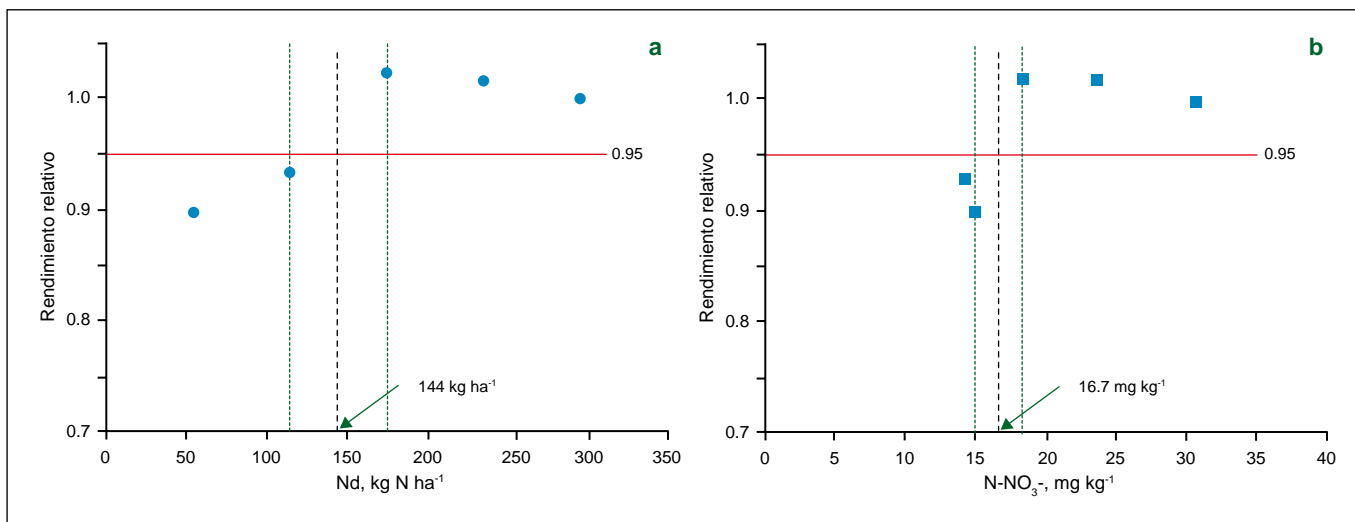


Figura 1. Relación entre los rendimientos relativos y (a) la disponibilidad de N a la siembra (Nd), y (b) la concentración de N-NO₃⁻ en el suelo (0-30 cm) con el cultivo en 6 hojas expandidas.

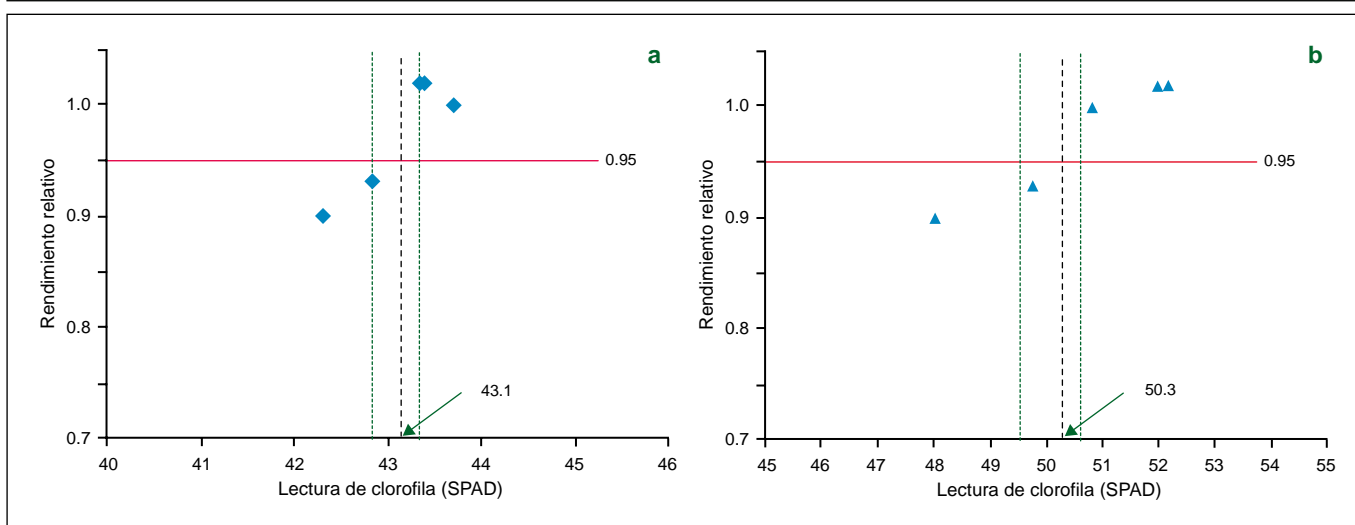


Figura 2. Relación entre los rendimientos relativos y el índice de verdor en (a) 6-7 hojas expandidas, y (b) 9-10 hojas expandidas.

método gráfico de Cate y Nelson (1965), fijándose un RR crítico de 0.95. La relación entre el rendimiento de grano y el NDVI fue analizada mediante regresión lineal simple.

Resultados y discusión

Los RG obtenidos fueron elevados, lo que fue favorecido por el abundante régimen de lluvias recibido (año “Niño”, característico de precipitaciones superiores a la normal en la región). Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo totalizaron 988 mm. Los tratamientos ensayados tuvieron efectos significativos sobre el rendimiento de grano ($p < 0.01$) y sobre la EUN ($p < 0.05$), pero no afectaron el PMG ($p > 0.05$) (Tabla 1).

La relación entre los RR y el Nd se presenta en la Figura 1a. El análisis gráfico de los resultados permitió predecir la respuesta al N en base a un rango crítico ubicado aproximadamente entre los 114 y los 174 kg N ha⁻¹, cuyo valor medio (144 kg N ha⁻¹) podría ser considerado tentativamente como el nivel crítico. Dicho umbral es similar al encontrado en la zona central de Santa Fe por Fontanetto et al. (2008, 2010), quienes reportaron que

una oferta inicial de N cercana a los 130 kg ha⁻¹ permitió alcanzar rendimientos de sorgo de 8-10 t grano ha⁻¹.

La concentración de N-NO₃⁻ en el suelo (0-30 cm) en el estado de 6 hojas también mostró una buena asociación con los RR (Figura 1b). En este caso fue igualmente posible identificar un rango crítico (entre 15.0 y 18.4 mg kg⁻¹), mediante el cual la respuesta al N pudo ser anticipada con una alta precisión. El valor medio de dicho intervalo (16.7 mg kg⁻¹) es algo inferior al nivel crítico encontrado por Ferrari et al. (2001) en el centro-norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (20 mg kg⁻¹; 0-30 cm), pero coincidente con el rango crítico obtenido por García et al. (1997) en el sudeste de Buenos Aires (15-18 mg kg⁻¹; 0-30 cm), en ambos casos para el cultivo de maíz.

En los dos estados fenológicos en los cuales se efectuaron las mediciones, los valores de IV permitieron definir rangos críticos con los que fue factible separar claramente los puntos con (RR < 0.95) y sin respuesta (RR > 0.95) al agregado de N (Figura 2). Los niveles

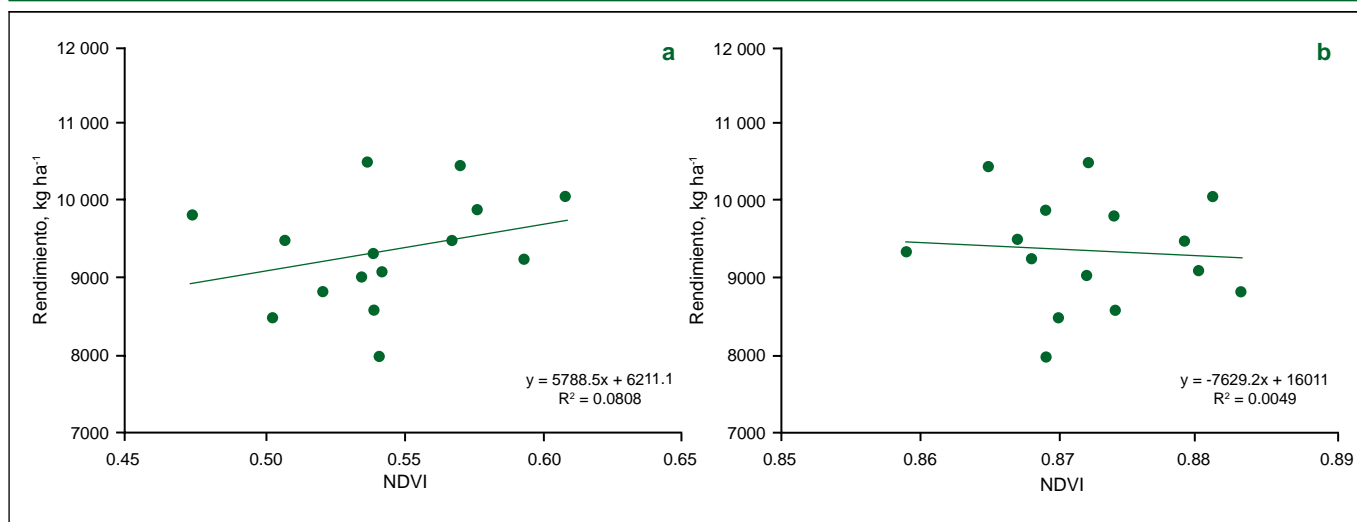


Figura 3. Relación entre los rendimientos de grano y el índice de vegetación de diferencia normalizada en (a) 6-7 hojas expandidas, (b) 10-11 hojas expandidas.

críticos tentativos (puntos medios de los rangos) se ubicarían cerca de las 43.1 y 50.3 unidades SPAD, para las lecturas tomadas en los estados de 6-7 y 9-10 hojas desplegadas, respectivamente.

El IV mostró una mayor habilidad para distinguir las dosis de N a medida que avanzó el ciclo del cultivo. Así, en el estado de 9-10 hojas se detectó un efecto significativo ($p < 0.05$) de los tratamientos sobre las lecturas de clorofila (datos no mostrados) y la diferencia máxima entre los valores medios de IV alcanzó las 4.2 unidades SPAD. En el estado de 6-7 hojas, en cambio, los tratamientos no afectaron las determinaciones ($p > 0.05$) y las lecturas medias exploraron un rango de sólo 1.4 unidades SPAD. Estos resultados indicarían la conveniencia de emplear esta herramienta de diagnóstico en un momento más avanzado del ciclo del cultivo, cuando el método presenta una mayor sensibilidad, si bien en el presente estudio el IV mostró la misma capacidad para predecir la respuesta a N en ambos estados (**Figura 2**). El incremento de la precisión del medidor de clorofila para detectar diferencias en la disponibilidad de N en estadios posteriores al de 6-7 hojas fue también reportado para maíz por Sainz Rozas y Echeverría (1998).

Un aspecto clave del método de diagnóstico y recomendación de fertilización nitrogenada basado en el empleo de sensores ópticos, es la ajustada predicción del rendimiento de grano a partir de las lecturas de reflectancia del canopeo tomadas durante el ciclo del cultivo (Raun et al., 2005). Utilizando este enfoque, se han desarrollado algoritmos para estimar la dosis de N a aplicar durante la estación de crecimiento en varios cultivos (disponibles en <http://www.soiltesting.okstate.edu/SBNRC/SBNRC.php>), pero aún no se dispone de dicho procedimiento de cálculo para sorgo granífero bajo las condiciones productivas de la Argentina.

En la **Figura 3** se presentan las relaciones encontradas

entre los valores de NDVI y de rendimiento de grano de todas las parcelas para los dos momentos durante el ciclo en que se tomaron las mediciones. En ambos casos, las asociaciones entre las variables fueron muy débiles. Estos resultados contrastan con los informados por Moges et al. (2007), quienes encontraron una relación lineal estrecha ($R^2 = 0.75$) entre el rendimiento en grano de sorgo y el NDVI determinado en el estado de crecimiento 3 (i.e., diferenciación del ápice, cultivo con 7 a 10 hojas desarrolladas; Vanderlip, 1993). El muy pobre ajuste obtenido en el estado de 10-11 hojas en este estudio podría deberse a que en ese momento el cultivo ya había cerrado totalmente los entresurcos. Bajo esa condición, las lecturas de reflectancia serían muy poco sensibles para detectar diferencias entre los tratamientos por efecto de la dosis de N, lo cual queda reflejado por el estrecho rango en el cual se concentraron todas las mediciones de NDVI (0.859-0.883; **Figura 3b**).

La comparación de los rendimientos obtenidos con los tratamientos N_1R y N_2 permite analizar cuál fue la estrategia de fertilización nitrogenada más conveniente bajo las condiciones en las cuales se realizó el ensayo (**Tabla 1**). El tratamiento N_1R presentó una marcada tendencia a superar al tratamiento N_2 tanto en rendimiento de grano como en EUN, aunque las diferencias no fueron significativas ($p > 0.05$). El mejor comportamiento insinuado por el tratamiento N_1R podría atribuirse a las abundantes precipitaciones registradas (524 mm) entre las aplicaciones de la urea a la siembra (12/11/09) y en 10-11 hojas (29/12/09). Si bien el suelo del sitio experimental (Argiudol típico) no presentaría un elevado potencial de lixiviación, la considerable magnitud de las lluvias ocurridas pudo haber ocasionado la pérdida en profundidad de nitratos derivados del fertilizante agregado en la implantación, impidiendo así que en el tratamiento N_2 el cultivo los pudiera absorber más adelante en el ciclo cuando la

demanda del nutriente comienza a incrementarse. De este modo, la estrategia representada por el tratamiento N_1R , de dividir la misma dosis de N en dos momentos de aplicación, habría resultado en una utilización más eficiente del nutriente, al diferir el aporte de la mitad del fertilizante a una etapa en la que el cultivo exhibe un alto requerimiento de N y, por lo tanto, una mayor tasa de absorción del mismo.

Por otro lado, las diferencias significativas en rendimiento ($p < 0.05$) y en EUN ($p < 0.05$) que se detectaron entre los tratamientos N_1 y N_1R indican que el cultivo de sorgo puede responder en forma apreciable al agregado de N aún en etapas tardías del ciclo como el de 10-11 hojas expandidas. Un requisito para el empleo de sistemas de manejo del N basados en sensores de reflectancia es que las deficiencias del nutriente puedan ser corregidas en estados avanzados dentro del periodo vegetativo del cultivo. En este sentido, los resultados mencionados pueden considerarse auspiciosos, aún cuando en este estudio no fue posible establecer una buena relación entre el NDVI y el rendimiento de grano.

Conclusiones

- La disponibilidad de N a la siembra, la concentración de $N-NO_3^-$ en el suelo con el cultivo en 6 hojas expandidas, y el índice de verdor determinado en los estados de 6-7 y 9-10 hojas desarrolladas permitieron predecir en forma precisa la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada.
- El rendimiento en grano no se asoció con las lecturas de NDVI en ninguno de los dos momentos del ciclo del cultivo evaluados.
- La estrategia de dividir la aplicación de una misma dosis de N entre la siembra y el estado de 10-11 hojas resultó beneficiosa en una campaña caracterizada por un abundante régimen de lluvias.
- El cultivo de sorgo respondió significativamente al agregado de N aún en estados avanzados del ciclo como el de 10-11 hojas desplegadas.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos del proyecto de INTA PNCER-022421.

Bibliografía

- Cate, R.B. Jr., y L.A. Nelson. 1965. A rapid method for correlation of soil tests analyses with plant response data. North Carolina Agric. Exp. Stn., Int. Soil Testing Series Tech. Bull. No. 1.
- Ciampitti, I.A. y F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, oleaginosos e industriales. Archivo Agronómico No. 11. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 33:13-16.

De Battista, J.J., A.C. Alaluf, N.M. Arias, y M. Castellá. 2010. Efecto del nitrógeno sobre el crecimiento y rendimiento de sorgo granífero *Sorghum bicolor* (L.) Moench. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 408-410. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina.

Ferrari, M.C, J.J. Ostojic, L.A. Ventimiglia, H.G. Carta, G.N. Ferraris, S.N. Rillo, M.L. R. de Galetto, y F.M. Rimatori. 2001. Assessing soil and plant nitrogen tests for corn in the Humid Pampas (Argentina). En: Annual Meetings Abstracts, Charlotte, North Carolina, USA, October 2001. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. (en CD).

Fontanetto, H., O. Keller, J. Albrecht, D. Giailevra,, C. Negro, y L. Belotti. 2008. Aspectos de manejo y fertilización nitrogenada para el sorgo granífero. Agromercado, Cuadernillo Clásico de Sorgo, No. 148, pp. 6-10.

Fontanetto, H., O. Keller, L. Belotti, C. Negro, y D. Giailevra. 2010. Efecto de diferentes combinaciones de nitrógeno y azufre sobre el cultivo de sorgo granífero (campaña 2008/09). Informaciones Agronómicas del Cono Sur 46:21-23.

García, F.O., K.P. Fabrizio, M. Ruffo, y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. En: Actas VI Congreso Nacional de Maíz, Tomo II, pp. 137-143. Pergamino, Buenos Aires, noviembre de 1997. AIANBA, Pergamino, Argentina.

Moges, S.M., K. Girma, R.K. Teal, K.W. Freeman, H. Zhang, D.B. Arnall, S.L. Holtz, B.S. Tubaña, O. Walsh, B. Chung, y W.R. Raun. 2007. In-season estimation of grain sorghum yield potential using a hand-held optical sensor. Archives of Agronomy and Soil Science 53(6):617-628.

Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Schepers, y G.V. Johnson. 2005. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36:2759-2781.

Sainz Rozas, H., y H.E. Echeverría. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. Rev. Fac. Agron., La Plata 103(1):37-44.

Vanderlip, R.L. 1993. How a sorghum plant develops. Kansas State University, 20 p.

Zamora, M., A Melin, y S Balda. 2010. Fertilización con nitrógeno y azufre en sorgo granífero en el centro de Buenos Aires. En: Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, pp. 444-446. Rosario, Santa Fe, 17-19 de noviembre de 2010. AIANBA, Pergamino, Argentina. *

Densidad de plantas en maíz: Ajuste por ambiente

Fernando Ross¹

Introducción

Entre los cultivos extensivos de mayor difusión en la pampa húmeda, el maíz es conocido por su sensibilidad ante factores de estrés. Cualquiera sea el causante que limite el crecimiento el cultivo condicionará fuertemente su productividad, siendo crítico el periodo centrado en la floración (Andrade y Sadras, 2000). En la zona de influencia de la Chacra Experimental de Barrow en el centro-sur de la provincia de Buenos Aires, el área con mayor difusión del cultivo se encuentra al este-noreste de la ciudad de Tres Arroyos, en dirección hacia el este y la costa. Esta sub-región contiene un alto porcentaje de suelos con limitaciones menores y recibe el mayor régimen de precipitación de la región. Según evaluaciones zonales, esta área exhibe la mayor superficie sembrada con maíz (Forján y Manso, 2011). Sin embargo, una minoría de productores extiende la frontera del cultivo y lo realiza en zonas consideradas marginales. En contraste con la región maicera, la principal limitación de las zonas marginales son su menor régimen hídrico y la presencia de tosca a profundidad variable que limita la profundidad útil del perfil del suelo. El horizonte calcáreo reduce la capacidad de almacenaje de agua y condiciona al cultivo a lluvias oportunas durante su ciclo. Generalmente, esta limitación se traduce en una reducción del rendimiento de los cultivos (Calviño y Sadras, 1999; Ross et al., 2012; Leonardi, 2012).

La experiencia de los productores muestra que los mapas de rendimiento de maíz en suelos con tosca exhiben menor productividad y mayor variabilidad respecto a la zona con aptitud maicera. En secano, la tecnología adecuada por sitio o ambiente está supeditada a la condición meteorológica del año. No obstante, comparando años con diferencias sustanciales en las lluvias, los ambientes conservan su identidad (Doerge, 1999). La forma racional de realizar manejo sitio específico (MSE) es explicando el comportamiento espacial de cada cultivo. Con este fin se diseñó un ensayo asociado a microparcels en los distintos ambientes que nos permitan identificar que le ocurrió al crecimiento y desarrollo del cultivo y a los componentes del rendimiento por ambiente. El objetivo de este trabajo fue evaluar la densidad de siembra y su interacción con la calidad del ambiente sobre la productividad del cultivo de maíz.

Materiales y métodos

En las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11 se realizaron cuatro experimentos, dos por año. Los mismos

se distribuyeron en la zona conocida como “El Carretero” (EC), serie Ochandio (Hapludol típico), sin tosca y con limitaciones menores; y en la cercanía de la ciudad de Tres Arroyos (TA), serie Tres Arroyos (Paleudol petrocálico), con relieve ondulado y tosca a distintas profundidades.

El experimento consistió en evaluar tres densidades de siembra por localidad, dispuestas en franjas atravesando el lote en el sentido de mayor variabilidad. La caracterización de la variabilidad se realizó con mapas de rendimiento o de tosca, seleccionando cortes (o límite teórico de ambiente) de modo de establecer tres ambientes contrastantes donde se ubicaron las tres densidades en franjas en forma aleatoria. La cosecha del ensayo se realizó con monitor de rendimiento. Para minimizar los errores mecánicos, los datos obtenidos del monitor fueron cotejados con el peso medido en la monotolva luego de la cosecha de cada franja.

La medición de la profundidad del horizonte calcáreo se realizó con una varilla metálica graduada (pinche), georreferenciando cada muestreo con GPS. Se utilizó un muestreo en grilla con mediciones cada 15 m.

Al no disponer de mapas previos, en EC se utilizaron los datos de rendimiento del mismo cultivo para construir el mapa de ambiente, sin considerar los datos de las franjas de ensayo. En cambio, en TA se utilizaron los datos de profundidad de tosca para obtener los mapas vectoriales de ambiente. El índice de productividad originado desde los datos de rendimiento se calculó como el porcentual referido al promedio del lote (%) y en el caso de tosca se expresó como profundidad efectiva del suelo (cm). Los datos espaciales se asociaron mediante la extensión GeoProcessing del programa ArcView 3.2, para su posterior evaluación. El análisis estadístico de los 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 densidad de siembra, la variable de sitio, y su interacción. Para exhibir la tendencia de los datos se trazaron regresiones con los promedios de la variable de sitio y de la densidad.

Resultados y discusión

La distribución de las precipitaciones resultó determinante en la diferencia entre campañas para el cultivo de maíz. Durante la campaña agrícola 2009/10, las precipitaciones importantes se concentraron en el mes de febrero, siendo tardías para el cultivo que floreció a mediados de enero. En cambio, durante la campaña 2010/11, las precipitaciones se concentraron

¹ Chacra Experimental Integrada MAA-INTA. Barrow. Tres Arroyos, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: fross@correo.inta.gov.ar

Tabla 1. Precipitaciones mensuales (PP) para las sub-zonas ensayadas y temperatura media mensual mínima y máxima (T°) para Barrow (Tres Arroyos).

2009/10		May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
PP, mm	El Carretero	47	42	56	5	29	32	83	72	71	250	95
	Tres Arroyos	42	47	38	4	36	45	70	62	50	241	80
T°, °C	Mínima	5.5	2.3	0.6	4.8	2.7	6.8	8.7	12.0	14.8	13.5	12.5
	Máxima	18.5	13.7	12.7	18.5	16.0	20.9	24.7	27.2	31.4	26.5	24.7
2010/11		May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
PP, mm	El Carretero	37	32	83	15	38	52	91	48	160	58	119
	Tres Arroyos	42	20	73	6	51	70	139	23	126	36	50
T°, °C	Mínima	5.2	2.2	1.7	1.1	4.5	7.0	9.7	12.7	15.3	12.6	12.1
	Máxima	17.6	13.6	11.2	15.0	17.5	20.4	22.5	29.8	29.0	27.4	26.5

Tabla 2. Rendimiento promedio y coeficiente de variación para las dos localidades ensayadas, en ambas campañas, según densidad de plantas a cosecha.

Localidad	Campaña	Densidad a cosecha pl m ⁻²	Rendimiento t ha ⁻¹	Coefficiente de Variación, CV %
Tres Arroyos	2009/10	3.9	3216	78.2
		5.9	2697	102.6
		7.4	1862	142.3
	2010/11	3.8	7722	29.9
		5.4	8221	33.4
		7.2	8455	34.2
El Carretero	2009/10	5.1	10 039	26.3
		6.7	10 436	22.7
		8.7	10 094	32.9
	2010/11	5.0	12 394	7.5
		7.2	13 012	5.2
		9.2	13 592	6.0

en enero favoreciendo el cuaje de los granos en ambas localidades. Asociado a las precipitaciones en el mes, la temperatura media máxima del mes de enero resultó elevada en la campaña 2009/10, con varios días de más de 37 °C que agudizaron el déficit hídrico y perjudicaron la polinización (**Tabla 1**).

Los promedios de rendimiento difirieron entre años y localidades (**Tabla 2**). En la localidad de TA, los promedios de rendimiento por año resultaron muy diferentes. Durante la campaña 2009/10, la productividad fue muy limitada dada la escasez de precipitaciones en enero. En cambio, la variación de rendimiento entre años para la localidad de EC no fue tan marcada. Estos resultados coinciden con la calidad de los ambientes evaluados y con el contraste de precipitaciones durante el periodo crítico del cultivo en cada año de siembra. Además, acorde a la variabilidad de ambientes en cada localidad, las variaciones de rendimiento resultaron superiores en TA a las encontradas en EC (**Tabla 2**).

El comportamiento sitio-específico del cultivo fue significativo en ambas localidades y en ambos años (**Tabla 3**). Además, en cada experimento resultó significativo el efecto de la densidad, y esta variable tuvo un comportamiento diferencial según el índice de ambiente.

En TA para la campaña 2009/10, las condiciones de crecimiento determinaron una interacción entre la densidad y la variable de sitio diferente a la observada en los demás experimentos. La mayor densidad de siembra presentó menor rendimiento en todos los ambientes y el rendimiento se hizo nulo cuando la tosca se encontró a menos de 70 cm de profundidad (**Figura 1a**). En cambio, las mejores condiciones de enero de la campaña siguiente, determinaron una mayor productividad para todas las profundidades, manteniendo la interacción con densidad de siembra (**Figura 1b**). Con poco perfil de suelo, el cultivo de maíz se comportó mejor a baja densidad, y con mayor

Tabla 3. Nivel de significancia sobre el rendimiento de las variables índice de ambiente (IA) y densidad de siembra (Ds) para cada localidad, en cada año de estudio. El índice de ambiente corresponde a la variable de sitio evaluada en cada localidad.

	TA 2009/10	EC 2009/10	TA 2010/11	EC 2010/11
IA	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Densidad	<0.0001	0.0673	0.0263	0.0001
IA*Ds	0.0019	0.0127	<0.0001	0.0164

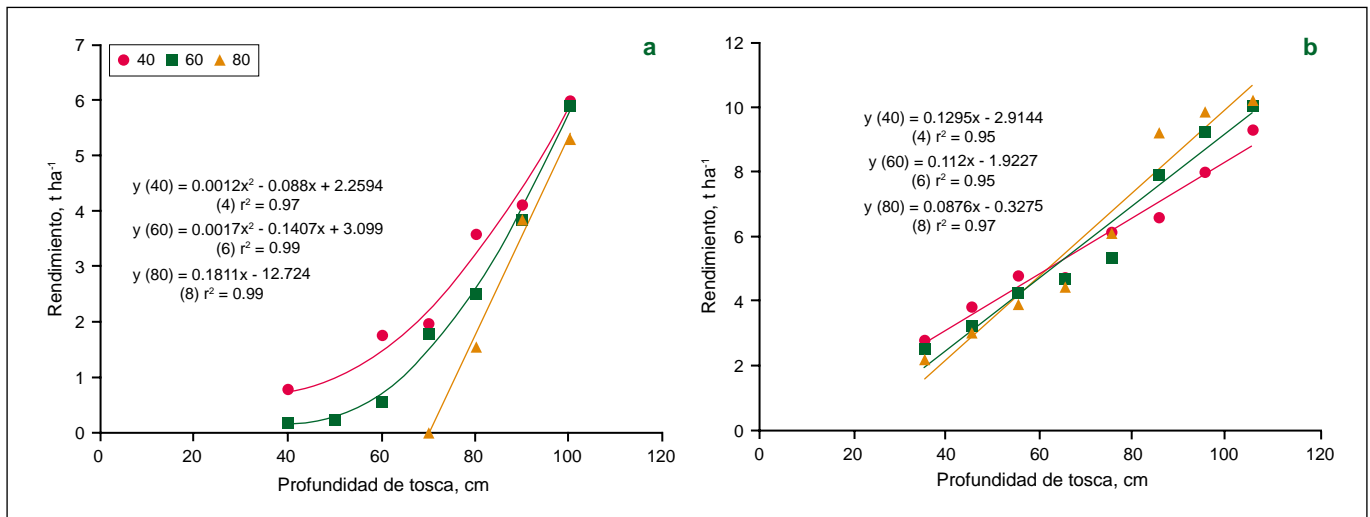


Figura 1. Rendimiento en función de la profundidad de tosca, para tres densidades de plantas a cosecha (miles plantas ha⁻¹) en TA, campañas 2009/10 (a; n=575) y 2010/11 (b; n=851).

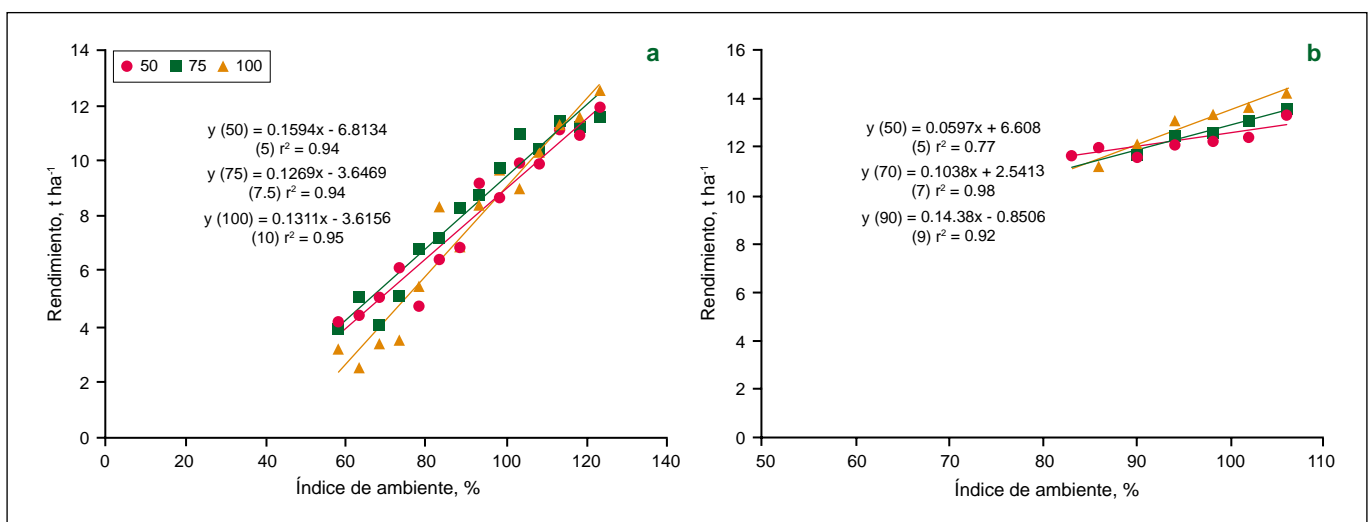


Figura 2. Rendimiento en función del índice de ambiente, para tres densidades de plantas a cosecha (miles plantas ha⁻¹) en EC, campañas 2009/10 (a; n=851), y 2010/11 (b; n=1037).

profundidad efectiva las densidades mayores tuvieron mayor rendimiento (**Figura 1b**).

En EC durante el año seco (2009/10), a bajo índice de ambiente, la densidad menor logró un mejor desempeño, mientras que con altos índices de ambiente los mayores rendimientos se alcanzaron con la mayor densidad (**Figura 2a**). En cambio, para la siguiente campaña, la alta densidad no presentó un menor rendimiento a bajos índices de ambiente y si logró un rendimiento muy superior a alto índice de ambiente (**Figura 2b**). En este caso, la amplitud del índice de ambiente resulto escasa

asociado a buenas precipitaciones que determinaron una menor variabilidad en los rendimientos (**Figura 2b** y **Tabla 2**). Además, para esa localidad, en ambas campañas mas del 65% de los datos de rendimiento superaron el índice de ambiente promedio (100%), es decir son campos parejos con alta proporción de superficie de rendimiento bueno y estable, contrario a lo que ocurre en TA donde el gradiente de ambientes es continuo y altamente proporcional. No obstante, esta es una variable específica de cada lote en particular.

El comportamiento de la densidad de siembra a través

de los diferentes casos evaluados resultó sugestivo. Si observamos las figuras, el nivel de rendimiento del cultivo en el cual las densidades no difieren, varió según cada caso. En TA durante la campaña 2010/11 no hubo diferencias entre densidades en el rango de rendimiento de 5 a 6 t ha⁻¹ (ver variable dependiente), para EC 2009/10 esta situación se encontró en un rango de 8-10 t ha⁻¹ y, para la campaña 2010/11, el rango fue 11-12 t ha⁻¹. Es decir, a medida que se incrementó el rendimiento promedio alcanzado por el cultivo (**Tabla 2**), sea por mejor calidad de suelo o por mayores precipitaciones, el nivel de rendimiento en que las densidades se igualaron también se incrementó (**Figuras 1 y 2**). Es interesante evaluar el comportamiento del cultivo en seco, podemos interpretar que mejores condiciones de crecimiento para el cultivo determinaron un mejor comportamiento de planta individual para capturar y utilizar los recursos, estableciendo un mayor potencial de compensación reproductivo y/o vegetativo.

Conclusión

Las diferencias en calidad de ambiente del cultivo resultaron notorias provocando fuertes saltos de productividad. En TA, el rendimiento se relacionó altamente con la profundidad de tosca, y en EC, con el índice de ambiente. No obstante, la densidad de plantas podría ser una herramienta de manejo muy interesante, que determina la posibilidad de realizar el cultivo en zonas marginales utilizando manejo sitio-específico con ajuste por ambiente.

Agradecimientos

A los productores y técnicos pertenecientes al grupo local de intercambio en agricultura de precisión

(GRADEP), a Guillermo Pugliese técnico local de Bunge y al productor Sr. Favini, por sus colaboraciones, tiempo y dedicación.

Bibliografía

- Andrade, F.H., y V.O. Sadras. 2000. Bases para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja. Editorial Médica Panamericana S. A. Capítulo 3. pp. 61-96.
- Doerge, T.A. 1999. Management zone concept. SSMG-2. Information Agriculture Conference, Steward Center, Purdue, IN.
- Calviño, P.A., y V.O. Sadras. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research* 63:237-246.
- Forján, H., y M.L. Manso. 2011. Estimación del área sembrada durante la Campaña 2010/11. Carpeta de actualización técnica de la Chacra Experimental Integrada de Barrow. p 7-9. CEI MAA-INTA Barrow. Tres Arroyos, Buenos Aires.
- Leonardi, M. 2012. Comportamiento sitio-específico de la soja en el centro sur bonaerense. Tesis para obtener el título de grado en el Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Buenos Aires.
- Ross, F., y J. Massigoge. 2012. Interacción fertilización nitrogenada y ambiente en cebada cervecera cv. Scarlett: I Rendimiento. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AAC-SLCS. Mar del Plata, Argentina. 16 al 20 de abril de 2012. *



Fertilización aditiva en maíz

Luis Ventimiglia y Lisandro Torrens Baudrix¹

Introducción

La utilización del suelo con fines agrícolas se realiza con mayor intensidad cada año. La necesidad de obtener mayores producciones para tener iguales o mejores retornos económicos, la necesidad de conseguir más cantidad de granos para alimentar a un mundo más demandante de alimentos, la superación que se obtiene en los híbridos y variedades a través de la genética, maquinarias y productos para el control de malezas y plagas, entre otros factores, hace que los rendimientos se incrementen y con ello también las tasas de exportación de nutrientes (Cruzate y Casas, 2012). Por otro lado la siembra directa, ha colaborado en la disminución de la degradación física, química y biológica, que el productor agropecuario vino realizando durante muchos años (Crovetto, 1992). Además, es factible que en aquellos campos donde se ha consolidado este sistema de labranza con una rotación adecuada, la cual contemple gramíneas y leguminosas, mejore el sistema productivo. De hecho sobre el tema específico hay pruebas científicas que han demostrado, hace bastante tiempo atrás, que es posible, en ciertos aspectos, mejorar el suelo a través de una agricultura continua (Faulkner, 1974), de todos modos debemos ser conscientes que esto último no es lo más común de encontrar en la región pampeana argentina. En este sentido el manejo de la nutrición de los cultivos, constituye una herramienta clave para el logro de sistemas productivos sostenibles tanto en el aspecto productivo, como económico, ambiental, y social.

El objetivo de este trabajo fue analizar los efectos de la fertilización sobre maíz en un suelo bajo siembra directa estabilizada, partiendo de los siguientes interrogantes: i) ¿Cuál es la capacidad productiva del suelo sin fertilización?; ii) ¿Cuál es la respuesta a la fertilización fosforada?; iii) ¿Cuál es la respuesta a la forma de aplicación de fósforo (P)?; iv) ¿Cuál es la respuesta a la fertilización nitrogenada?; y v) ¿Cuál es la respuesta a la complementación del P y nitrógeno (N), con otros nutrientes como el azufre (S) y el zinc (Zn)?.

Materiales y métodos

Durante las campañas 2010/11 y 2011/12, la Agencia INTA 9 de Julio realizó dos experiencias en el establecimiento “Dos Amigos”, próximo a la localidad de Fauzón en el partido de 9 de Julio. El suelo sobre el cual se realizaron las experiencias, pertenece a la serie Norumbega, clasificado como Hapludol éntico (franco arenoso) (INTA, 1992), con una historia de manejo bajo siembra directa de más de 20 años y una rotación

predominante de Trigo/Soja 2^{da} – Maíz – Soja 1^{ra}, siendo fertilizados todos los cultivos a excepción de la soja de segunda. Se debe destacar que la fertilización realizada por el productor, en general, privilegió la rentabilidad por sobre la fertilidad de sus suelos resultando en balances de nutrientes negativos, en general.

Los ensayos se realizaron sobre cultivos de maíz en lotes diferentes, sobre antecesor soja de primera y soja de segunda en 2010/11 y 2011/12, respectivamente. El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con 4 repeticiones de 24.5 m² por cada unidad experimental. En ambas campañas se realizó un adecuado manejo sanitario del cultivo. En la **Tabla 1**, se presentan las características del ensayo, para las dos campañas estudiadas, como así también los parámetros químicos de los lotes.

En la **Tabla 2** se describen los tratamientos de fertilización aplicados sobre maíz en ambas campañas. Las fuentes de nutrientes utilizadas fueron urea para N, superfosfato

Tabla 1. Descripción del cultivo y análisis de suelo previo a la siembra de maíz correspondientes a los lotes donde se realizaron los ensayos. INTA 9 de Julio. Campañas 2010/11 y 2011/12. Notas: MO = materia orgánica, NO₃⁻ = nitratos y S-SO₄⁻² = azufre de sulfatos.

	----- Campaña -----	
	2010/11	2011/12
Cultivo		
Antecesor	Soja 1 ^{ra}	Soja 2 ^{da}
Híbrido	DK 747 MGRR2	DK 692 MGRR2
Fecha de siembra	01/10/2010	26/09/2011
Espaciamiento	70 cm	70 cm
Densidad de siembra	71 500 semillas ha ⁻¹	80 000 semillas ha ⁻¹
Análisis de suelo, 0-20 cm		
MO, %	2.6	2.5
pH	5.7	5.7
N total, %	0.150	0.125
P Bray, mg kg ⁻¹	5	5.5
C:N	10.1	11.6
NO ₃ ⁻ , mg kg ⁻¹		
0-20 cm	16	44
20-40 cm	16	16
40-60 cm	13	10
S-SO ₄ ⁻² , mg kg ⁻¹	10	8

¹ INTA 9 de Julio. Buenos Aires. Argentina. Correo electrónico: a9julio@internueve.com.ar

Tabla 2. Tratamientos de fertilización de maíz en los ensayos para las campañas 2010/11 y 2011/12. INTA 9 de Julio.

Tratamiento	Descripción	----- Dosis de nutrientes -----			
		N	P	S	Zn
		----- kg ha ⁻¹ -----			cc ha ⁻¹
T1	Testigo	-	-	-	-
T2	P en línea de siembra	-	20	-	-
T3	N al voleo	150	-	-	-
T4	P línea de siembra + N voleo	150	20	-	-
T5	P voleo pre-siembra + N voleo	150	20	-	-
T6	P línea de siembra + N voleo + S voleo	150	20	15	-
T7	P línea de siembra + N voleo + S voleo + Zn semilla	150	20	15	15

triple de calcio en el caso de P, sulfato de calcio para S, y Zincofix de la empresa Becker Underwood® (Zn 10% + S 4%) en el caso de Zn.

Debemos recordar que las dos campañas fueron complicadas desde el punto de vista hídrico, sobre todo 2011/12, que tuvo un mes de diciembre en el cual solo llovieron 36 mm y un mes de enero durante el cual, si bien acumuló 180 mm, el grueso de las lluvias se produjeron en los últimos 10 días del mes, de allí el mejor rendimiento del testigo y de los tratamientos en particular, registrados en la primer campaña con respecto a la segunda (Tabla 3).

La cosecha del ensayo se realizó en forma manual, sobre una superficie de 7 m² por unidad experimental. El material cosechado fue trillado en una máquina estacionaria y el rendimiento fue expresado en kg ha⁻¹ a humedad de recibo.

Al no establecerse interacción tratamiento*año, el análisis de los datos se realizó en forma conjunta, tomando los dos años del ensayo. A tal efecto se realizó un análisis de variancia al 1% de probabilidad. En función de este resultado se compararon las medias de los tratamientos mediante el test de Fisher al 5% de probabilidad.

Tabla 3. Precipitaciones mensuales en los ensayos de maíz de 2010/11 y 2011/12. INTA 9 de Julio.

Mes	2010/11	2011/12
	----- mm -----	
Septiembre	111	61
Octubre	51	69
Noviembre	33	125
Diciembre	51	36
Enero	131	180
Febrero	67	199
Marzo	47	200

Resultados y discusión

En la **Figura 1** se muestran los rendimientos promedio de ambas campañas para los distintos tratamientos.

Respecto a la fertilidad del suelo

De acuerdo a los análisis de suelo presentados en la **Tabla 1**, que indican baja disponibilidad de N y de niveles de P Bray, parecería bastante difícil predecir que el testigo alcance un rendimiento de 9523 kg ha⁻¹, en promedio de los dos años (10 351 kg ha⁻¹ y 8695 kg ha⁻¹). No cabe duda que el sistema de manejo que el campo tiene, con buena rotación y un sistema de siembra directa estabilizado por más de 20 años, tiene una acción fundamental en las propiedades físicas, biológicas y químicas, posibilitando que el aporte de nutrientes por parte de los rastrojos y la mineralización, sea muy importante.

A modo de un simple cálculo se puede hacer una estimación aproximada, de lo que pudo haber aportado el suelo como promedio de ambas campañas. Si se considera que el maíz tiene una necesidad de absorción de 22 kg N t de grano producido⁻¹ (Ciampitti y García, 2007), para un rendimiento promedio alcanzado de 9523 kg ha⁻¹ para el testigo (T1), se requerirían aproximadamente 180 kg N ha⁻¹.

El suelo, de acuerdo a los datos obtenidos aportó al momento de la siembra, hasta los 60 cm de profundidad, 24 kg ha⁻¹ y 38 kg ha⁻¹ de N, para la campaña 2010/11 y 2011/12, respectivamente. Asumiendo en consecuencia una necesidad de 180 kg N ha⁻¹ y un aporte promedio del suelo a la siembra de 31 kg N ha⁻¹, el suelo aportó vía descomposición de residuos de soja y mineralización durante el ciclo del cultivo alrededor de 150 kg N ha⁻¹. Debe considerarse que el aporte vía mineralización y descomposición de residuos fue superior a este estimado de 150 kg N ha⁻¹, ya que la eficiencia de absorción no es del 100%.

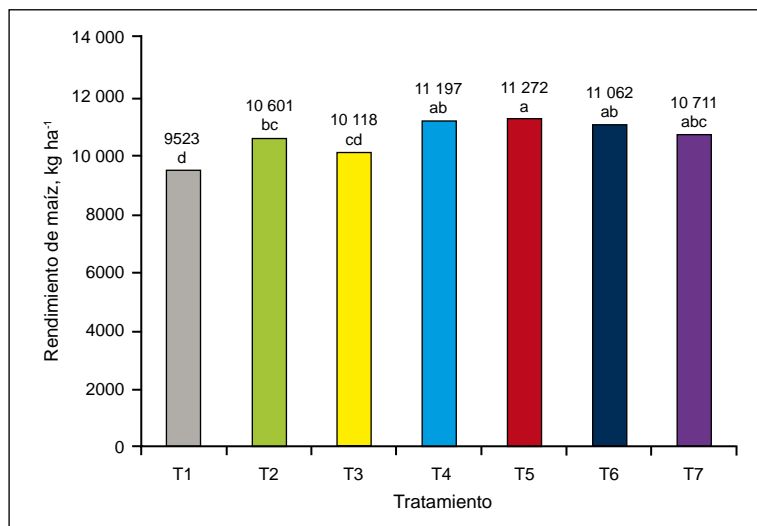


Figura 1. Rendimientos promedio de maíz para los distintos tratamientos de fertilización tomando ambas campañas. INTA 9 de Julio. Campañas 2010/11 y 2011/12. Nota: medias seguidas de letras distintas, difieren estadísticamente según el test de Fisher ($p < 0.05$).

Respecto a P, como se aprecia en la **Tabla 1**, la disponibilidad inicial de este nutriente en el suelo era muy limitada (5 mg kg^{-1}) para el desarrollo satisfactorio del maíz, sin embargo el rendimiento del testigo promedió más de 9 t ha^{-1} , siendo muy probable que la fracción orgánica de este elemento, haya sido una importante fuente del nutriente durante el ciclo del cultivo. Si consideramos un requerimiento medio de $4 \text{ kg P t de grano}^{-1}$ (base seca), el cultivo requirió alrededor de 33 kg P ha^{-1} .

Respecto a los rendimientos

Analizando las diferencias entre tratamientos de fertilización, la respuesta a la aplicación solo de N (T3 vs T1) no fue significativa, siendo en promedio 6.2% (575 kg ha^{-1}) y económicamente no viable (costo de urea $(46-0-0) = 3.15 \text{ \$ kg}^{-1}$; precio del maíz = $670 \text{ \$ t}^{-1}$). La respuesta al agregado de solamente P (T2 vs T1) fue de 1078 kg ha^{-1} , (+11.3%), compensando ampliamente la inversión realizada en el producto y su aplicación (costo del superfosfato triple de calcio $(0-20-0) = 3.5 \text{ \$ kg}^{-1}$; precio del maíz = $670 \text{ \$ t}^{-1}$).

Como en tantas otras experiencias conducidas en este tipo de suelo y manejo, no se encontraron diferencias significativas a la forma de aplicar el P al voleo o en la línea de siembra (T4 vs T5).

Los mayores incrementos de rendimiento, se lograron por la combinación NP (T4 y T5), $+1674 \text{ kg ha}^{-1}$ (+17.6%). Sin embargo, estas respuestas no resultaron económicamente favorables, probablemente por la alta dosis de N utilizada. En cuanto a la respuesta a S y Zn, en esta experiencia no se observaron incrementos significativos por el agregado de estos nutrientes al plan de fertilización de maíz.

Consideraciones finales

A futuro se propone revisar los diagnósticos que se disponen para N y P, al menos para los suelos estudiados en este trabajo, que cuentan con una fracción arenosa en su composición textural superior al 60%, y que vienen siendo manejados en sistema de siembra directa continua por muchos años, con rotaciones adecuadas, entre otros. Es posible que en la actualidad se subestime el valor de los diagnósticos de fertilización dentro del sistema de producción. Se debe recordar que los ajustes de los diagnósticos de fertilización se realizaron en otras épocas, en donde, si bien ya existía la siembra directa, esta ocupaba poca superficie y por otro lado no eran sistemas estabilizados, cosa que hoy en día es muy factible de encontrar. La constante investigación e iteración de grupos de trabajo será la que a futuro podrá ayudar a encontrar respuesta a los interrogantes planteados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Sres. Bueno y Scalice, titulares del establecimiento "Dos Amigos", lugar donde se condujo la experiencia, al Sr. Gustavo Luceri ayudante de campo del INTA 9 de Julio y a los Sres. Gustavo Bueno, Jorge Primiani, por el apoyo brindado.

Bibliografía

- Ciampitti, I.A., y F.O. García. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. Cereales, Oleaginosos e Industriales. Informaciones Agronómicas No. 33. Archivo Agronómico No. 11. IPNI Cono Sur. Acaassu, Buenos Aires. Disponible on-line en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1081>
- Crovetto, C. 1992. Doce años de cero labranza: Producción de maíz en rotación y análisis de algunos parámetros químicos, físicos y biológicos en suelos (Alfisolos) de la cordillera de la costa de Chile central. In: 1^{er} Congreso interamericano de siembra directa. Villa Giardino, Córdoba: 180-192.
- Cruzate, A., y R. Casas. 2012. Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. No. IAH 6 - Junio 2012. IPNI Cono Sur. Acaassu, Buenos Aires: 7-14.
- Faulkner, E. 1974. La insensatez del agricultor. Erosión un problema ecológico. Editorial El Ateneo. 138 pp.
- INTA. 1992. Instituto de suelos. Área de investigación en cartografía de suelos y evaluación de tierras. Carta de suelos de la república Argentina. Partido de 9 de Julio. Hoja 3560.*

Influencia de la fertilización inorgánica sobre la actividad microbiana del suelo*

C. Conforto¹, O.S. Correa², A. Rovea³, M. Boxler³, S. Rodríguez Grastorf³, J. Minteguiaga³, J. Meriles⁴ y S. Vargas Gil¹

Introducción

Los microorganismos desarrollan en el suelo una amplia gama de acciones que inciden en el desarrollo y nutrición vegetal. Además, aportan información relativa a la actividad metabólica edáfica, mostrando mayor sensibilidad, en comparación con los parámetros químicos y físicos, frente a procesos no deseables como el manejo inapropiado (Garland et al., 2010). La función de los microorganismos, especialmente la de algunos grupos definidos, puede ser manipulada para permitir que determinadas actividades microbianas, bioquímicas y enzimáticas se expresen de forma eficaz, jugando un papel preponderante como indicadores de calidad del suelo (Vargas Gil et al., 2011).

Una de las prácticas agrícolas más comúnmente empleadas es la fertilización química, que produce marcados beneficios en las plantas debido al aumento en la disponibilidad de nutrientes que produce (Wu et al., 2011). Sin embargo, poco se conoce acerca del efecto que provocan los fertilizantes en la dinámica de las poblaciones microbianas. Según algunos autores, los fertilizantes provocan modificaciones en las poblaciones de hongos y bacterias en el suelo (Ge et al., 2008), mientras que otros investigadores no han encontrado diferencias en la respuesta de los microorganismos ante la fertilización (Clegg, 2006).

Particularmente, para estudiar los aspectos fisiológicos de los efectos que tienen los fertilizantes en el suelo, es posible emplear un método denominado perfiles fisiológicos a nivel de comunidad (CLPP). Esta técnica tiene como finalidad analizar el potencial metabólico de las comunidades microbianas del suelo, evaluando los múltiples atributos fisiológicos de la comunidad microbiana, con el propósito de discriminar patrones espaciales, temporales o bien efectos experimentales (Bossio y Show, 1995), como el caso de este trabajo.

El objetivo del presente estudio fue evidenciar la respuesta de las actividades

de las poblaciones microbianas, bajo la influencia de la adición de diferentes fuentes de nutrientes inorgánicos: nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), y micronutrientes, en un ensayo de larga duración.

Materiales y métodos

Las mediciones se llevaron a cabo en la campaña 2010/11 en un ensayo en el establecimiento Balducchi, ubicado en la localidad de Teodelina (Santa Fe), que forma parte de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (CREA-IPNI-ASP). En ese ensayo, bajo rotación maíz-trigo/soja, se evalúan, anualmente desde la campaña 2000/01, fertilizaciones con N, P, S y micronutrientes en las siguientes combinaciones: PS, NS, NP, NPS, NPS+Micronutrientes (**Tabla 1**), y Testigo (sin adición de fertilizante) en 3 repeticiones siguiendo un diseño en bloques completos al azar. Hacia el final del ciclo del cultivo de maíz se tomaron muestras de suelo provenientes de los 5 primeros cm. De cada parcela se extrajeron seis muestras de suelo compuestas, siguiendo un diseño en V. Los muestreos se efectuaron 15-20 días antes de la cosecha del cultivo. Las muestras fueron conservadas en frío hasta la posterior determinación de la actividad microbiana.

La cuantificación de actividad microbiológica de las muestras de suelo se realizó mediante la determinación

Tabla 1. Dosis de fertilizantes agregados en los diferentes tratamientos del ensayo de larga duración. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campaña 2010/11.

Fuentes nutricionales kg ha ⁻¹	----- Tratamientos -----					
	Testigo	PS	NS	NP	NPS	NPS + Micros
N	-	18	160	160	160	160
P	-	35	-	35	35	35
K	-	-	-	-	-	14
Mg	-	-	-	-	-	8
S	-	17	17	-	17	17
B	-	-	-	-	-	1
Zn	-	-	-	-	-	2
Cu	-	-	-	-	-	2

¹ Instituto de Patología Vegetal (IPAVE-INTA). Córdoba, Argentina. Correo electrónico: svargasgil@ciap.inta.gob.ar

² Instituto de Investigaciones en Biociencias Agrícolas y Ambientales (INBA-CONICET), Cátedra de Microbiología Agrícola y Ambiental (Fac. Agronomía) UBA.

³ Grupo CREA Región Sur de Santa Fe.

⁴ Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV- CONICET), UNC.

* Trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina.

de perfiles fisiológicos (CLPP), de acuerdo a metodología ajustada por Ruiz et al. (2008). Se emplearon placas de 96 pocillos, a las que se adicionó medio basal conteniendo K_2HPO_4 (21 g l⁻¹), KH_2PO_4 (9 g l⁻¹), $MgSO_4$ (0.3 g l⁻¹), $(NH_4)_2SO_4$ (1.5 g l⁻¹), $CaCl_2$ (0.03 g l⁻¹), $FeSO_4$ (0.015 g l⁻¹), $MnSO_4$ (0.0075 g l⁻¹), $NaMoO_4$ (0.0075 g l⁻¹). Se agregó además 3 g l⁻¹ de las siguientes fuentes de carbono (C): Dextrosa, Glucosa, Manosa, Lactosa, Triptofano, Lisina, Arginina, Tiamina, Asparagina, Xilosa, Fructosa, Galactosa, y el Colorante (Violeta de tetrazolio, 0.0075%). Finalmente, se agregó a las placas el inóculo suelo, previamente se realizó una suspensión (2 g en 10 ml de agua destilada estéril), que fue agitada (10 min) y centrifugada (10 min a 5000 rpm). Cada pocillo de la placa fue llenado con 60 µl de medio basal, colorante, fuentes carbonadas e inóculo suelo, en condiciones de esterilidad. Luego de sembradas las placas se incubaron a 28 °C, y se realizaron las lecturas en espectrofotómetro (UV-Vis) a 590 nm, cada 24 horas.

También se calcularon otros parámetros, como el contenido de C total (Black, 1965), N total por micro-Kjeldhal (Bremmer, 1996), P extractable (Bray y Kurtz, 1945) y S (Fontanive et al., 2004) y la estabilidad de agregados (EAs), como parámetro físico, por la técnica de los microtamices (Corvalán et al., 2000).

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el empleo del programa InfoStat Profesional versión 2011 (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina). La normalidad de los datos se comprobó mediante el test de Shapiro-Wilks. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con $p \leq 0.05$ para evaluar la diferencia entre los tratamientos, empleando el test de Fisher (LSD) a posteriori. Además se utilizó el análisis de componentes principales (ACP) como herramienta del análisis

Tabla 2. Influencia de la fertilización inorgánica sobre parámetros químicos y físicos edáficos (0-20 cm) en un cultivo de maíz en un ensayo de larga duración. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. MO: Materia orgánica, N total: Nitrógeno total, Pe: Fósforo extractable Bray-1, S: Azufre de sulfatos, EAs: Estabilidad de agregados. *Los valores seguidos de las mismas letras no presentaron diferencias significativas con $p \leq 0.05$.

Tratamientos	Parámetros edáficos				
	MO %	N total %	Pe ppm	S ppm	EAs %
Testigo	3.02 bcd*	0.16 b	18 c	16 c	43.8 bc
NP	2.78 cd	0.15 b	83 b	22 b	42.6 bc
NS	3.12 bc	0.19 a	12 c	18 bc	53.6 a
PS	2.54 d	0.14 b	62 b	17 c	36.6 c
NPS	3.50 ab	0.20 a	82 b	27 a	44.3 b
NPS+Micros	3.69 a	0.21 a	111 a	31 a	45.4 b

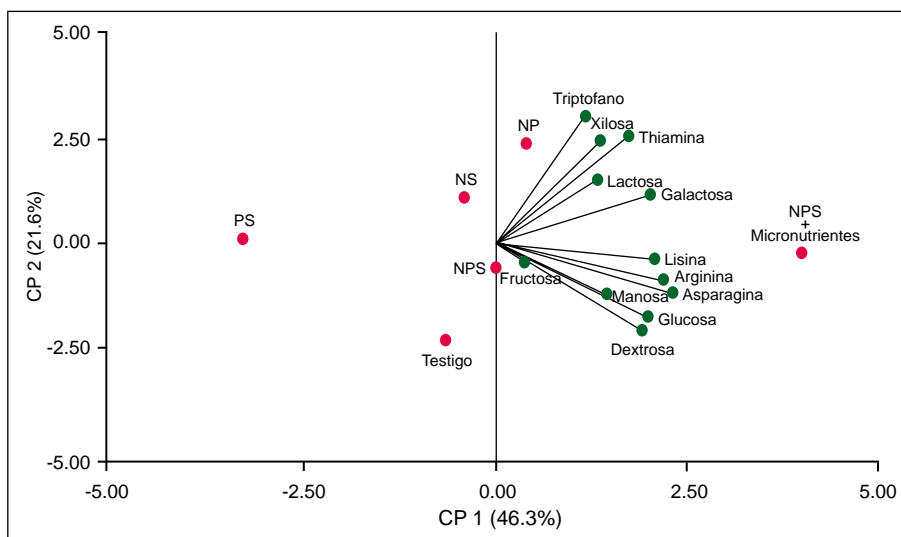


Figura 1. Biplot de las funciones microbianas del suelo, determinadas a partir del consumo de fuentes de C, en respuesta a la fertilización inorgánica (N, P, S y micronutrientes) en el cultivo de maíz en un ensayo de larga duración. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe.

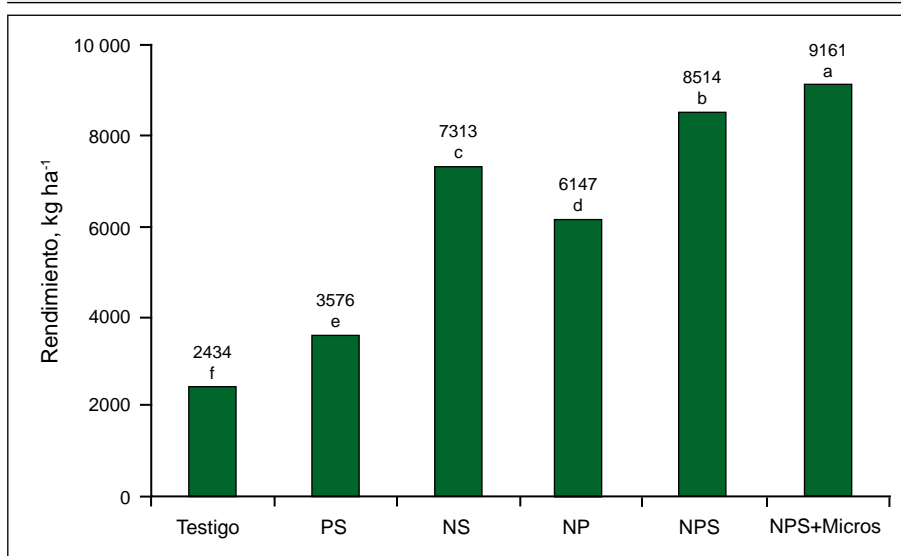


Figura 2. Efecto de la fertilización inorgánica sobre el rendimiento del cultivo de maíz, en un ensayo de larga duración. Las barras con letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo al test LSD ($P \leq 0.05$).

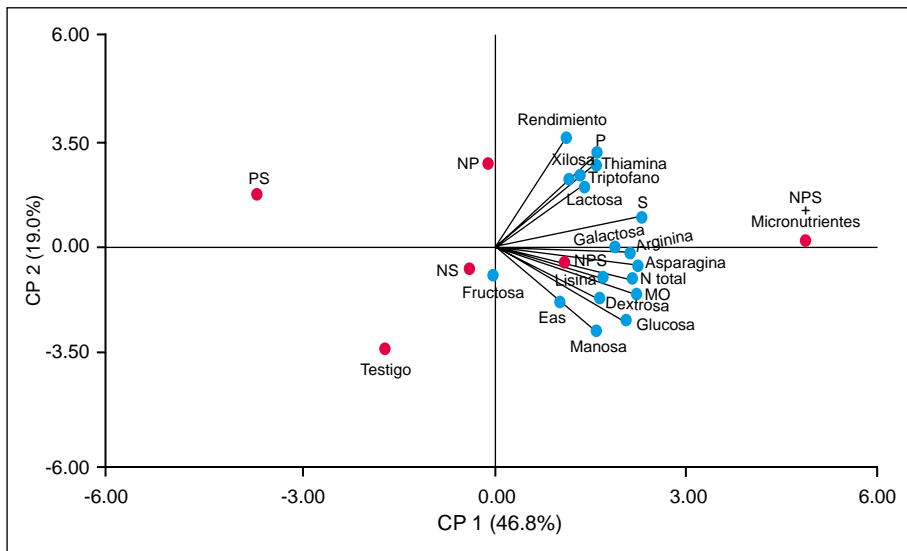


Figura 3. Biplot de las funciones microbianas edáficas (a partir del consumo de fuentes de C), de variables químicas, físicas y del rendimiento de maíz, en respuesta a la fertilización inorgánica (N, P, S y micronutrientes). Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campaña 2010/11. Eas: Estabilidad de agregados, MO: Materia orgánica, P: Fósforo extractable.

diferenciación de los tratamientos, en el cual el tratamiento NPS+Micros presentó, en general, mayor actividad microbiana y mayor contenido MO, N, Pe y S, en comparación con los tratamientos PS y Testigo, a lo largo del CP 1. Mientras que, a lo largo del CP 2, se diferenció el Testigo del tratamiento NP, siendo el rendimiento una de las variables de más peso para distinguir entre ambos.

Según la información obtenida, la actividad microbiana del suelo, medida por la cuantificación del consumo de diversas fuentes de C, fue influenciada por la fertilización inorgánica. De acuerdo al ACP, el tratamiento con nutrición más balanceada (NPS+Micros) registró mayor consumo de sustratos

multivariado, para determinar los parámetros de mayor influencia en la diferenciación de los tratamientos.

Resultados y discusión

Se realizó un ACP con la finalidad de determinar si el patrón de consumo de las diferentes fuentes de C era similar en los distintos tratamientos. Según la **Figura 1**, el componente principal 1 (CP 1) explicó el 46.3% de la variabilidad de los datos, mientras que el componente 2 (CP 2) explicó 21.6%, explicando ambos un 67.9% de la variabilidad total. El tratamiento NPS+Micronutrientes registró la mayor actividad respiratoria de las fuentes de C, diferenciándose de los tratamientos PS y Testigo, a lo largo del CP 1.

De acuerdo al ANAVA para las variables químicas y físicas edáficas, la fertilización inorgánica tuvo influencia diferencial sobre el contenido de MO, N total, Pe, S y EAs (**Tabla 1**). Según la **Tabla 2**, en general, los tratamientos NPS+Micronutrientes y NPS registraron mayor contenido de MO, N total, Pe y S que el Testigo, mientras que la EAs fue variable.

El rendimiento del cultivo de maíz también respondió a los diferentes tratamientos, siendo mayor en los tratamientos fertilizados, y menor en el Testigo (**Figura 2**), de acuerdo al siguiente orden: NPS+Micros > NPS > NS > NP > PS > Testigo.

Finalmente, se realizó un ACP con todas las variables que se midieron en respuesta a la fertilización (**Figura 3**). Según el ACP, los tratamientos se diferenciaron claramente de acuerdo al peso de las variables. El CP 1 explicó 46.8% de la variabilidad de los datos, mientras que el CP 2 explicó un 19.0% de la variabilidad, explicando ambos un 65.8% del total. El análisis mostró una clara

carbonados, que los restantes tratamientos. Según algunos autores (Hu et al., 2011), los fertilizantes inorgánicos afectan los parámetros biológicos debido al incremento del contenido de C orgánico del suelo, que determina el crecimiento de los microorganismos (Grayston et al., 1998), siendo el P un factor clave en el aumento de la diversidad microbiana y fertilidad del suelo. Según Hu et al. (2011), los microorganismos en suelos fertilizados aumentan la eficiencia en la utilización del C, ocurriendo lo contrario en suelos deficientes en nutrientes, debido principalmente a la poca disponibilidad de P y, en segundo lugar, de N.

En situaciones de escasez de nutrientes, los microorganismos se encuentran bajo estrés para sobrellevar la deficiencia nutricional y para una apropiada actividad metabólica (Zheng et al., 2009). Sin embargo, algunos autores (Islam et al., 2011) encontraron que los CLPPs de las comunidades microbianas del suelo no fueron afectadas por la fertilización, ya que los patrones de consumo no fueron consistentes entre los diferentes tratamientos. Esto indica, según los autores, la complejidad de las actividades de los microorganismos in vivo, y las limitaciones de las mediciones in vitro.

También se observaron mejoras en los parámetros químicos en los tratamientos con fertilización más balanceada (NPS+Micros), en comparación con el Testigo. Según Zhong et al. (2010), por una parte, una fertilización balanceada estaría respondiendo a la demanda nutricional de los cultivos. A su vez, si esta demanda esta cubierta, se genera un incremento de exudados radiculares, lo cual promueve el aumento de la biomasa microbiana y la actividad metabólica de los microorganismos. Por otra parte, Zhong et al. (2010) también afirman que el incremento de nutrientes en el

suelo, en respuesta a la fertilización, es lo que estimula la actividad microbiana.

Finalmente, el rendimiento del cultivo también se incrementó en respuesta a la fertilización, en comparación con el Testigo. Existe una compleja interacción entre el nivel óptimo de fertilización, la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de los microorganismos y el buen desarrollo de las plantas. Esto demuestra que son necesarios más estudios para profundizar el conocimiento acerca del efecto de la fertilización inorgánica sobre las funciones metabólicas de la microbiota del suelo.

Conclusión

Las actividades microbianas revelan cambios en la calidad del suelo debidos al manejo. El monitoreo de las funciones microbianas en el suelo, relacionadas con la transformación de nutrientes, puede ser una herramienta eficiente para evidenciar el efecto de las prácticas culturales sobre la salud edáfica. Según los resultados encontrados, las comunidades microbianas en suelos con fertilización balanceada serían más activas en la utilización de sustratos carbonados. Este aumento de las actividades microbianas podría favorecer el ciclo de nutrientes en el suelo, mejorando el estado nutricional de la planta e incrementando el rendimiento del cultivo de maíz, en comparación con suelos no fertilizados.

Agradecimientos

El trabajo fue financiado por el Convenio de Vinculación Tecnológica INTA-CREA Sur de Santa Fe. Proyecto Específico (INTA AERN 295582) "Comunidades microbianas del suelo: Estructura y funciones en respuesta al manejo".

Bibliografía

- Black, C.A. 1965. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc., Publisher Madison, Wisconsin, pp. 770.
- Bossio, D.A., y K.M. Scow. 1995. Impact of carbon and flooding on the metabolic diversity of microbial communities in soils. *Appl. Environ. Microbiol.* 61:4043-4050.
- Bray, R.H., y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of Phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. In: *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*. Sparks, DL (Ed.). Soil Sci. Soc. Am. Book series Nº 5, pp. 1085-1128.
- Clegg, C. 2006. Impact of cattle grazing and inorganic fertilizer additions to managed grasslands on the microbial community composition of soils. *App. Soil Ecol.* 31:73-82.
- Corvalán, E.R., A. Franzoni, J. Huidobro, y J.L. Arzeno. 2000.

In: *Actas del XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata. Método de microtamices para la determinación de la estabilidad de agregados del suelo, 1-2 mm. Comisión I - Panel 25.

- Fontanive, A., H. Jiménez, A. De Lahorna, D. Effron, y L. Defrieri. 2004. Determinación de azufre inorgánico en suelos. Método turbidimétrico. En: *Sistema de Apoyo Metodológico para Laboratorios de Análisis de Suelo, Agua, Vegetales y Enmiendas Orgánicas*. SAGPyA. ISBN 987-9184-40-8
- Garland, J.L., C.L. Mackowiak, y M.C. Zabaloy. 2010. Organic waste amendment effects on soil microbial activity in a corn-rye rotation: Application of a new approach to community-level physiological profiling. *App. Soil Ecol.* 44(3):262-269.
- Ge, Y., J.B. Zhang, L.M. Zhang, M. Yang, y J.Z. He. 2008. Long-term fertilization regimes affect bacterial community structure and diversity of an agricultural soil in northern China. *J Soils Sed.* 8:43-50
- Grayston, S.J., S. Wang, C.D. Campbell, y A.C. Edwards. 1998. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.* 30:369-378.
- Hu, J., X. Lin, J. Wang, J. Dai, R. Chen, J. Zhang, y M.H. Wong. 2011. Microbial functional diversity, metabolic quotient, and invertase activity of a sandy loam soil as affected by long-term application of organic amendment and mineral fertilizer. *J. Soils Sed.* 11:271-280.
- Islam, M.R., P.S. Chauhan, Y. Kim, M. Kim, y T. Sa. 2011. Community level functional diversity and enzyme activities in paddy soils under different long-term fertilizer management practices *Biol. Fertil. Soils* 47:599-604.
- Ruiz, D.E., M.S. Montecchia, O.S. Correa, N.L. Pucheu, M.A. Soria, y A.F. García. 2008. Characterization of pristine and agricultural soils by catabolic profiling of microbial communities. In: *Actas del XLIV Annual Meeting-Argentine Society for Biochemistry and Molecular Biology Research*. Carlos Paz, Córdoba, Argentina. p102. ISSN 0327 9545 (print).
- Vargas Gil, S., A. Becker, C. Oddino, M. Zuza, A. Marinelli, y G. March. 2009. Soil biological, chemical and physical responses to the impact of tillage intensity, fertilization, and cattle grazing in a long-term field trial. *Environ. Manag.* 44:378-376.
- Vargas Gil, S., J. Meriles, C. Conforto, M. Basanta, V. Radl, A. Hagn, M. Schloter, y G.J. March. 2011. Soil microbial communities response to tillage and crop rotation in a soybean agroecosystem in Argentina. *Eur. J. of Soil Biol.* 47:55-60.
- Wu, F., M. Dong, Y. Liu, X. Ma, L. An, J.P.W. Young, y H. Feng. 2011. Effects of long-term fertilization on AM fungal community structure and Glomalin-related soil protein in the Loess Plateau of China. *Plant Soil* 342:233-247.
- Zheng S., J. Hu, K. Chen, J. Yao, Z. Yu, y X. Lin. 2009. Soil microbial activity measured by microcalorimetry in response to long-term fertilization regimes and available phosphorous on heat evolution. *Soil Biol. Biochem.* 41:2094-2099.*

La fertilización inorgánica y los hongos micorrícicos en el cultivo de maíz*

B. Grümberg¹, C. Conforto¹, C. Pérez Brandán², A. Rovea³, M. Boxler³, S. Rodríguez Grastorf³, J. Minteguaga³, C. Luna¹, J. Meriles⁴, y S. Vargas Gil¹

Introducción

La calidad del suelo es un indicador de la eficacia del manejo de los agroecosistemas. Uno de los parámetros para medir la calidad del suelo es su microbiota, y esto se debe a que la dinámica de las poblaciones microbianas puede describir la situación y tendencias de las condiciones del suelo en respuesta a las prácticas de manejo (Doran y Parkin, 1994; Vargas Gil et al., 2009). Dentro de las poblaciones de microorganismos, los hongos micorrícicos (HMA) tienen estrecha relación con la nutrición de las plantas, sobre todo en lo relacionado a la absorción de fósforo (P), ya que se establecen en simbiosis en el sistema radical, produciéndose un intercambio de solutos y agua. Debido a la presencia de micorrizas, las plantas aumentan la superficie de absorción de sus raíces, dado el gran volumen de suelo que es explorado por las hifas de estos hongos (Mosse y Phillips, 1971). Los HMA producen glomalina, que es una glicoproteína que se acumula en la pared celular de las hifas, que tiene como característica la adhesión de partículas del suelo, con materiales orgánicos que contienen carbono (C). Es decir que la presencia de glomalina, contribuye con la aglutinación del suelo, favorece la retención de C, y previene el flujo rápido de agua dentro de los aglomerados, siendo imprescindible en la formación, productividad y sostenibilidad del suelo así como en el almacenamiento del C. Por estas razones, la glomalina puede ser cuantificada para calcular la eficiencia de las prácticas culturales, en el almacenamiento de C (Wright y Upadhyaya, 1999). Debido a todas estas características, la glomalina puede ser empleada como indicador de los efectos del cambio en el uso del suelo.

Cuando se agregan fertilizantes al suelo ocurren una serie de complejas reacciones químicas y microbiológicas que no solo influyen el crecimiento y desarrollo de las plantas, sino también producen cambios a corto y largo plazo en las poblaciones de microorganismos del suelo.

Sin embargo, los reportes sobre estos cambios son inconsistentes, ya que en algunos casos la biomasa microbiana y su actividad fueron estimulados (Biederbeck et al., 1984), mientras que en otros casos los efectos fueron contrarios o nulos (Clegg, 2006). Es por eso que en este trabajo planteamos como objetivo analizar el efecto de la fertilización inorgánica sobre el contenido de glomalina del suelo, y la relación de esta proteína con otros bioindicadores microbianos, con parámetros químicos y físicos del suelo, y con el rendimiento del cultivo de maíz.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la campaña 2010/11 en un ensayo en el establecimiento Balducchi, ubicado en la localidad de Teodelina (Santa Fe), que forma parte de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (CREA-IPNI-ASP). En ese ensayo, bajo rotación maíz-trigo/soja, se evalúan, anualmente desde la campaña 2000/01, fertilizaciones con N, P, S y micronutrientes en las siguientes combinaciones: PS, NS, NP, NPS, NPS+Micronutrientes (**Tabla 1**), y Testigo (sin adición de fertilizante) en 3 repeticiones siguiendo un diseño en bloques completos al azar.

Hacia el final del ciclo del cultivo se tomaron muestras de suelo provenientes de los 5 primeros cm. De cada parcela se extrajeron seis muestras de suelo

Tabla 1. Dosis de fertilizantes agregados en maíz en los diferentes tratamientos de un ensayo de larga duración. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campaña 2010/11.

Nutrientes kg ha ⁻¹	Tratamientos					
	Testigo	PS	NS	NP	NPS	NPS + Micros
N	-	18	160	160	160	160
P	-	35	-	35	35	35
K	-	-	-	-	-	14
Mg	-	-	-	-	-	8
S	-	17	17	-	17	17
B	-	-	-	-	-	1
Zn	-	-	-	-	-	2
Cu	-	-	-	-	-	2

¹ Instituto de Patología Vegetal (IPAVE-INTA). Córdoba, Argentina. Correo electrónico: svargasgil@ciap.inta.gov.ar

² EEA Salta, INTA

³ Grupo CREA Región Sur de Santa Fe

⁴ Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV- CONICET), UNC

* Trabajo presentado en el XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16-20 de Abril de 2012, Mar del Plata, Argentina.

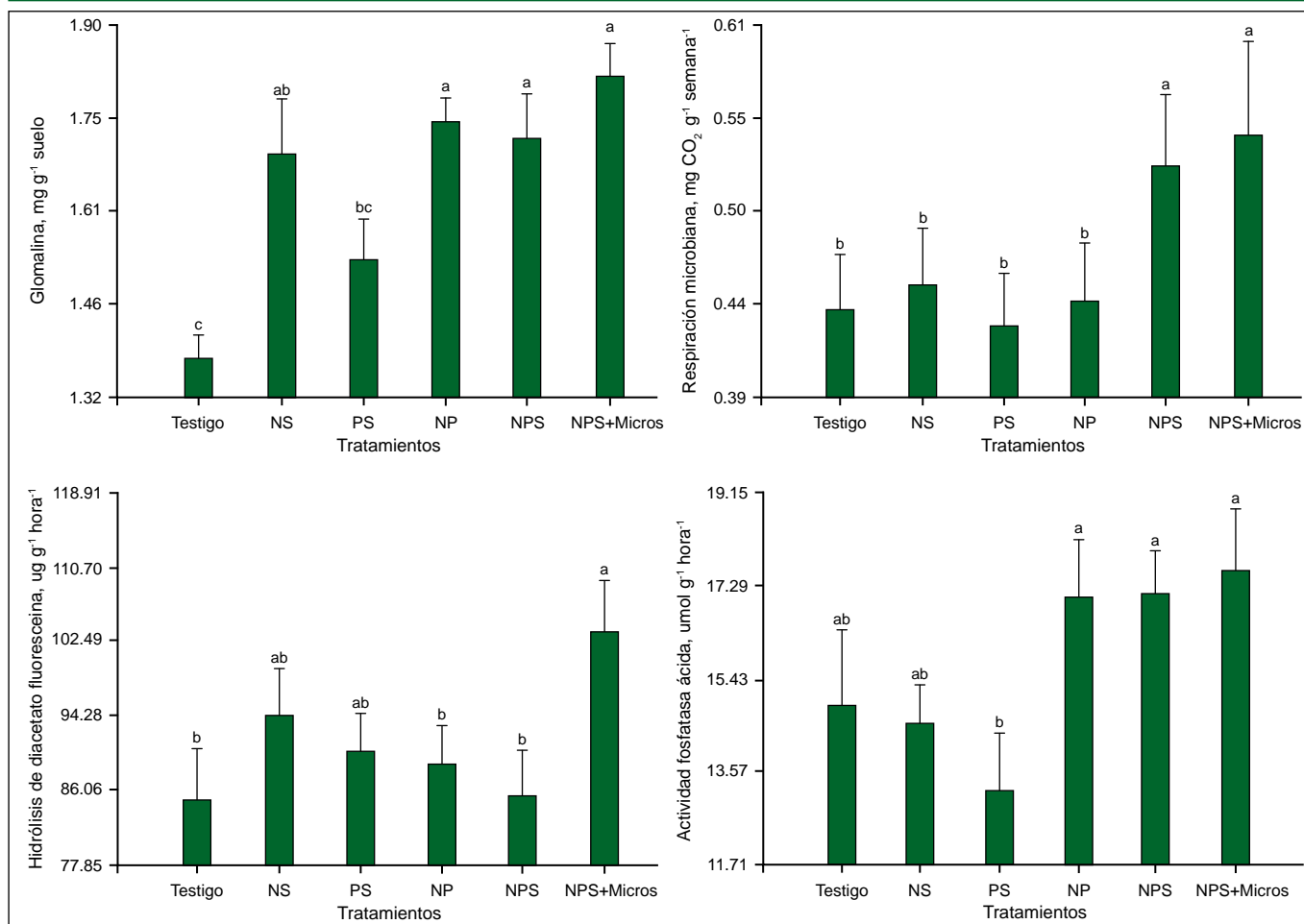


Figura 1. Efecto de la fertilización inorgánica sobre el contenido de glomalina del suelo, la respiración microbiana, la hidrólisis de diacetato de fluoresceína (FDA), y la actividad fosfatasa ácida, cuantificados en un ensayo ubicado en la localidad de Teodelina (Santa Fe). Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campaña 2010/11. Las barras con letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo al test LSD ($P \leq 0.05$).

compuestas, siguiendo un diseño en V. Los muestreos se efectuaron 15-20 días antes de la cosecha del cultivo. Las muestras fueron conservadas en frío hasta la posterior determinación de los siguientes parámetros:

- **Parámetros biológicos:** La cuantificación de glomalina fácilmente extractable se realizó según Wright y Upadhyaya (1996). Para la determinación de respiración microbiana, el carbono potencialmente mineralizable se cuantificó mediante la técnica de Alef (1995). La hidrólisis de diacetato de fluoresceína (FDA) se realizó según Adam y Duncan (2001). La cuantificación de la enzima deshidrogenasa se realizó según García et al. (1997), mientras que la fosfatasa ácida se cuantificó según Tabatabai y Bremner (1969).
- **Parámetros químicos:** Se determinaron los siguientes parámetros: contenido de C total (Black, 1965), N total por micro-Kjeldhal (Bremner, 1996), P extractable (Bray y Kurtz, 1945) y Azufre (Fontanive et al., 2004).
- **Parámetros físicos:** Se realizó la cuantificación de estabilidad de agregados por la técnica de los microtamices (Corvalán et al., 2000).

Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo mediante el empleo del programa InfoStat Profesional versión 2011 (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina). La normalidad de los datos se comprobó mediante el test de Shapiro-Wilks. Las diferencias entre tratamientos fueron determinadas mediante el uso del test de diferencias mínimas significativas (LSD). Además se utilizó el análisis de componentes principales (ACP) como herramienta del análisis multivariado, para determinar los parámetros de mayor influencia en la diferenciación de los tratamientos. Finalmente, se realizó un análisis de correlación para establecer la relación entre la glomalina y otros parámetros biológicos, químicos y físicos edáficos y el rendimiento de maíz, con $P \leq 0.05$.

Resultados y discusión

Según los resultados encontrados, el contenido de glomalina fue mayor en los tratamientos NP, NPS y NPS+Micros (**Figura 1**). En coincidencia con esto, la actividad microbiana también fue mayor en estos tratamientos. La respiración microbiana fue mayor en NPS y NPS+Micros, mientras que la FDA fue mayor en

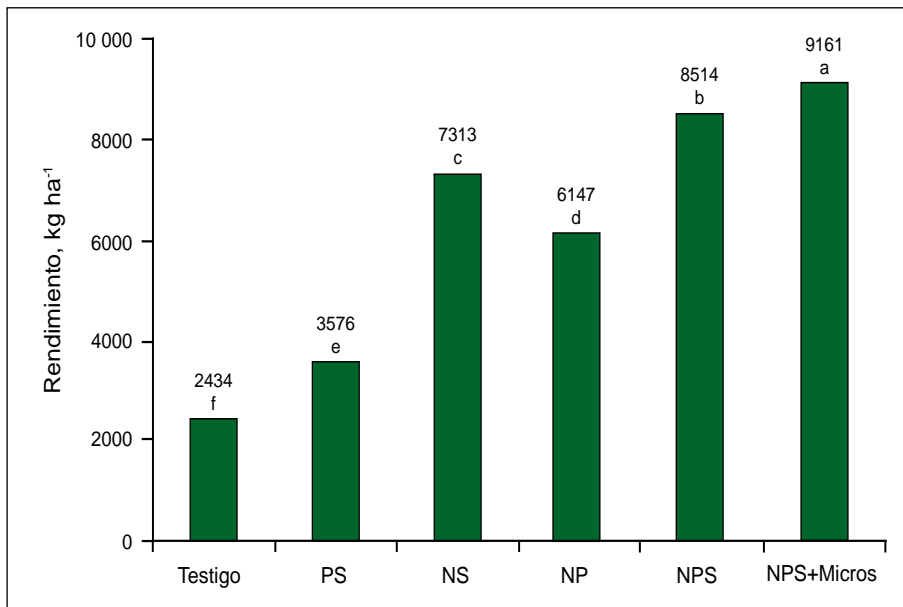


Figura 2. Efecto de la fertilización inorgánica sobre el rendimiento del cultivo de maíz, en un ensayo ubicado en la localidad de Teodelina (Santa Fe). Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Las barras con letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo al test LSD ($P \leq 0.05$).

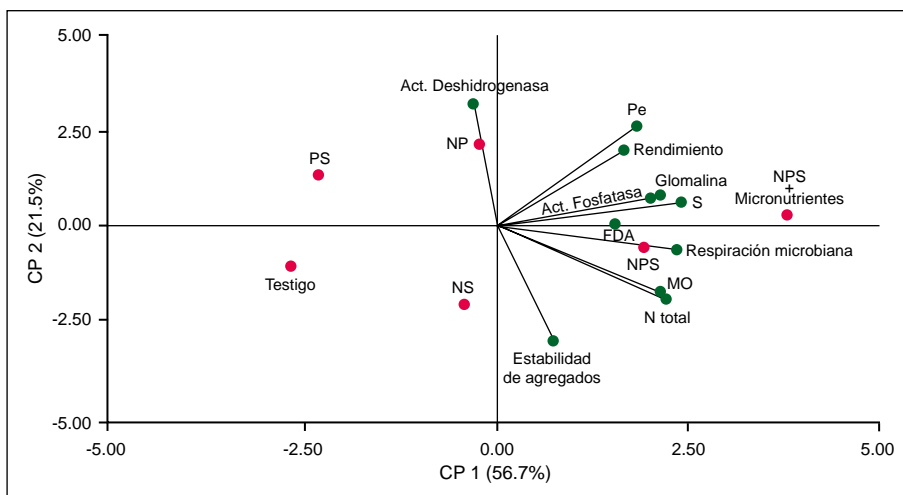


Figura 3. Biplot, análisis de componentes principales (ACP) de diferentes variables bajo distintos tratamientos de fertilización inorgánica en maíz. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. MO: Materia orgánica, FDA: Hidrólisis de diacetato de fluoresceína.

el tratamiento NPS+Micros, y finalmente, la actividad fosfatasa ácida fue mayor en los tratamientos NP, NPS y NPS+Micros. Por otra parte, el rendimiento del cultivo de maíz fue mayor en los tratamientos PS, NP, NPS, NPS+Micros (**Figura 2**).

Finalmente, según el ACP (**Figura 3**), los tratamientos se diferenciaron claramente de acuerdo al peso de las variables. El Componente 1 explicó 56.7% de la variabilidad de los datos, mientras que el Componente 2 explicó 21.5% de la varianza, explicando ambos 78.2% de la variabilidad total. Por otra parte, el contenido de glomalina, la respiración microbiana, y la actividad fosfatasa ácida son las variables biológicas que mayormente contribuyeron a diferenciar a los tratamientos NPS y NPS+Micros, del resto de los

tratamientos, a lo largo del eje 1. Mientras que, también a lo largo del eje 1, los tratamientos PS y Testigo se mostraron totalmente diferentes a NPS y NPS+Micros. Además, en los tratamientos NPS y NPS+Micros se registraron mayores valores de MO, N total y S, a lo largo del eje 1, contribuyendo a la diferenciación de los tratamientos.

Los coeficientes de correlación de Pearson (**Tabla 2**) mostraron que efectivamente hubo correlación positiva y significativa entre el contenido de glomalina del suelo y los restantes parámetros biológicos cuantificados, con los parámetros químicos y con la estabilidad de agregados y el rendimiento de maíz.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el contenido de la glomalina fue influenciado por los diferentes tratamientos de fertilización. El tratamiento NPS+Micros fue el que, en general, mostró mayor contenido de glomalina y mayor abundancia y actividad microbiana. Varios trabajos señalan los efectos positivos de la fertilización inorgánica sobre las poblaciones microbianas del suelo (Biederbeck et al., 1984; Buyanovsky y Wagner, 1987, Vargas Gil et al., 2009). Los autores afirman que en general, al mejorar la fertilidad del suelo aumenta el crecimiento de las plantas, con el consiguiente incremento en las rizodeposiciones liberadas por la raíz, aumentando así la diversidad microbiana y sus actividades. Esto explica el motivo

por el que el ACP mostró una clara diferenciación entre los tratamientos, con mayor biomasa microbiana en los tratamientos con fertilización balanceada. Según algunos autores (Wu et al., 2011), todavía no se conoce claramente el efecto de la fertilización química sobre los HMA. Otros trabajos muestran que se encontró mayor colonización radicular por HMA cuando se fertilizó repetidamente con P (Graham y Abbott, 2000), mientras que algunos autores mencionan que no encontraron respuesta alguna por parte de los HMA a la fertilización, a pesar de haber registrado cambios en la diversidad fúngica y bacteriana general del suelo (Beauregard et al., 2009).

Por su parte, los parámetros químicos también fueron influenciados por la fertilización inorgánica. En los

Tabla 2. Análisis de correlación del contenido de glomalina del suelo con otros parámetros biológicos del suelo, con parámetros químicos y físicos y con el rendimiento de maíz en un ensayo con diferentes tratamientos de fertilización.

Parámetros	Coefficientes de correlación de Pearson con el contenido de glomalina del suelo
Respiración microbiana, mg CO ₂ g ⁻¹ semana ⁻¹	0.37*
Hidrólisis de diacetato de fluoresceína, ug g ⁻¹ hora ⁻¹	0.17*
Actividad fosfatasa ácida, umol g ⁻¹ hora ⁻¹	0.21*
MO, %	0.36*
N total, %	0.38*
Pe, ppm	0.19*
S, %	0.39*
Estabilidad de agregados, %	0.15*
Rendimiento, kg ha ⁻¹	0.40*

* Significativo con $P \leq 0.05$

tratamientos sin fertilización (Testigo) se registraron menores contenidos de MO, N total, P y S, como muestra el ACP. Justamente algunos autores señalan que cuando el suelo es tratado con fertilizantes minerales, una serie de complejas reacciones tiene lugar en el sistema, influenciando el desarrollo de las plantas e induciendo varios cambios a corto y largo plazo en las variables químicas (Biederbeck et al., 1984).

Se registró una correlación significativa y positiva entre el contenido de glomalina del suelo y los demás parámetros biológicos que se cuantificaron, como también con los parámetros químicos, la estabilidad de agregados y el rendimiento de maíz (Tabla 2). Algunos autores (Wilson et al., 2009; Wu et al., 2011), también encontraron resultados similares. Estos investigadores afirman que el 80% del contenido de glomalina del suelo proviene de las hifas y esporas de los HMA, y que la fertilización mineral produce un incremento de las redes hifales, lo que aumenta indirectamente el contenido de glomalina del suelo. Rillig et al. (2002) y Wu et al., (2011) también encontraron correlación positiva entre la estabilidad de agregados del suelo y la concentración de glomalina. Sin embargo, en ninguno de los trabajos citados se cuantificó el rendimiento de los cultivos, y en consecuencia tampoco se hicieron correlaciones entre la productividad y la concentración de glomalina, como en este trabajo.

Conclusión

La concentración de glomalina en el suelo permite cuantificar la fertilidad del suelo, y puede ser empleada como un bio-indicador de la calidad edáfica en

respuesta a la fertilización química. Los tratamientos con nutrición más balanceada (N, P, S + Micronutrientes) produjeron un incremento de los parámetros biológicos, químicos y físicos del suelo. El contenido de glomalina tuvo una correlación positiva y significativa con los factores biológicos (respiración microbiana, hidrólisis de diacetato de fluoresceína y actividad fosfatasa ácida), con las variables químicas (MO, N total, Pe, S) y con la estabilidad de agregados y la productividad del cultivo de maíz.

Agradecimientos

El trabajo fue financiado por el Convenio de Vinculación Tecnológica INTA-CREA Sur de Santa Fe. Proyecto Específico (INTA) "Comunidades microbianas del suelo: Estructura y funciones en respuesta al manejo".

Bibliografía

- Adam, G., y H. Duncan. 2001. Development of a sensitive and rapid method for measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biol. Biochem.* 33:943-951.
- Alef, K. 1995. Soil respiration. En: Alef, K., Nanninperi, P. (Eds.). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. Harcourt Brace and Company publishers, London UK, pp. 214-219.
- Biederbeck, V.O., C.A. Campbell, y R.P. Zenter. 1984. Effect of crop rotation and fertilization on some biological properties of a loam in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 64:335-367.
- Black, C.A. 1965. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc., Publisher Madison, Wisconsin, pp. 770.
- Bremmer, J.M. 1996. Nitrogen-total. In: *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*. Sparks, DL (Ed.). Soil Sci. Soc. Am. Book series N° 5, pp. 1085-1128.
- Bray, R.H., y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of Phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Beauregard, M.S., C. Hamel, N. Atul, y M. St-Arnaud. 2009. Long term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not AM fungal community in alfalfa. *Microb. Ecol.* 59:379-389
- Buyanovsky, G.A., y G.H. Wagner. 1987. Carbon transfer in a winter wheat (*Triticum aestivum*) ecosystem. *Biol. Fert. Soil* 5: 76-82.

- Clegg, C. 2006. Impact of cattle grazing and inorganic fertilizer additions to managed grasslands on the microbial community composition of soils. *App. Soil Ecol.* 31:73-82.
- Corvalán, E.R., A. Franzoni, J. Huidobro, y J.L. Arzeno. 2000. In: *Actas del XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata. Método de microtamices para la determinación de la estabilidad de agregados del suelo, 1-2 mm. Comisión I - Panel 25.
- Doran, J.W., y T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran, JW, Coleman, DC, Bezdiceck, DF, Stewart, BA (Eds). *Defining soil quality for a sustainable environment*, vol.35. Madison,WI. Soil Sci. Soc. Amer. Special Publications. p.3-21.
- Fontanive, A., H. Jiménez, A. de la Horna, D. Efron, y L. Defrieri. 2004. Determinación de azufre inorgánico en suelos. Método turbidimétrico. En: *Sistemas de apoyo metodológico para Laboratorio de Análisis de suelo, agua, vegetales y enmiendas orgánicas*. SAGPyA. ISBN 987-9184-40-8
- García, C., M.T. Hernández, y F. Costa. 1997. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28:123-134.
- Graham, J.H., y L.K. Abbott. 2000. Wheat responses to aggressive and non-aggressive arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil* 220:207-218.
- Mosse, B., y J.M. Phillips. 1971. The influence of phosphate and other nutrients on the development of vesicular-arbuscular mycorrhiza in culture. *J. Gen. Microbiol.* 1971: 157-166.
- Rillig, M.C., S.F. Wright, y V.T. Eviner. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species. *Plant Soil* 238:325-333
- Tabatabai, M.A., y J.M. Bremner. 1969. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. García Izquierdo, C. (Ed.). Mundi-Prensa Libros, S.A. 1ª ed., 1ª imp.(09/2003), pp. 371.
- Vargas Gil, S., A. Becker, C. Oddino, M. Zuza, A. Marinelli, y G. March. 2009. Soil biological, chemical and physical responses to the impact of tillage intensity, fertilization, and cattle grazing in a long-term field trial. *Environ. Manag.* 44:378-376.
- Wright, S.F., y A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 161: 575-586.
- Wright, S.F., y A. Upadhyaya. 1999. Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi activity by the glomalin concentration on hyphal traps. *Mycorrhiza* 8:283-285.
- Wilson, G.W.T., C.W. Rice, M.C. Rillig, A. Springer, y D.C. Hartnett. 2009. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments. *Ecol Lett* 12:452-461.
- Wu, F., M. Dong, Y. Liu, X. Ma, L. An, J.P.W. Young, y H. Feng. 2011. Effects of long-term fertilization on AM fungal community structure and Glomalin-related soil protein in the Loess Plateau of China. *Plant Soil* 342:233-247.*

El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica: Estado actual y principales cambios en el tiempo

Juan Carlos Méndez¹ y Floria Bertsch¹

Introducción

El monitoreo y registro del estado de la fertilidad de los suelos es un aspecto de suma importancia en todo sistema de producción agrícola, ya que los rendimientos y por lo tanto, los beneficios que se puedan obtener de dicho sistema, dependen en gran medida de la capacidad que tenga el factor suelo para proveer a la planta de todos los nutrimentos necesarios para su óptimo crecimiento.

El análisis químico de la disponibilidad de nutrimentos es una de las herramientas más prácticas y accesibles con las que cuenta el profesional en agronomía, al momento de realizar un diagnóstico confiable del estado de la fertilidad de los suelos. Esta herramienta permite identificar y priorizar fácilmente las principales limitantes nutricionales que se presentan en un sitio en específico, y es una fuente de información importante que se debe conocer al momento de elaborar un plan de manejo nutricional de un determinado cultivo.

Además de la información brindada por el mismo análisis de suelo, el uso de bases de datos con los registros acumulados de este tipo de análisis es otro instrumento de gran valor en el estudio de la fertilidad de los suelos. Este conjunto de datos acumulados y ordenados sirven como un parámetro real para valorar los cambios que ocurren a través del tiempo dentro de un sistema de producción agrícola, como producto de las diferentes prácticas de manejo aplicadas y la variación natural del suelo.

La compilación de estas bases de datos en conjunto con un adecuado proceso de análisis e interpretación, permite generar mapas en los que se representa la frecuencia y distribución de los principales problemas referentes a la fertilidad de los suelos. De esta forma, es posible sintetizar la información proveniente de los miles de análisis de suelos realizados por un laboratorio de rutina para que sean disponibles de forma accesible y de fácil comprensión a un mayor grupo de usuarios.

En el presente trabajo se presenta un ejemplo del uso de una base de datos de análisis de suelos para obtener información valiosa acerca del estado de la fertilidad de los suelos agrícolas de un país, en este caso Costa Rica. Además, al tomar como referencia el trabajo previo realizado por Bertsch (1986), en el cual se empleó una metodología similar, es posible observar los principales cambios, a nivel general, que han ocurrido en el tiempo en las propiedades químicas del suelo.

La información que aquí se presenta constituye un resumen de los principales resultados de la reciente “*Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*” publicada a través de la Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo (Méndez y Bertsch 2012). Esta publicación se realizó en respuesta a la necesidad de contar con una herramienta de consulta y referencia acerca del tema de interpretación de análisis y del estado actual de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. También con esta publicación se pretende resaltar la importancia del manejo de datos a través de nuevas tecnologías que faciliten el acceso a la información, de manera que esté disponible para los diferentes actores del sector agro productivo.

Descripción del estudio

Compilación de la base de datos

Para la elaboración del presente estudio se utilizó como principal referencia metodológica el trabajo realizado por Bertsch en 1986 titulado “*Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica*”, el cual empleó un total de 13 765 registros de análisis de suelos del Laboratorio de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) realizados entre los años 1978-1980. En este nuevo trabajo se usó un total de 23 860 registros de análisis de suelos efectuados por el Laboratorio de Suelos y Foliaves del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (LSF/CIA-UCR) durante los años 2006-2010.

Además de la diferencia en la cantidad de datos utilizados, lo cual le confiere una mayor solidez al presente estudio, el manejo de los datos se hizo a través de software aplicado a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual permite manejar de manera más eficiente la información y representarla en mapas posteriormente.

Previo a la obtención de los 23 860 registros se debió realizar dos procesos para filtrar la información. En primera instancia se seleccionaron solo aquellos registros que:

- Pertenecieron a muestras de suelos agrícolas de Costa Rica, excluyendo aquellos análisis provenientes de muestras de otros países.
- Fueron realizados con las soluciones extractoras KCl 1N (para acidez, Ca y Mg intercambiables) y Olsen modificado (para K, P, Zn, Fe, Mn, Cu).

La razón por la que se decidió trabajar sólo con los análisis hechos mediante esta metodología es porque esta continúa siendo la más utilizada de manera

¹ Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: juancarlos.mendez@ucr.ac.cr

rutinaria en la mayoría de los laboratorios de análisis de suelos de Costa Rica, y es para la que se cuenta con mayor respaldo de estudios de correlación y calibración en el país. Además, fue con estas soluciones extractoras con las que había sido realizado el trabajo previo de Bertsch (1986).

En un segundo proceso de selección, se procedió a la revisión detallada de cada registro y se excluyeron:

- Los análisis en los cuales no se identificó de forma precisa la procedencia de la muestra.
- Los análisis que provinieran de ensayos o pruebas de campo.
- Los registros que fueron identificados como pertenecientes a estratos inferiores al horizonte superficial del suelo (profundidades mayores a 20 cm), esto con el fin de homogenizar de la mejor manera posible toda la información. Una vez filtrada la información con estos criterios, los registros se ordenaron y clasificaron según el cantón de procedencia, de acuerdo con la división administrativa de las provincias en Costa Rica.

Se debe señalar que los resultados obtenidos por medio de este estudio reflejan únicamente la condición de los suelos que se encuentran bajo algún tipo de actividad agrícola, razón por la cual se deben excluir las zonas

correspondientes a las áreas protegidas y de conservación, que representan alrededor del 25% del territorio total de Costa Rica y las principales zonas urbanas ubicadas especialmente en la región central del país.

Representación de la información

El análisis de la información se realizó con ayuda de hojas de cálculo programadas para determinar el porcentaje de las muestras (cálculo de frecuencias) pertenecientes a las categorías alta, media y baja definidas para las variables estudiadas (**Tabla 1**) en cada uno de los cantones de Costa Rica.

En la "Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica" la información es presentada de tres maneras:

1. **Mapas a nivel cantonal** en los cuales es posible separar las regiones que presentan o no problemas edáficos, ubicar geográficamente la distribución de dichos problemas, valorar la importancia nacional y regional de los problemas, y realizar comparaciones visuales entre las diferentes características estudiadas. Para todas las variables (excepto el P que contó con cuatro clases debido a la alta frecuencia con que se presentan deficiencias en los suelos) se establecieron tres clases para realizar dicha representación. Las categorías establecidas fueron:

Tabla 1. Niveles críticos generales y condiciones medias, altas y anormales para interpretar los análisis de fertilidad de suelos. (Valores resaltados en rojo representan niveles que pueden ser problemáticos según cada variable).

Característica*	Unidades	Categoría			
		Nivel crítico	Media	Alta	Anormal
Parámetros de acidez	pH en agua	< 5.5	5.6 - 6.5	> 6.5	-
	Acidez	cmol(+) l ⁻¹	< 0.5	0.5 - 1.5	> 1.5
	Saturación acidez	%	< 10	10 - 50	> 50
	Suma de bases	cmol(+) l ⁻¹	< 5	5 - 25	> 25
CICE y bases	CICE	cmol(+) l ⁻¹	< 5	5 - 25	> 25
	Ca	cmol(+) l ⁻¹	< 4	4 - 20	> 20
	Mg	cmol(+) l ⁻¹	< 1	1 - 5	> 5
	K	cmol(+) l ⁻¹	< 0.2	0.2 - 0.6	> 0.6
Relaciones catiónicas	Ca/Mg	< 2	2 - 5	> 5	-
	Ca/K	< 5	5 - 25	> 25	-
	Ca+Mg/K	< 10	10 - 40	> 40	-
	Mg/K	< 2.5	2.5 - 15	> 15	-
P y micro-nutrientes	P	mg l ⁻¹	< 10	10 - 20	> 20
	Zn	mg l ⁻¹	< 2	2 - 10	> 10
	Mn	mg l ⁻¹	< 5	5 - 50	> 50
	Fe	mg l ⁻¹	< 10	10 - 100	> 100
	Cu	mg l ⁻¹	< 2	2 - 20	> 20

* pH obtenido de muestra con relación agua:suelo de 1:2.5; Acidez, Ca y Mg extraídos con KCl 1N, 1:10; K, P, Mn, Zn, Cu, Fe extraídos con Olsen Modificado, 1:10. Adaptado por Bertsch (2003), a partir de informaciones generadas en el MAG (Cordero y Miner, 1975), en el CATIE (Díaz-Romeu y Hunter, 1978), y en la UCR (Bertsch, 1986; Cabalceta, 1993; Gadea, 1993; Molina, 1993).

- Cantones con menos de 25% de frecuencia de muestras con problemas (verde).
- Cantones entre 25 y 50% de frecuencia de muestras con problemas (amarillo).
- Cantones con más de 50% de frecuencia de muestras con problemas (rojo).

Para la elaboración de los mapas se tomó como referencia la capa de cantones del Atlas Digital de Costa Rica 2008 elaborado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), a la cual por medio de un programa de SIG (Quantum GIS, versión 1.8), se le anexó la base de datos compilada.

2. Cuadros resumen en los que se detalla, para las principales variables, el porcentaje de muestras de cada cantón que presentan problemas frecuentes, organizados en dos categorías:

- Cantones entre 25 y 50% de frecuencia de muestras con problemas.
- Cantones con más de 50% de frecuencia de muestras con problemas.

3. Cuadros detallados por cantón donde se encuentra la información organizada por provincia y cantón y se incluyen todas las variables analizadas en el estudio. La información representada por medio de estos cuadros permite distinguir y priorizar las principales limitantes de un cantón determinado, al tiempo que ofrece la posibilidad de consultar el porcentaje exacto de muestras en cada categoría (baja, media, alta) según se detalla en la **Tabla 1**.

Sin embargo, para efectos del presente resumen, la representación de resultados se limitará únicamente a la forma gráfica (mapas) y a las variables de acidez y P

disponible en Olsen modificado, con el fin de resaltar la manera en que una sólida base de datos permite identificar las principales limitantes nutricionales y su distribución geográfica, así como los cambios ocurridos en el tiempo.

Distribución de los problemas de acidez en los suelos de Costa Rica

Los problemas de acidez son una de las principales limitantes que se presentan en los suelos de las zonas tropicales. Esta característica influye de manera significativa en las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, las cuales pueden afectar directamente los rendimientos de los cultivos. Un adecuado diagnóstico de los problemas de acidez debe ser realizado a través del estudio integral de varios parámetros o índices suministrados en los análisis de suelos [pH, acidez intercambiable, % de saturación de acidez (%SA), suma de bases] con el fin de determinar tanto la severidad como la causa del problema.

Según los resultados de este estudio, en Costa Rica más de la mitad de los registros (53%) presentan valores de pH en agua por debajo del nivel crítico (5.5) y 90% de los datos estuvieron en un rango que va desde 4.4 hasta 6.7; por lo que encontrar valores de pH por fuera de ese ámbito es poco común en Costa Rica. En el caso de la acidez intercambiable, 37% de los datos presentaron valores por encima de 0.5 cmol(+) l⁻¹, de los cuales apenas el 10% contempla valores por encima de 2 cmol(+) l⁻¹, lo que indica que los problemas severos por toxicidad de Al³⁺ no son muy frecuentes en el país. Únicamente 27% de las muestras presentaron valores de %SA mayores a 10%, y 22% aparecieron con una suma de bases por debajo de 5 cmol(+) l⁻¹.

En las **Figuras 1 y 2** se muestra la distribución de las regiones que presentan los mayores problemas de acidez, de acuerdo con los parámetros pH y acidez intercambiable respectivamente. Un aspecto importante de mencionar, es que en muchas regiones donde la frecuencia de problemas por acidez intercambiable o %SA no es muy alta, sí es posible observar una frecuencia elevada de muestras con pH bajo. Entre las causas de esas diferencias se puede mencionar la gran abundancia de suelos volcánicos con cargas variables, en los cuales la acidez se debe a los iones H⁺ disociados de la materia orgánica y no necesariamente a la acidez generada por el Al³⁺. También, el manejo intensivo de la fertilización nitrogenada amoniacal sin un aumento paralelo de su neutralización, puede causar que se acentúe esta situación.

En el caso de la acidez intercambiable, las regiones que registran los mayores problemas coinciden con aquellas en donde se encuentran los Ultisoles. También se observan problemas con este parámetro en suelos aluviales, en ambas

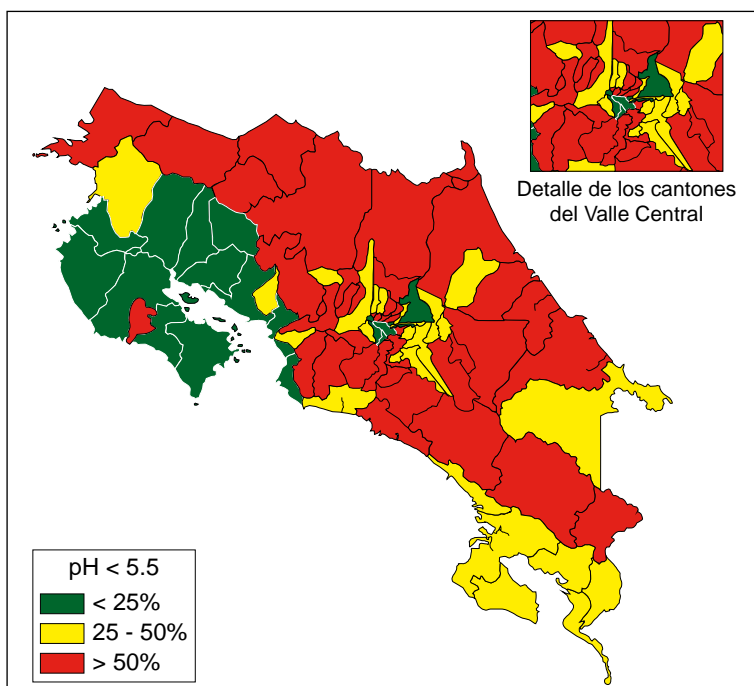


Figura 1. Porcentaje de muestras con problemas de bajo pH (< 5.5) en los cantones de Costa Rica. Fuente: Méndez y Bertsch (2012).

costas del país, dedicados a monocultivos altamente tecnificados en el manejo nutricional; sin embargo, debido al alto contenido de bases intercambiables que tienen estos suelos, los problemas por altos %SA no son tan frecuentes.

Distribución de los problemas de fósforo en los suelos de Costa Rica

El P es un elemento altamente deficiente en los suelos tropicales, no sólo por el bajo contenido natural de P que poseen estos suelos, sino también por la gran diversidad

de interacciones en el sistema que sufre el P de los fertilizantes aplicados y que tienden a estabilizarlo. Según sea el tipo de suelo que se trate, el P puede estar poco disponible para las plantas debido a las diferentes reacciones mediante las cuales se adsorbe o se retiene. Valores de pH bajos favorecen la formación de fosfatos de Fe y Al insolubles, mientras que valores mayores (más básicos) favorecen la formación de fosfatos de Ca. También, ante la presencia de sistemas coloidales amorfos, como los alofánicos las reacciones que sufre el P son fuertemente estabilizadoras.

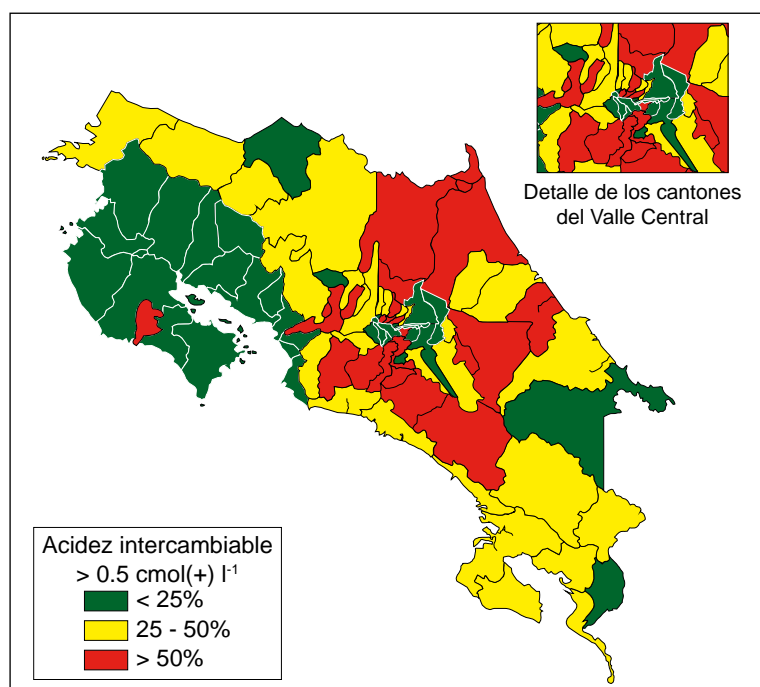


Figura 2. Porcentaje de muestras con problemas de acidez intercambiable (> 0.5 cmol(+) l⁻¹) en los cantones de Costa Rica. Fuente: Méndez y Bertsch (2012).

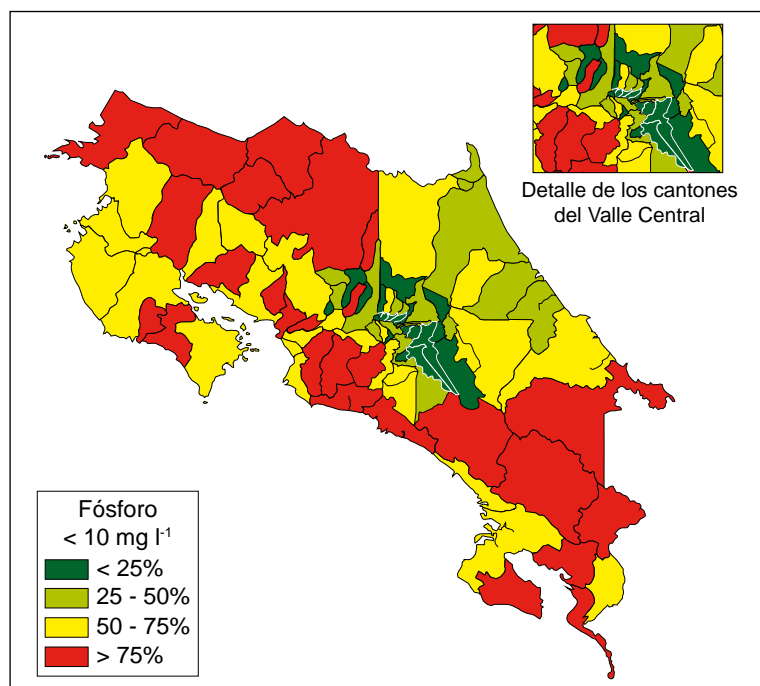


Figura 3. Porcentaje de muestras con problemas de fósforo (< 10 mg l⁻¹) en los cantones de Costa Rica. Fuente: Méndez y Bertsch (2012).

Para determinar la disponibilidad de P en el suelo, se dispone de una gran cantidad de metodologías de extracción. En Costa Rica, la metodología empleada con mayor frecuencia es la que utiliza la solución Olsen modificado y el nivel crítico general es de 10 mg l⁻¹.

En los suelos de Costa Rica el P es el elemento mineral que con mayor frecuencia se encuentra limitante (58% de las muestras), superado únicamente por la baja disponibilidad de nitrógeno (N), que no es parte de este estudio. De acuerdo con los resultados de esta investigación, un porcentaje importante de muestras presentan niveles de P extremadamente bajos, encontrándose que a nivel nacional 4 de cada 10 análisis registran P por debajo de 5 mg l⁻¹. Esta situación es especialmente marcada en algunas regiones del norte del país, en donde inclusive la severidad del problema es tal, que en ocasiones más del 60% de las muestras presentaron valores menores a 2 mg l⁻¹ de P disponible en Olsen modificado.

En Costa Rica se pueden distinguir tres zonas bien diferenciadas donde se presenta con mayor frecuencia problemas con bajo P (**Figura 3**):

- La región noroeste del país.
- La región del Pacífico central y sur, las cuales presentan más de 75% de las muestras deficientes en P y coinciden con las regiones donde hay un predominio de Ultisoles, caracterizados por su bajo contenido natural de P disponible y por una alta capacidad de fijación de este elemento en forma de óxidos de Fe y Al.
- La región correspondiente a los cantones cercanos a la Península de Nicoya y el Pacífico central donde la baja disponibilidad de P está asociada principalmente a los altos contenidos de Ca, y a la consecuente formación de fosfatos cálcicos.

Por otro lado, únicamente en la Región central del país y parte de la Región atlántica es donde se encuentran los menores porcentajes de muestras con problemas de P (menos del 25%). Esto podría asociarse al incremento en la fertilización fosforada que se ha dado en estas zonas de plantaciones manejadas bajo un sistema

intensivo, como lo es en cultivos de hortalizas (Región central) y ornamentales, palmito, frutas, y raíces y tubérculos (Región atlántica).

Es interesante notar que en las áreas de suelos derivados de cenizas volcánicas, en donde la fijación de P por alofana es más fuerte, la tendencia a subsanar esta situación mediante el uso de fertilizantes coincide enormemente con la presencia actual de niveles altos de P.

Síntesis del estado actual de la fertilidad de los suelos de Costa Rica

En la **Figura 4**, siguiendo el orden de mayor a menor frecuencia en el porcentaje de muestras con valores considerados problemáticos en las principales características químicas del suelo, se sintetiza el estado actual de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. En resumen, el P es la limitante más común en los suelos agrícolas de Costa Rica con un 58% de las muestras con valores inferiores a 10 mg l^{-1} .

Los problemas de acidez, reflejados tanto por bajo pH (53% de las muestras por debajo de 5.5) como por alta acidez intercambiable [37% de los registros con valores mayores a $0.5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$] son los que se presentan después del P, como la limitante con mayor frecuencia en los suelos de Costa Rica. Debido a la influencia de estas variables en la disponibilidad de los otros elementos, y en el crecimiento en general de la raíces, son, por lo tanto, las que se deberían corregir primero por medio de enmiendas antes de realizar cualquier otra práctica de manejo. En el caso del %SA únicamente 28% de los registros presentan valores mayores a 10%.

Contenidos de Zn por debajo de 2 mg l^{-1} (nivel crítico general en los suelos de Costa Rica) se presentan en 30% de las muestras, lo cual lo convierte en el micronutriente, dentro de los contemplados en este estudio, que con mayor frecuencia se presenta como una limitante en los suelos del país.

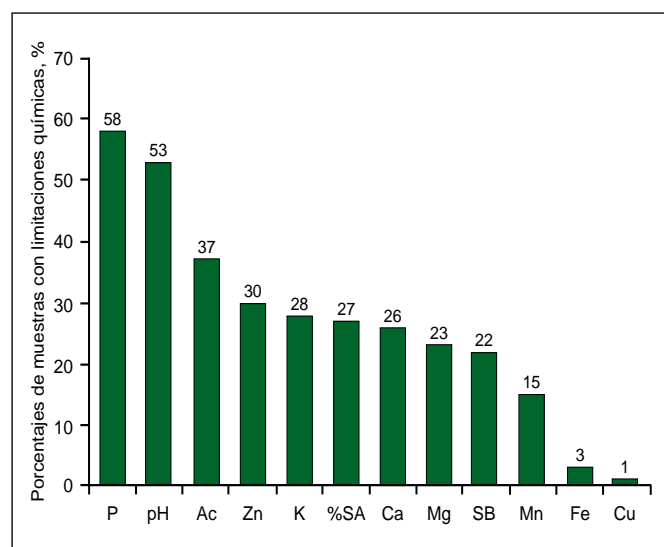


Figura 4. Porcentaje de muestras con limitaciones químicas (deficiencia de elementos, pH o acidez inadecuados) de los suelos agrícolas de Costa Rica.

El K es el catión intercambiable que con mayor frecuencia se reporta en los análisis de suelo por debajo de su nivel crítico, con un 28% de frecuencia. Bajos contenidos de Ca y Mg se presentan solo en 26 y 23% de las muestras de suelos respectivamente, con lo cual se refleja la similitud en el comportamiento a nivel de suelo de estos dos cationes, ya que en muchas regiones donde se presentan problemas de Ca también hay deficiencia de Mg.

Al evaluar la fertilidad de los suelos por medio de la suma de bases intercambiables ($SB = Ca + Mg + K$) se tiene que el 22% de los suelos presentan una fertilidad baja, al tener valores menores de $5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ en este parámetro.

Con los demás elementos, solo el 15% de las muestras presentan niveles de Mn disponible menores a 5 mg l^{-1} , y por último, los bajos contenidos de Fe y Cu se presentan solo en 3 y 1% de las muestras, respectivamente, lo cual indica que la deficiencia de estos microelementos no representan una limitante importante en los suelos de Costa Rica.

Cambios en la fertilidad de los suelos de Costa Rica entre 1986 y 2012

Según lo señalado anteriormente, otra utilidad que tiene el hacer uso de las bases de datos con los registros de los análisis de suelos realizados por un laboratorio de rutina es la posibilidad de establecer comparaciones en el tiempo entre diferentes series de datos y así determinar si han existido cambios importantes en las diferentes propiedades químicas de los suelos.

Al comparar el estudio publicado por Bertsch (1986) con los resultados obtenidos en este estudio, es posible establecer que, algunos de los cambios más importantes que el manejo agronómico de las plantaciones agrícolas de Costa Rica han ocasionado sobre las propiedades nutricionales de los suelos aquí analizadas, son los siguientes:

Disminución de problemas de P

Este elemento sigue siendo el más problemático por su compleja dinámica que tiende a pasar los productos aplicados a formas precipitadas, sin embargo su incidencia ha bajado. De una frecuencia de 74% de muestras con menos de 10 mg l^{-1} en 1986, en el 2012 ese valor se redujo al 58%. Esta situación podría asociarse al incremento de plantaciones manejadas bajo un sistema intensivo de fertilización fosforada en cultivos como ornamentales, palmito, frutas, y raíces y tubérculos, las cuales aumentaron sus áreas de siembra después de que se realizó el primer estudio.

Nótese en la **Figura 5**, la mayor cantidad de cantones verdes y amarillos (con menor problema) en el 2012, en comparación con 1986, en donde prácticamente todo el país presentaba colores rojos y amarillos, indicadores de mayor frecuencia de problemas de P.

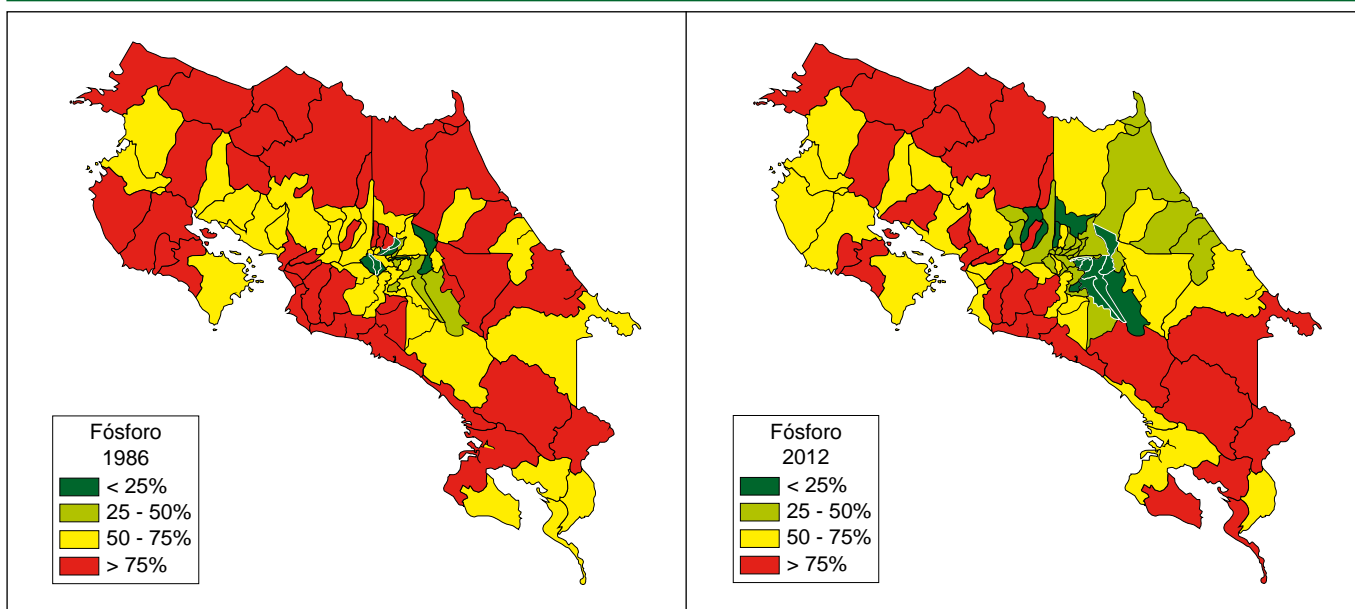


Figura 5. Comparación de la distribución de los problemas de P (< de 10 mg l⁻¹) entre 1986 y 2012.

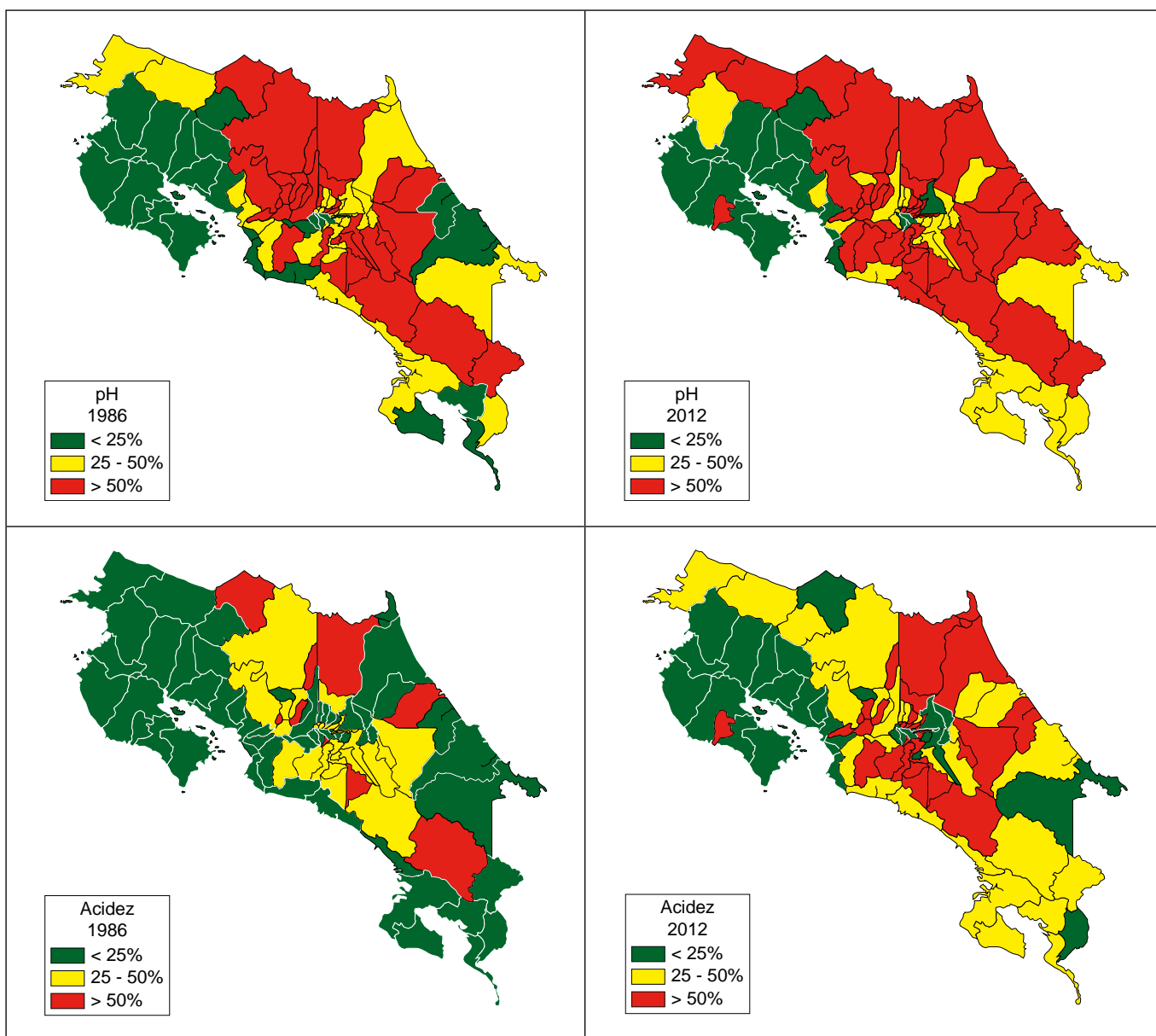


Figura 6. Comparación de la distribución de los problemas de pH (< 5.5) y acidez intercambiable (> 0.5 cmol(+) l⁻¹) entre 1986 y 2012

Aumento de problemas de acidez

Contrario a lo encontrado por Bertsch (1986), la cual mencionaba que en Costa Rica los bajos niveles de bases eran una limitante más frecuente que la acidez por sí misma, en la actualidad es posible observar que los problemas de acidez superan en frecuencia a los bajos niveles de bases, convirtiéndolos en este sentido en una mayor limitante que la baja cantidad de cationes intercambiables.

Mientras que en el año 1986 el 43% de las muestras presentaba valores de pH por debajo del nivel crítico (5.5), en la actualidad ese valor se incrementó a 53%. Además ocurrió un incremento sustancial en la cantidad de muestras con problemas por alta acidez intercambiable (valores mayores a $0.5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$) pasando de una frecuencia de 20% en 1986 a 37% en 2012.

El aumento en la cantidad de suelos con problemas por bajos pH, puede ser provocado por el uso reiterado e intensivo de fertilizantes nitrogenados amoniacales, que liberan iones H^+ , producto del proceso de hidrólisis del amonio en el suelo. En adición a lo anterior, no se debe obviar el hecho de que hubo un aumento significativo en la cantidad de muestras provenientes de algunas nuevas regiones de cultivo, probablemente de características más ácidas que las usadas en el pasado.

Los cantones con mayores problemas de acidez están asociados generalmente con el cultivo del café, lo cual hace suponer que algunas prácticas de manejo realizadas en esta actividad estén contribuyendo con esta tendencia acidificante. Por el contrario, cuatro cantones netamente hortícolas, que en 1986 se reportaban con problemas frecuentes de acidez, en el 2012 ya no los presentan, lo cual permite inferir que se ha mejorado el manejo de la acidez en estos cultivos.

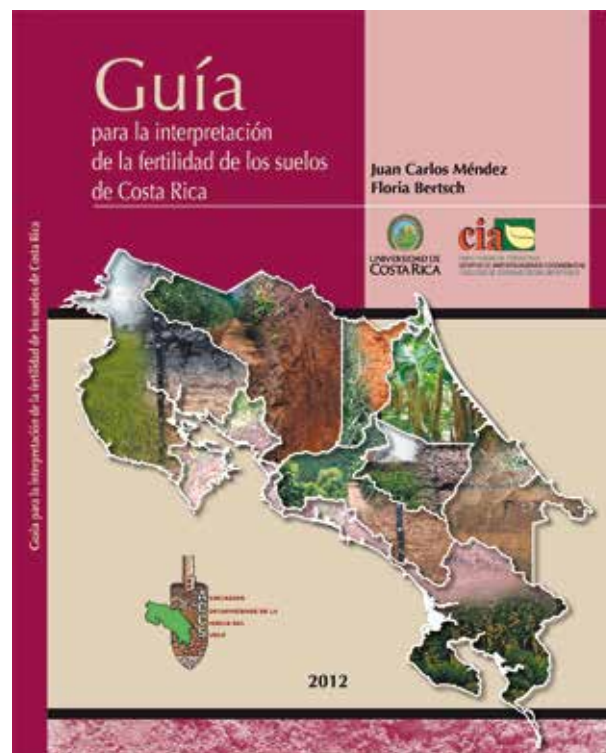
Un mayor número de cantones con colores rojos y amarillos en la **Figura 6**, en los mapas del estudio del 2012, demuestran el incremento en la frecuencia de los problemas de acidez.

Conclusiones

La recopilación de la información proveniente de los análisis efectuados por un laboratorio de rutina, constituyó una herramienta útil para identificar los principales problemas de fertilidad en los suelos de Costa Rica, al tiempo que permitió visualizar los principales cambios ocurridos en el tiempo. Adicionalmente, el ordenamiento sistemático de dicha información sirvió como base para la elaboración de los mapas que muestran la distribución de las principales limitantes de fertilidad de los suelos en el territorio costarricense, logrando así que la información proveniente de miles de análisis esté disponible de una forma comprensible y accesible a diversas personas.

Bibliografía

- Bertsch, F. 1986. Manual para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 81 p.
- Bertsch, F. 2003. Fortalezas y debilidades del análisis de suelos como herramienta de diagnóstico en la nutrición de los cultivos. ACCS, CIA, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 8 p.
- Cabalceta, G. 1993. Niveles críticos de fósforo, azufre y correlación de soluciones extractoras en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles, y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 186 p.
- Cordero, A., y G. Miner. 1975. A calibration program for corn and rice fertilization and soil test data in Costa Rica, pp. 518-531. In: E. Bornemisza y A. Alvarado (eds). Soil Management in Tropical America. Raleigh, North Carolina State University.
- Díaz-Romeu, R., y A. Hunter. 1978. Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. CATIE. Turrialba, Costa Rica, 62 p.
- Gadea, A. 1993. Niveles críticos de calcio, magnesio y potasio en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. Tesis de maestría. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 135 p.
- Méndez, J.C., y F. Bertsch. 2012. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica 108 p.
- Molina, E. 1993. Calibración de métodos de análisis de cobre, zinc y manganeso disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 146 p.*



Nota: La *Guía para la Interpretación de la Fertilidad de Suelos de Costa Rica*, puede ser adquirida en la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (<http://www.suelos.ucr.ac.cr/htdocs/accs/>) email: accs.cia@ucr.ac.cr

Reporte de Investigación Reciente

Respuestas de cultivos y disponibilidad de azufre en suelos con diferentes contenido de arcilla y materia orgánica sometidos a fertilización azufrada

Tiecher, T., D.R. Santos, J.W. Rasche, G. Brunetto, F.J. Mallmann, y R. Piccin. 2012. Crop responses and sulfur availability in soils with different contents of clay and organic matter submitted to sulfate fertilization. Bragantia [online]. 71(4): 518-527. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052013005000010>

Los suelos con bajos niveles de arcilla y materia orgánica con frecuencia han mostrado poca disponibilidad de azufre (S). Por lo tanto, se espera aumentos en el rendimiento de las cosechas mediante fertilización azufrada. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de los cultivos y la disponibilidad de S en suelos con diferentes contenidos de arcilla y materia orgánica sometida a fertilización azufrada. El experimento se llevó a cabo en macetas en invernadero durante el periodo entre agosto del 2004 hasta enero del 2008. Nueve cultivos sucesivos se sembraron en cuatro clases de suelos, sometidos a la aplicación de cuatro niveles de S. Se evaluó la producción de materia seca y la acumulación de S en el follaje. Se recogieron muestras de suelo de las capas de suelo de 0-10 cm y 10-20 cm para cuantificar la cantidad de S disponible. Sólo en la primera cosecha de maíz y avena negra se aumentaron los rendimientos de materia seca debido a la fertilización sulfatada. Por lo demás, no hubo ninguna relación entre el aumento de los rendimientos de maíz y los niveles disponibles de S de la capa de suelo de 0-10 cm en suelos arenosos. Incluso cuando el contenido de S disponible en la capa de suelo de 0-10 cm fue inferior a los niveles críticos, no se observaron respuestas de fertilización sulfatada cuando se sembró girasol, frijol, soya y ricino. La cantidad de S acumulada en el follaje y el nivel de S disponibles aumentó debido a la fertilización sulfatada. Una gran cantidad de sulfato migró a la capa de suelo entre 10-20 cm, especialmente en suelos arenosos, y por lo tanto, el diagnóstico de la disponibilidad de S debe hacerse en las capas del subsuelo.

Fertilización NPK y tamaño de tubérculo semilla en el crecimiento, rendimiento y rentabilidad de las plantas de papa

Queiroz, L.R., J. Kawakami, M.L. Muller, I.C. Oliari, R.C. Umburanas y V. Eschemback. 2013. NPK fertilization and potato tuber seed size on growth, yield and profitability of potato plants. Hortic. Bras. [online]. 31(1):119-127. ISSN 0102-0536. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362013000100019>

Los cultivos de papa necesitan grandes inversiones para su establecimiento. Entre los insumos responsables de los altos costos del cultivo, se destacan los fertilizantes y las semillas. Se identificó el efecto de las dosis de fertilizantes y el tamaño de la semilla del tubérculo en el crecimiento, el rendimiento y la rentabilidad del cultivo de papa. El experimento se realizó en un campo de papa comercial en Guarapuava, estado de Paraná, Brasil, a partir de diciembre de 2010. Los tratamientos fueron de 0, 2, 4 y 6 t ha⁻¹ de fertilizante mineral (parcela principal) y las semillas de papa de tipo I y III (sub parcela), dispuestos en un diseño de parcelas divididas con tres bloques. Las características analizadas fueron: longitud del tallo principal, número de tallos, índice de área foliar, peso fresco y número de tubérculos a los 24, 41 y 57 días después de la emergencia, y el rendimiento comercial, número de tubérculos y dosis técnicas y económicas máximas de fertilizantes a la cosecha. No hubo interacción significativa entre las dosis de fertilizantes y de semillas de papa de tamaño del tubérculo para cualquier característica analizada. Las dosis de fertilizantes influyeron todas las características de las plantas analizadas, donde, en general, la dosis más alta dio lugar a valores más altos de las características. Sin embargo, la dosis de fertilizantes tuvo bajo efecto sobre el número de tallos, que fue la característica más influenciada por el tamaño de la semilla, la que era mayor en las plantas de tipo de semilla I. El tamaño de tubérculo de semillas no influyen en el rendimiento de tubérculo. El rendimiento de tubérculos aumentó con dosis crecientes de fertilizantes hasta la dosis de 4.2 t ha⁻¹, pero la máxima eficiencia económica se logró con 3.5 t ha⁻¹ de fertilizante. Se concluye, por lo tanto, que el uso de 3.5 t ha⁻¹ de fertilizantes y de semilla de papa de tipo III, dio como resultado la mejor opción económica para los productores.



SEGUNDA IMPRESIÓN

Arroz: Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes

Manual y Guía de Campo

Luego de haberse agotado completamente la primera impresión de estas excelentes publicaciones, el IPNI-NLA tiene el agrado de anunciar una segunda impresión.

Estas publicaciones presentan información que permite desarrollar estrategias de manejo nutricional del arroz. Se presenta una discusión detallada, en lenguaje simple, de la información básica de la función de los nutrientes y las posibles causas de las deficiencias; de las formas de estimar la remoción de nutrientes; de la medida del aporte de nutrientes nativos del suelo y en las fuentes externas como los fertilizantes. Con esta información, es posible diseñar las recomendaciones de fertilización para los agricultores en cada zona particular.

En la mayoría de las regiones tropicales y subtropicales las fincas de arroz son pequeñas, los nutrientes se manejan a mano y los agricultores no tienen acceso a formas especializadas de manejo de nutrientes, como el análisis de suelos y el foliar, que demandan más recursos. Por esta razón, en estas publicaciones se describe una nueva estrategia para calcular las recomendaciones de N, P y K, mediante el denominado Manejo de Nutrientes por Sitio Específico (MNSE).

Los conceptos de MNSE se han desarrollado como una alternativa al uso de las recomendaciones generales de fertilización en áreas grandes. Estas nuevas técnicas buscan una mayor eficiencia del uso de los fertilizantes a través de la fertilización balanceada y sitio-específica. La fertilización balanceada incrementa la rentabilidad de los agricultores, resulta en mayores rendimientos por unidad de fertilizante aplicado y protege el ambiente evitando el excesivo uso de fertilizantes, particularmente nitrógeno. Las estrategias de MNSE se han evaluado exitosamente en un amplio rango de lotes de agricultores en Asia y están listas para validación y adaptación a más amplia escala en otras áreas del mundo.

El Manual (212 páginas, en 5 capítulos más un apéndice) contiene una discusión amplia y profunda de todos los factores de manejo relacionados con la nutrición, mientras que la Guía de Campo contiene una discusión concisa y muy práctica de los mismo conceptos, sin embargo, por su tamaño puede transportarse fácilmente al campo como herramienta de apoyo.

Para más información contactar al IPNI:

Teléfono : (593) 2246 3175

E-mail : aormaza@ipni.net

Web : <http://nla.ipni.net>



Cursos y Simposios

1. Simposio Fertilidad 2013

Organiza : IPNI - FERTILIAR Asociación Civil
Lugar : Rosario, Argentina
Fecha : Mayo, 22-23, 2013
Información : IPNI Cono Sur
<http://Lacs.ipni.net>
www.fertilizar.org.ar

2. V Simpósio Regional IPNI Brasil sobre Mejores Prácticas para el Uso Eficiente de Fertilizantes

Organiza : IPNI - Brasil
Lugar : Río Verde GO, Brasil
Fecha : Mayo, 28-29, 2013
Información : IPNI - Brasil
elavorenti@ipni.net
<http://brasil.ipni.net>

3. XVII Congreso Internacional de Conservación del Suelo

Organiza : ISCO
Lugar : Medellín, Colombia
Fecha : Julio, 4-15, 2013
Información : ISCO
scsuelo@cable.net.co
www.unalmed.edu.co

4. InfoAg Conference 2013

Organiza : IPNI
Lugar : Springfield, Illinois, EE.UU.
Fecha : Julio, 16-18, 2013
Información : registration@infoag.org
www.infoag.org

5. XXXIV Congresso Brasileiro de la Ciencia del Suelo

Organiza : SBCS
Lugar : Florianópolis - Brasil
Fecha : Julio, 28 - Agosto 2, 2013
Información : SBCS
secretariabcs2013@eventossilos.org.br
www.sbcs.org.br/cbcs

6. Simposio Latinoamericano de Canola

Organiza : EMBRAPA TRIGO - ABRASCANOLA
Lugar : Passo Fundo, Brasil
Fecha : Agosto, 20-22, 2013
Información : CNPT
falecom@abrascanola.com
www.cnpt.embrapa.br/eventos/2013/slac/index.html

7. Cumbre Mundial de Cacao

Organiza : APROCAFA - ANECACAO
Lugar : Guayaquil, Ecuador
Fecha : Agosto, 26-28, 2013
Información : EXPOPLAZA
info@expoplaza.ec
www.expoplaza.ec/ferias/cacao/descripcion

8. Reunión Anual de la ASA, CSSA y SSSA "El agua, los alimentos, la energía, y la innovación para un mundo sostenible"

Organiza : ASA - CSSA - SSSA
Lugar : Tampa Fl, EE.UU.
Fecha : Noviembre, 3-6, 2013
Información : www.agronomy.org/meetings

9. XX Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo

Organiza : IUSS
Lugar : Jeju, Corea
Fecha : Junio, 8-13, 2014
Información : IUSS
Telf.: (44) 01224 498200
www.iuss.org

10. XX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo

Organiza : SLCS - SPCS
Lugar : Cuzco, Perú
Fecha : Noviembre, 9-15, 2014
Información : SLCS - SPCS
jalegre@lamolina.edu.pe
www.slcs.org.mx

Publicaciones Disponibles IPNI-Norte de Latinoamérica

Título de la Publicación	Costo (U\$S)
<p>Manual de Arroz. Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes: Esta publicación contiene información que permite desarrollar estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales.</p> <p>Guía Práctica para el Manejo de Nutrientes en Arroz: Contiene una discusión concisa y muy práctica de las estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. Excelente herramienta de apoyo en el contacto diario con los agricultores.</p>	45.00
<p>Palma de Aceite. Manejo para Rendimientos Altos y Sostenidos: La palma de aceite es uno de los cultivos con mayor expectativa de crecimiento a nivel mundial, existe una gran demanda entre los palmicultores y agrónomos por conocimientos y publicaciones sobre su manejo adecuado.</p>	45.00
<p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido.</p> <p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo.</p> <p>Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura. Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo.</p>	45.00
<p>Manual Internacional de Fertilidad de Suelos: Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo</p>	15.00
<p>Uso Eficiente de Nutrientes: Esta publicación resume el estado del conocimiento con respecto a la eficiencia de uso de nutrientes en las Américas y discute el contexto contemporáneo dentro del cual se deben manejar los nutrientes.</p>	15.00
<p>Nutrición y Fertilización del Mango: Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico.</p>	15.00
<p>Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos: Esta publicación ofrece a las personas envueltas en la producción ganadera una visión amplia del potencial productivo, de los requerimientos nutricionales y de los factores limitantes impuestos por el ambiente tropical a la producción de forrajes.</p>	10.00
<p>Nutrición de la Caña de Azúcar: Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña.</p>	8.00
<p>Estadística en la Investigación del Uso de Fertilizantes: Publicación que presenta conceptos actuales de diseño experimental e interpretación estadística de los datos de investigación de campo en el uso de fertilizantes.</p>	6.00
<p>Vea el catálogo completo de publicaciones del IPNI en http://nla.ipni.net</p>	