Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz [1]

Fernando O. García
INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur
Av. Santa Fe 910 – (B1641ABO) Acassuso – Argentina
fgarcia@inpofos.org

El rendimiento de maíz está determinado principalmente por el número final de granos logrados por unidad de superficie, el cual es función de la tasa de crecimiento del cultivo alrededor del período de floración. Por lo tanto, para alcanzar altos rendimientos, el cultivo debe lograr un óptimo estado fisiológico en floración: cobertura total del suelo y alta eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa. La adecuada disponibilidad de nutrientes, especialmente a partir del momento en que los nutrientes son requeridos en mayores cantidades (aproximadamente 5-6 hojas desarrolladas), asegura un buen desarrollo y crecimiento foliar y una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada. Los nutrientes disponibles en el suelo generalmente limitan la producción de maíz, siendo necesario conocer los requerimientos del cultivo y la oferta del suelo para determinar las necesidades de fertilización.

En este escrito se presentan los requerimientos nutricionales del cultivo, y se discuten resumidamente las metodologías de diagnóstico para los principales nutrientes desarrolladas y/o utilizadas en distintas áreas de la región pampeana argentina, y algunos aspectos relacionados con el uso de fertilizantes en el cultivo.

1. Requerimientos nutricionales del maíz

La Tabla 1 muestra el requerimiento (cantidad total de nutriente absorbida por el cultivo) y la extracción en grano de los nutrientes esenciales para producir una tonelada de grano de maíz. Debe tenerse en cuenta que esta información resulta de numerosas referencias nacionales e internacionales y que existe una marcada variabilidad según ambiente y manejo del cultivo. Un cultivo de maíz de 12000 kg/ha de rendimiento necesita absorber aproximadamente 264, 48 y 48 kg/ha de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), respectivamente.

[1] *Presentado en la Jornada "Maíz 2005" organizada por Capacitación Agropecuaria. Córdoba, 1 de Julio de 2005.*

Tabla 1. Requerimientos y extracción en grano de nutrientes para producir una tonelada de grano de maíz.

Nutriente	Requerimiento	Indice de Cosecha	Extracción
	kg/ton		kg/ton
Nitrógeno	22	0.66	14.5
Fósforo	4	0.75	3.0
Potasio	19	0.21	4.0
Calcio	3	0.07	0.2
Magnesio	3	0.28	0.8
Azufre	4	0.45	1.8
	g/ton		g/ton
Boro	20	0.25	5
Cloro	444	0.06	27
Cobre	13	0.29	4
Hierro	125	0.36	45
Manganeso	189	0.17	32
Molibdeno	1	0.63	1
Zinc	53	0.50	27

2. Diagnóstico de la fertilización

La Fig. 1 esquematiza las diferentes metodologías disponibles para evaluar la nutrición del cultivo de maíz desde pre-siembra a cosecha. En general, el análisis de suelo es la herramienta básica y fundamental para determinar los niveles de fertilidad de cada lote y diagnosticar la necesidad de fertilización. Los análisis vegetales permiten integrar los efectos de suelo y del ambiente sobre la nutrición de las plantas ampliando la base de diagnóstico, y son de particular importancia para nutrientes cuya dinámica en suelo es particularmente compleja, por ej. el caso de los micronutrientes. La información complementaria utilizada para el diagnóstico de la fertilización incluye las características climáticas de la zona, del suelo y su manejo, y del manejo del cultivo.

En las condiciones de producción de maíz de Argentina, N y P son frecuentemente deficientes para alcanzar altos rendimientos y, en los últimos años, el S se ha presentado como deficiente en numerosas zonas de producción.

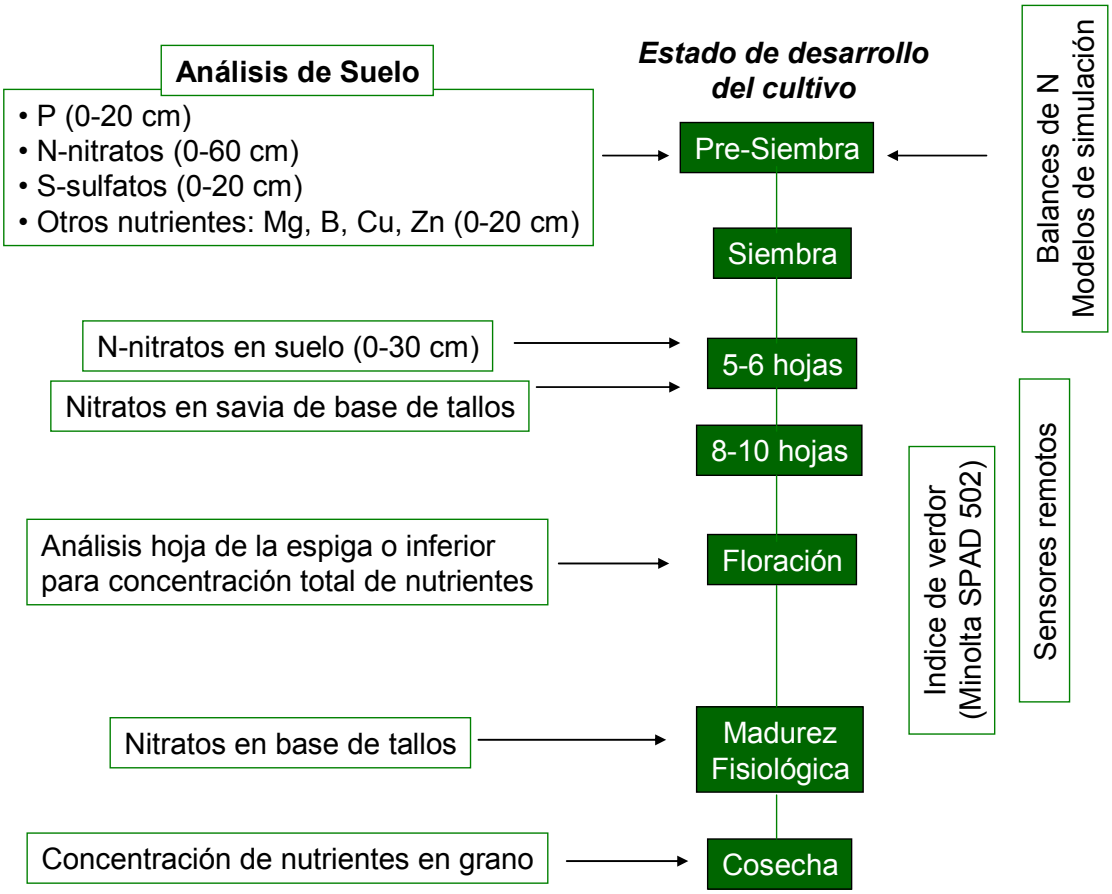

Figura 1. Metodologías disponibles para evaluar la nutrición del cultivo de maíz desde pre-siembra a cosecha.

2.1. Nitrógeno

El N es el nutriente más comúnmente deficiente para la producción de maíz. Los métodos de diagnóstico para la fertilización nitrogenada pretenden predecir la probabilidad de respuesta a partir de la disponibilidad de N en suelo y/o en planta, y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento. Los métodos evaluados en la región pampeana para el cultivo de maíz incluyen el balance de N, el análisis de suelo en pre-siembra y al estado de 5-6 hojas de desarrollo del cultivo (V5-6; Ritchie et al., 1993), el análisis de planta en estadios tempranos y avanzados de desarrollo, y el uso de modelos de simulación y sensores remotos.

1. ***Balance de nitrógeno***. Este método se basa en la evaluación de las formas de N en el suelo disponibles para el cultivo, fundamentalmente N acumulado a la siembra y N mineralizado durante el ciclo del cultivo (oferta de N), y los requerimientos del cultivo de acuerdo al rendimiento esperado (demanda de N). La dinámica del N en el sistema suelo-planta incluye pérdidas de N disponible por lavado, desnitrificación y volatilización. Ante la dificultad de cuantificar estas pérdidas, se considera una eficiencia de uso de las fracciones disponibles (N siembra y N mineralizado) que puede variar entre 0.4 y 0.8,

según la fracción de N considerada, y las características de suelo y clima. En general, las necesidades de fertilización nitrogenada se pueden estimar a través del balance de N según la siguiente ecuación:

$$(Nfert*Efert) = (Ncult) – (Nsie *Esie) – (Nmin * Emin)$$

donde Nfert = N a aplicar como fertilizante

Efert = Eficiencia de uso del N del fertilizante

Ncult = N requerido por el cultivo, estimado a partir del rendimiento esperado

Nsie = N disponible a la siembra del cultivo (N-nitratos, $N\text{-}NO_3^-$)

Esie = Eficiencia de uso del N disponible a la siembra

Nmin = N mineralizado durante el ciclo del cultivo

Emin= Eficiencia de uso del N mineralizado durante el ciclo del cultivo

Este método constituye una aproximación racional a la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar; sin embargo, la falta de información en cuanto a las eficiencias a utilizar para las distintas situaciones y, en muchos casos, de estimaciones confiables de mineralización de N durante el ciclo del cultivo, afectan su uso como criterio de diagnóstico. De todas maneras, es una herramienta fundamental para establecer una primera aproximación a las necesidades de N.

2. ***Disponibilidad de N-nitratos en pre-siembra***. Esta metodología se utiliza en modelos predictivos en algunas zonas de EE.UU., y fue desarrollado en la Región Pampeana a partir de la década del ’80 en el área Norte de Buenos Aires y Centro de Santa Fe (Senigagliesi et al., 1984; Barberis et al., 1985; Gambaudo y Fontanetto, 1996). El desarrollo, calibración y validación de modelos de simulación agronómica realizado por la Cátedra de Cereales (FAUBA) con las Zona CREA Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe (ver punto 7) permitió generar un esquema simplificado de decisión para la fertilización nitrogenada basado en la disponibilidad inicial de N-nitratos (N del suelo + N del fertilizante), pH del suelo y los años de agricultura continua (Fig. 2) (Ruiz et al., 2001). La Fig. 3 muestra la calibración de esta metodología para ensayos realizados en 2000/01 y 2001/02 en Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires.

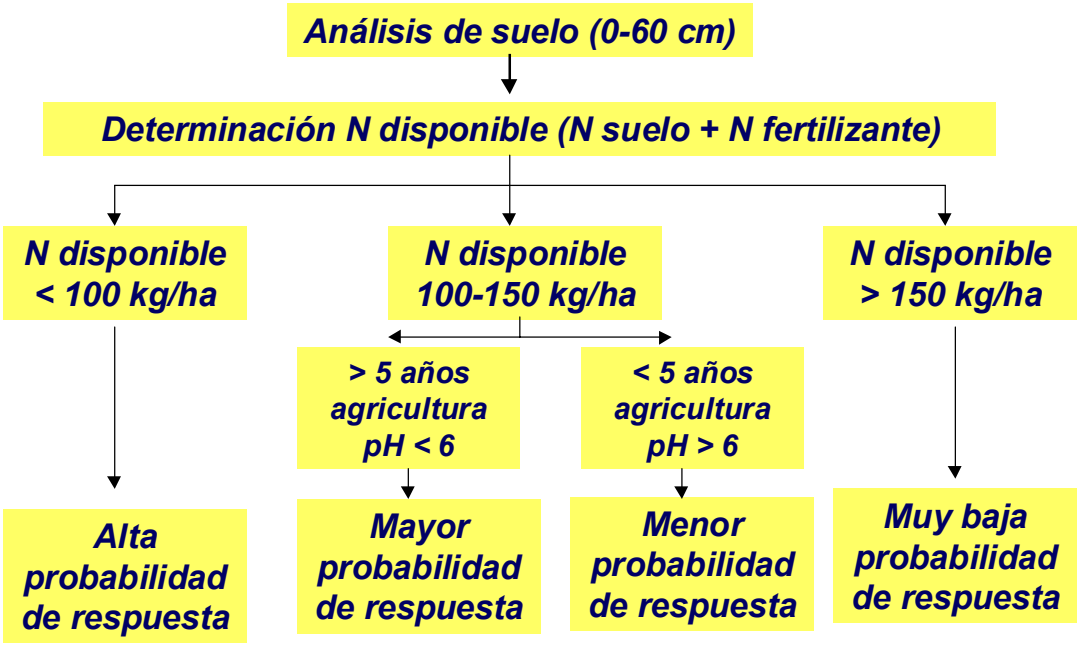

Figura 2. Esquema de decisión para la fertilización nitrogenada de maíz en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe desarrollado por la Cátedra de Cereales (FAUBA) y las zonas CREA Sur de Santa Fe y Norte de Buenos Aires (Ruiz et al, 2001).

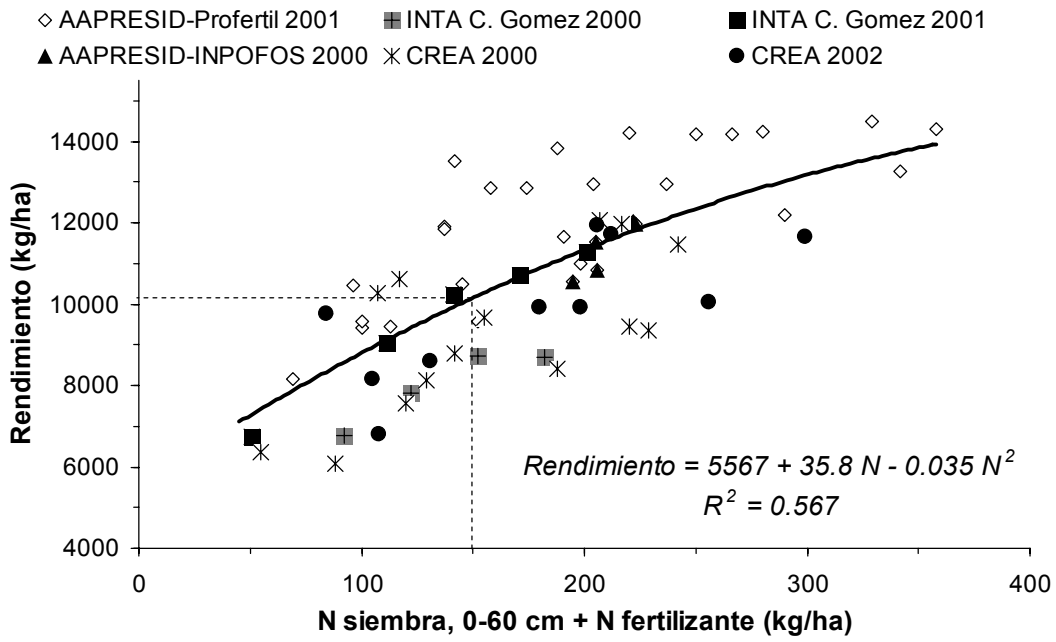

Figura 3. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N a la siembra (N suelo + N fertilizante), en ensayos realizados en 2000/01 y 2001/02 en Córdoba, santa Fe y Buenos Aires.

3. ***Análisis de N-nitratos en suelo al estado de 5-6 hojas desarrolladas***. Esta metodología se basa en que el contenido de N disponible en el suelo (0-30 cm) en este estado representa el N disponible a la siembra más el N aportado por mineralización de N orgánico durante los primeros estados de desarrollo del cultivo. Entre siembra y el estado V5-6, la absorción de N es baja y las temperaturas aumentan generando un pulso de liberación de N desde la fracción orgánica. El método fue desarrollado en el este de EE.UU. y, posteriormente, difundido al cinturón maicero en el medio oeste americano. Las evaluaciones en distintas áreas de la región pampeana han mostrado resultados promisorios. En Entre Ríos, Melchiori et al. (1996) encontraron niveles críticos de 17.4 mg/kg de N -nitratos en pre-escardillada a la profundidad de 0-40 cm. Ferrarri et al. (2000) reportaron niveles críticos de 18-20 mg/kg para el norte de Buenos Aires. En el sudeste bonaerense, los resultados obtenidos muestran que, en general, se pueden esperar respuestas a la aplicación de N si el nivel de N-nitratos es menor de 15-27 mg/kg, dependiendo del nivel de rendimiento alcanzado (Sainz Rozas et al., 2000). En maíz de secano, con rendimientos promedio de 9000 kg/ha, los niveles críticos se ubicaron entre 15 y 17 mg/kg N-nitratos (García et al., 1997; Sainz Rozas et al., 2000). Bajo condiciones de riego, con rendimientos de hasta 15000 kg/ha, los umbrales críticos se ubican entre 24 y 27 mg/kg (Sainz Rozas et al., 2000).
4. ***Concentración de N-nitratos en la base de tallos***. Esta metodología permite evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo en distintos estados de desarrollo, con la posibilidad, en estados tempranos como V4-7, de realizar un muestreo y análisis rápido y corregir inmediatamente la potencial deficiencia nitrogenada. Los resultados obtenidos con concentración de nitratos en savia al estado V4-6 en el Sur de Santa Fe por González Montaner y Di Napoli (1997a) indican un nivel crítico de 4500 mg/L. Sin embargo, trabajando en el sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, Ferrari et al. (2001a) encontraron un nivel crítico, para alcanzar el 90% del rendimiento máximo, del orden de 1439 mg/L de NO_3. Trabajos realizados en el sudeste de Buenos Aires mostraron niveles críticos variables entre años y ensayos de 1200-2400 mg/L NO_3 (Sainz Rozas et al., 2001). La variabilidad observada en los umbrales críticos ha sido adjudicada a diferencias en la humedad del suelo. Las determinaciones en base seca o en estados avanzados (V12, R3, R6) han demostrado una menor variabilidad (Sainz Rozas et al., 2001). Cuando el abastecimiento de N es suficiente, los $nitratos^-$ tienden a acumularse en la base de los tallos al final de la estación de crecimiento. En Balcarce, Sainz Rozas et al. (2001) reportaron un valor de 800 mg/kg para el umbral de suficiencia al estado R6, próximo al rango reportado por autores norteamericanos.
5. ***Medición del índice de verdor de las hojas utilizando el Minolta SPAD 502***. El Minolta SPAD 502 permite medir un "índice de verdor" (IV) que se correlaciona con el contenido de clorófila y de N de las hojas. Las determinaciones son sencillas, rápidas y confiables. En determinaciones realizadas en el sudeste de Buenos Aires, Sainz Rozas y Echeverría (1998) encontraron que la sensibilidad de las mediciones no fue lo suficientemente elevada al estado de 5-6 hojas desarrolladas para diferenciar niveles contrastantes de disponibilidad de N. En estados más avanzados del ciclo (15 días pre-floración, floración y 15 días post-floración), los valores del índice de

suficiencia de N (ISN = IV Testigo / IV Fertilizado) oscilaron entre 0.97-0.98 para lograr el 95% del rendimiento máximo del cultivo. Ferrari et al. (2000) en Pergamino, y Urricarriet y Zubillaga (2001) en Bragado tampoco encontraron relaciones ajustadas entre el índice de verdor en V5-7 y el rendimiento.

6. ***Análisis de planta***. Los análisis de planta entera o de órganos de la planta han sido utilizados como elementos de diagnóstico. Para N, se han reportado rangos críticos de N en planta entera al estado V3-V4 de 3.5-5.0% y de N en hoja de la espiga en floración de 2.75-3.5% (Tabla 2) (Voss,1993). Estos análisis permiten caracterizar la nutrición nitrogenada del cultivo pero al realizarse en estados de desarrollo avanzados, como en el caso del análisis foliar a floración, la metodología no permite corregir el estado nutricional actual del cultivo, aunque es útil para decidir el manejo nutricional de futuros cultivos. En una red de ensayos realizada en la campaña 2000/01 en siete localidades de la región pampeana, Ambrogio et al. (2001) encontraron una concentración crítica de 2.7% de N en hoja de la espiga a floración por arriba de la cual los rendimientos eran superiores a 9000 kg/ha, esta concentración se ubica en el rango considerado crítico por Voss (1993). Valenzuela y Ariño (2000) en Entre Ríos, y Goldman et al. (2000) en Balcarce, Paraná y Rafela, utilizaron la metodología DRIS (Walworth y Sumner, 1987), que es aplicable en cualquier estado y parte de la planta y permite identificar desbalances nutricionales. Estos trabajos indican que los índices DRIS identificaron adecuadamente los lotes deficientes en N, aunque en casos de excesos de N, no consideraron el consumo de lujo de N, indicando desbalances con otros nutrientes.

Tabla 2. Rangos de suficiencia de nutrientes en partes de plantas de maíz (Voss, 1993).

Nutriente	**Rangos de suficiencia en planta**	
	Hoja de la espiga a floración	Planta entera en V3-V4
	---------- % ----------	
N	2.7-3.5	3.5-5.0
P	0.2-0.4	0.4-0.8
K	1.7-2.5	3.5-5.0
Ca	0.2-1.0	0.9-1.6
Mg	0.2-0.6	0.3-0.8
S	0.1-0.3	0.2-0.3
	---------- mg/kg ----------	
B	4-25	7-25
Cu	6-20	7-20
Fe	21-250	50-300
Mn	20-150	50-160
Mo	0-6-1.0	-
Zn	20-70	20-50

7. ***Modelos de simulación del crecimiento, desarrollo y rendimiento***. Los modelos de simulación permiten integrar las variables climáticas, edáficas y genéticas al diagnóstico de la fertilización nitrogenada de los cultivos. La integración de todas estas variables constituye una ventaja importante sobre los otros criterios de diagnóstico ya que reduce el número y el efecto de "factores no controlados" y permite estimar probabilidades de riesgo para cada alternativa de manejo de N. En los últimos años, la Cátedra de Cereales de la FAUBA y las Zonas CREA Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe desarrollaron las "Bases para decidir la fertilización nitrogenada del maíz en el Norte de Buenos Aires" (Satorre y Mercau, 2001), utilizando una versión revisada del modelo GECER. Este modelo se calibró y validó a través de numerosos ensayos en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (Ruiz et al, 1997; Mercau et al., 2001). La versión revisada del modelo GECER permite plantear escenarios que incluyen distintas localidades, series climáticas, series de suelo, niveles de materia orgánica, perfiles de humedad a la siembra, e híbridos de maíz. El criterio de diagnóstico se basa en la disponibilidad inicial de N-nitratos a 0-60 cm de profundidad para cada combinación de localidad, suelo e híbrido. A partir del nivel de N disponible a la siembra se puede i) predecir el rendimiento para distintos escenarios climáticos, ii) predecir la cantidad de fertilizante que será necesario aplicar para alcanzar un determinado rendimiento objetivo, y iii) evaluar el riesgo económico asociado a la opción de manejo seleccionada. La Fig. 4 muestra el esquema de decisión para la localidad de Junín (Buenos Aires), suelo Serie Santa Isabel e híbrido DK752. Las figuras superiores indican la relación entre la disponibilidad inicial de N por hectárea (N de nitratos y amonio a 0-60 cm más el N agregado en el fertilizante) y el rendimiento del cultivo para situaciones de baja (izquierda) y alta materia orgánica (derecha). La línea llena central indica el rendimiento medio esperado y las líneas punteadas superior e inferior representan el 80% y el 20% de probabilidad de obtener rendimientos inferiores a esos valores. La banda encerrada por las líneas punteadas incluye los posibles rendimientos que ocurrirían para cada nivel de N en tres de cada cinco años. Dentro de la figura se agrega la ecuación que ajusta a cada curva. Las figuras inferiores representan la distribución de probabilidad acumulada de rendimientos en cuatro planteos de manejo nutricional (hasta 85, 110, 135 y 160 kg de N disponible por hectárea) para los dos contenidos de materia orgánica. Cada curva representa en cada planteo la probabilidad de obtener rendimientos iguales o inferiores a cada valor. Esta figura permite estimar de manera más precisa el riesgo asociado a la decisión tomada.

8. ***Uso de sensores remotos***. El uso de sensores remotos ha sido desarrollado en los últimos años en EE.UU. y Europa, para diferenciar áreas deficientes en N y permitir la aplicación de dosis variables de N. En Argentina, Melchiori et al. (2001) compararon aplicaciones de N uniformes y variables utilizando el N-Sensor. El N-Sensor realiza mediciones de reflectancia de la canopia y prescribe dosis de aplicación variable de N en tiempo real. El manejo sitio específico permitió obtener mayores rendimientos que el manejo de dosis uniformes y, a igual dosis de aplicación, mejoró la eficiencia de uso del N aplicado (kg de maíz por kg de N). EEA INTA Paraná y AAPRESID estan evaluando actualmente sensores recientemente desarrollados en Nebraska y Oklahoma (EE.UU.) (R. Melchiori, com. personal). El uso de fotografías aéreas también permite caracterizar ambientes con distintas disponibilidades de N en maíz. En un trabajo

reciente, Urricarriet y Zubillaga (2001) demostraron la utilidad de fotos aéreas para diferenciar sitios con disponibilidad variable de N al estado de grano pastoso (R4).

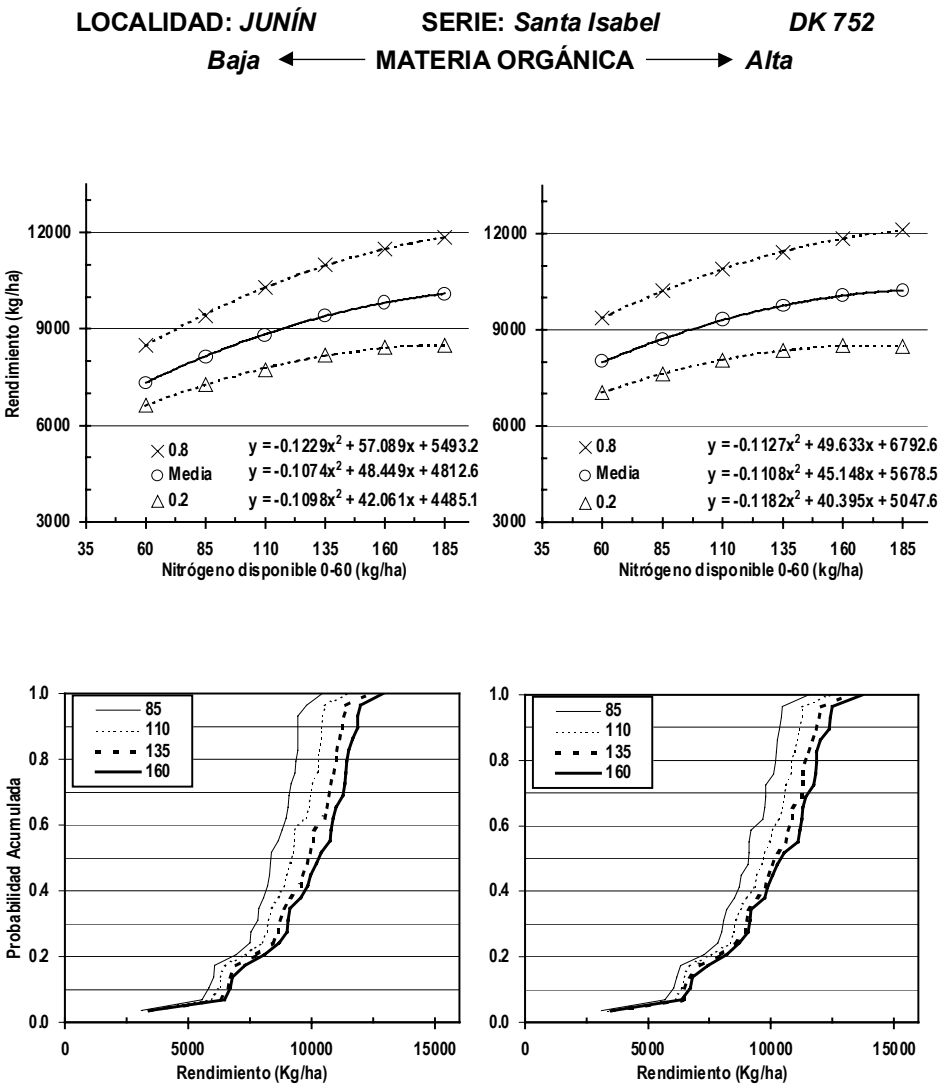

Figura 4. Relación entre el rendimiento de maíz y la disponibilidad de N-nitratos a 0-60 cm con el 20%, 50% y 80% de probabilidad (figuras superiores) y distribución de probabilidad acumulada de rendimientos para cuatro planteos de disponibilidad inicial de N (figuras inferiores). Modelo GECER, Localidad Junin, Serie Santa Isabel, Híbrido DK752. Información Convenio Cátedra de Cereales (FAUBA)-CREA Zonas Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe (Satorre y Mercau, 2001).

2.2. Fósforo

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en suelo, pero también es afectada por factores del suelo, del cultivo y de manejo del fertilizante. Entre los factores del suelo, se destacan la textura, la temperatura, el contenido de materia orgánica y el pH; mientras que entre los del

cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de rendimiento. El diagnóstico de la fertilidad fosfatada se basa en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial utilizando un extractante adaptado a los suelos del área en evaluación. En la región pampeana, en general, el extractante utilizado es Bray 1.

La dosis recomendada depende del nivel de P Bray, del rendimiento esperado, de la relación de precios grano/fertilizante, y del criterio de recomendación del laboratorio y/o asesor. Respecto a este último aspecto, debe tenerse en cuenta que existen dos criterios de recomendación: el de suficiencia y el de reconstrucción y mantenimiento. El criterio de suficiencia pretende satisfacer los requerimientos del cultivo a implantar, mientras que el de reconstrucción y mantenimiento también incluye aportes para mejorar el nivel de P disponible en el suelo. La Tabla 3 muestra los niveles críticos de P Bray en suelo reportados en diferentes áreas de la región pampeana.

Tabla 3. Niveles críticos de P Bray reportados en distintas áreas de la región pampeana.

Area	Nivel crítico	Condiciones #	Referencia
	mg/kg		
Sudeste de Buenos Aires	15-17	LC, Secano	Berardo et al. (2001)
Sudeste de Buenos Aires	20	LC, Riego	Berardo et al. (2001)
Sudeste de Buenos Aires	17	LC y SD, Secano	García et al. (1997)
Norte de Buenos Aires	13-14	LC y SD, Secano	Ferrari et al. (2000)
Sur de Santa Fe	19-20	Secano	M. Silva Rossi (com.pers.)
Oeste de Entre Rios	17	SD, Secano	Mistrorigo et al. (2000)

 # LC Labranza Convencional. SD Siembra Directa.

La Tabla 4 muestra la recomendación de fertilización fosfatada para los suelos del sudeste bonaerense de acuerdo al nivel de P Bray y rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998). Estas recomendaciones fueron generadas a partir de los resultados de los ensayos realizados en el área indicados en la Tabla 3 e incluyen, en forma parcial, el criterio de reconstrucción para los niveles muy bajos de P disponible, y de mantenimiento para niveles de P disponible superiores a los 16 mg/kg.

En otras áreas de la región pampeana se utilizan como referencia los niveles críticos indicados en la Tabla 3 y las dosis recomendadas son similares a las indicadas en la Tabla 4. La Fig. 5 muestra la relación existente entre la eficiencia de uso del P y el nivel de P Bray para 35 ensayos en distintas zonas de la región pampeana. Considerando precios de maíz de 70 U$S/ton y de fosfato diamónico de 360 U$S/ton, la eficiencia de indiferencia es de 25 kg maíz/kg de P aplicado. La ecuación de ajuste indica que para estos datos, esta eficiencia de indiferencia se alcanzaría con 14-15 mg/kg P Bray, es decir que suelos con menos de 14-15 mg/kg mostrarían respuestas económicas a la aplicación de P.

El análisis de planta para el diagnóstico de necesidades de P puede utilizarse para monitorear el manejo de la fertilización del cultivo y efectuar cambios en cultivos posteriores, como ya se indicó para N. La Tabla 2 muestra concentraciones críticas para distintos estados y partes de la planta.

Tabla 4. Recomendaciones de fertilización fosfatada para maíz según nivel de P Bray y rendimiento esperado (Echeverría y Garcia, 1998).

Rendimiento	**Concentración de P disponible en el suelo (mg/kg)**						
	Menos 5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-16	16-20
ton/ha	*kg P/ha*						
5	26	21	19	17	15	13	0
6	28	24	22	20	18	16	11
7	31	26	24	22	21	19	14
8	34	29	27	25	23	21	17
9	36	31	30	28	26	24	19
10	39	34	32	31	28	27	22
11	41	37	35	33	31	29	24
12	44	39	38	36	34	32	27
13	47	42	40	38	36	34	30
14	50	45	43	41	39	37	32

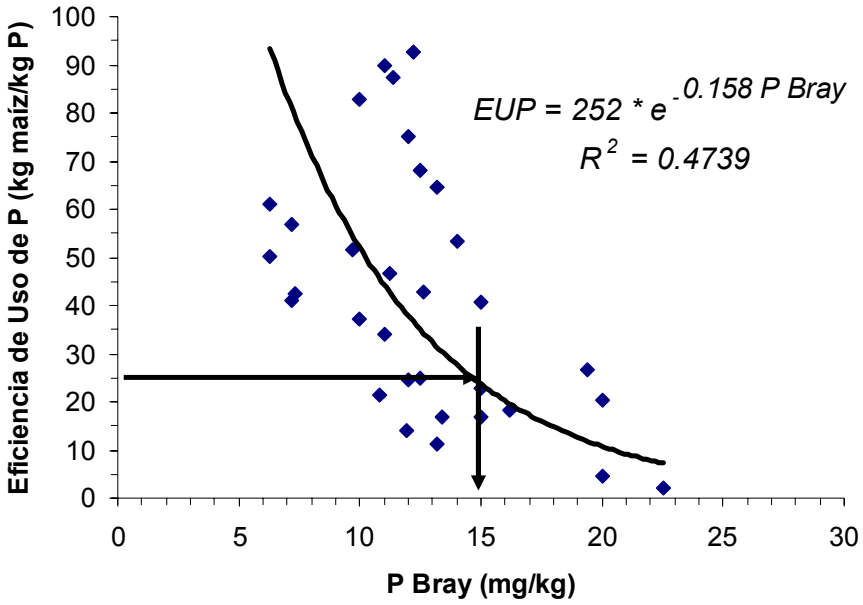

Figura 5. Eficiencia de uso del P aplicado en maíz (kg maíz por kg P aplicado) en 35 ensayos de la región pampeana en función del nivel de P Bray en suelo. La línea horizontal indica una eficiencia de indiferencia de 25 kg maíz/kg P y la vertical el nivel crítico de P Bray de 14-15 mg/kg. Recopilado de información de ensayos de INTA, FA-UBA y CREA Sur de Santa Fe, 1997-2004.

2.3. Azufre

La dinámica del S en el suelo es muy similar a la de N: en ambos casos la materia orgánica es la principal reserva en el suelo y la disponibilidad de nitratos o sulfatos para las plantas depende de la mineralización de las fracciones orgánicas. En general, las deficiencias de S se observan en situaciones de bajo contenido original de materia orgánica, y en situaciones en las que los niveles de materia orgánica disminuyeron a través de los años debido al laboreo continuo de los suelos.

En los últimos años se han observado respuestas a la fertilización azufrada en numerosos cultivos (maíz, soja, trigo, canola, alfalfa, pasturas) en la región pampeana, principalmente en el oeste de Buenos Aires-este de La Pampa y en la zona centro-sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires. Las respuestas a S se observan cuando se han cubierto las deficiencias de los otros nutrientes, principalmente N y P. En la zona Oeste, las respuestas a S se relacionan con el bajo nivel de materia orgánica del suelo (<2-2.5%) y disponibilidad de S, y a los altos rendimientos que se han obtenido en los últimos años (Díaz Zorita, 1998; Ventimiglia et al.,1998; Ventimiglia et al., 2001b) (Fig. 6). En la zona Norte, las respuestas se observan en suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), y con cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada (González Montaner y Di Napoli, 1997b; Martínez y Cordone, 1998; Fontanetto et al., 1999; Cordone et al., 2001; Di Napoli, 2001; Fontanetto et al, 2001) (Fig. 7).

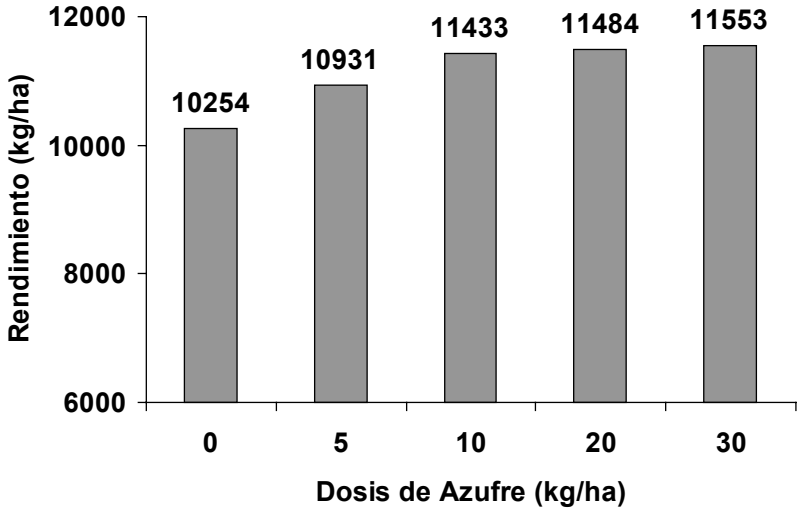

Figura 6. Rendimientos de maíz con cinco dosis de fertilización azufrada. Promedios de tres ensayos realizados en 1998/99, 1999/00 y 2000/01 en 9 de Julio (Buenos Aires). Fertilización de base con 70 kg/ha de N y 14 kg/ha de P (Ventimiglia et al., 2001b).

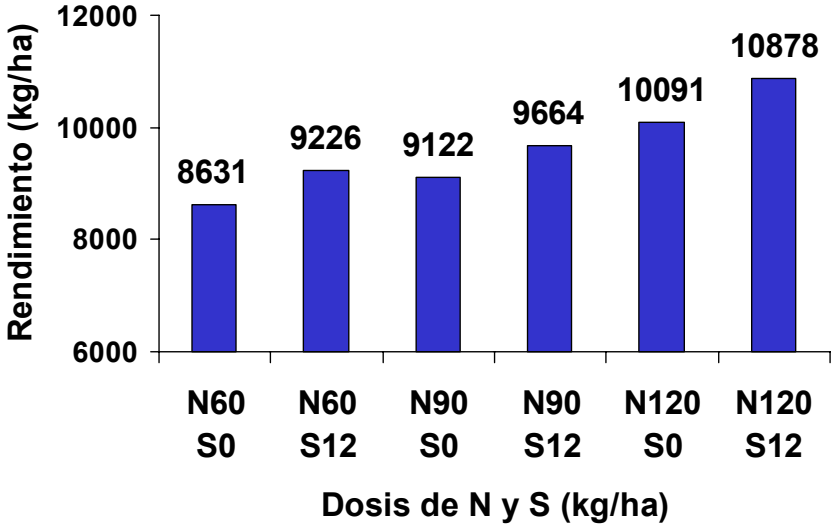

Figura 7. Rendimientos de maíz con distintos tratamientos de fertilización nitrogenada y azufrada en el centro-sur de Santa Fe. Promedio de cinco sitios, campaña 2000/01. Fertilización de base 20 kg/ha de P (Cordone et al., 2001).

Las experiencias desarrolladas hasta la fecha no han permitido generar metodologías de diagnóstico confiables para determinar las necesidades de S para maíz y otros cultivos. El análisis de S-sulfatos en suelo a la siembra ha sido evaluado en algunos estudios con resultados dispares. Blanco et al. (2004) y Di Napoli (2001), en el sur y centro-sur de Santa Fe, respectivamente, estimaron niveles críticos de S-sulfatos en suelo a la siembra de 10-12 mg/kg. Sin embargo, no se encontró relación alguna entre respuesta a S y S-sulfatos en suelo en otras experiencias. La recomendación de la fertilización azufrada se basa actualmente en la caracterización de ambientes deficientes: disminución significativa de materia orgánica, prolongada historia agrícola, adecuado manejo de N y P y manejo en siembra directa, entre otros.

2.4. Otros nutrientes

Las investigaciones realizadas al presente con potasio (K), magnesio (Mg) y micronutrientes han sido fundamentalmente de carácter exploratorio y, por lo tanto, sus resultados no se pueden generalizar. En ensayos realizados en Las Rosas (Santa Fe) entre 1993 y 1996, González Montaner y Di Napoli (1997b) encontraron respuestas significativas a K en uno de 18 sitios, y a cinc (Zn) en tres de 13 sitios. En 9 de Julio (Buenos Aires) se han reportado respuestas significativas a la aplicación de boro (B) (Ventimiglia et al., 1999) y de Zn (Carta et al., 2001). Por el contrario, evaluaciones realizadas en Marcos Juárez (Córdoba) (Gudelj et al., 2000) y en el sudeste bonaerense (F. García y col., com. pers.) no mostraron respuestas a la aplicación de Mg, B y Zn, y a B, cobre (Cu) y Zn, respectivamente.

Melgar et al. (2001) evaluaron la respuesta a B y Zn en catorce localidades del norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe durante las campañas 1996/97 y 2000/01. La respuesta a B fue significativa en 30% de los casos y a Zn en 36% de los casos. Las respuestas medias obtenidas con las dosis óptimas de cada nutriente, 0.5 y 4 kg/ha de

B y Zn, respectivamente, fueron de 780 y 740 kg/ha en los sitios con respuesta. Estas respuestas no se correlacionaron con la disponibilidad de B y Zn en suelo o en planta.

La aplicación de K, K+Mg o K+Mg+B+Cu+Zn no resultó en diferencias significativas en rendimientos de maíz de los ensayos de la Red de AAPRESID en las campañas 2000/01 y 2003/04 (Ambrogio et al., 2001; Bianchini et al., 2004a). Los análisis de hoja de la espiga a floración indicaron concentraciones de Mg y B por debajo de los niveles considerados críticos en la bibliografía internacional. Los resultados de la Red de Nutrición de la Zona CREA Sur de Santa Fe no mostraron respuestas significativas a la aplicación de K+Mg+B+Cu+Zn en 23 ensayos evaluados en cuatro campañas.

La evaluación de sistemas de fertilización balanceada, que incluyan nutrientes "no convencionales" como K, Mg y micronutrientes, requiere de planes de investigación específicos bajo situaciones diversas en cuanto a tipo de suelo, historia del lote y condiciones climáticas y con distintas formas y momentos de aplicación de estos nutrientes.

3. Manejo de la fertilización

3.1. Nitrógeno

La demanda de N del cultivo de maíz aumenta marcadamente a partir del estado de 5-6 hojas desarrolladas (30-50 días después de la emergencia). Por esta razón, la aplicación en este estado del cultivo o inmediatamente previa ha sido reportada como la de mayor eficiencia de uso de N (Sainz Rozas et al., 1999). La Fig. 8 muestra los rendimientos obtenidos en un cultivo de maíz bajo SD con tres dosis de N aplicadas como urea a la siembra, al estado de 5 hojas desarrolladas o dividida (mitad a la siembra y mitad al estado de 5 hojas). La dosis de 50 kg/ha de N mostró una mayor eficiencia con la aplicación al estado de 5 hojas que con la aplicación a la siembra o dividida. Dosis mayores muestran respuestas decrecientes y resultan en eficiencias similares para los distintos momentos de aplicación.

Las ventajas operacionales pueden justificar las aplicaciones tempranas (pre-siembra o a la siembra) en muchos casos, ya que las diferencias no siempre son de la magnitud de las observadas en la Fig. 8. La eficiencia de estas aplicaciones tempranas depende de 1) la cantidad y frecuencia de precipitaciones entre la aplicación y la absorción de N del cultivo que pueden originar perdidas por lavado y/o desnitrificación y 2) la inmovilización microbiana que depende principalmente de la cantidad de residuos. Ferrari et al. (2001b) no observaron diferencias entre las aplicaciones de N a la siembra y al estado V6 en suelos argiudoles, mientras que en suelos hapludoles la aplicación en V6 superó a la aplicación a la siembra. Estas diferencias entre tipos de suelo fueron atribuidas a una mayor pérdida de nitratos por lixiviación entre siembra y V6 en los hapludoles que en los argiudoles.

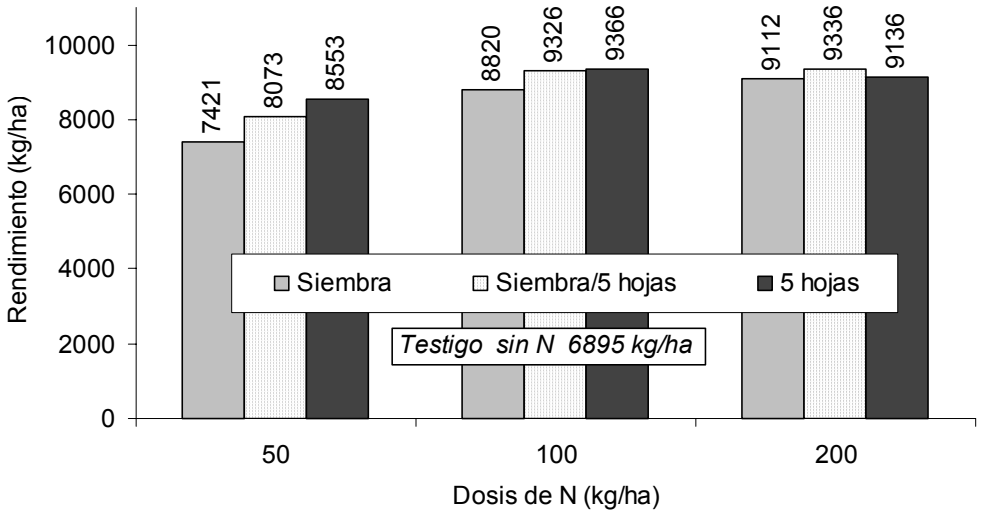

Figura 8. Rendimientos de maíz con distintas dosis de N aplicadas como urea en tres momentos: Siembra, 5 hojas desarrolladas o Dividida (mitad siembra y mitad 5 hojas). Ensayo Puerta del Abra 1997/98, Balcarce, Buenos Aires, Argentina (F. García y col., com. pers.).

La eficiencia de uso de N de distintas fuentes nitrogenadas es similar cuando los fertilizantes son incorporados. Aplicaciones superficiales de N pueden resultar en perdidas por volatilización de amoníaco cuando se utiliza urea o fuentes que contengan urea (García et al., 1999; Sainz Rozas et al., 1999; Urricarriet et al., 2000). Las pérdidas por volatilización dependen del contenido de agua del suelo y de la temperatura, las mayores pérdidas ocurren con contenidos de humedad cercanos a capacidad de campo y temperaturas de 25^{o}C o superiores. Bajo SD, las perdidas por volatilización son mayores que bajo LC debido principalmente a la mayor actividad ureásica de los residuos. La inmovilización/intercepción del N por el residuo bajo SD representa una pérdida de N común a todos los fertilizantes nitrogenados con aplicaciones superficiales. Fontanetto (1999) y Ferrari et al. (2000) encontraron que los efectos sobre el rendimiento de las pérdidas temporarias de N debidas a la intercepción del fertilizante por el residuo y/o a la inmovilización microbiana en aplicaciones superficiales de fertilizantes nitrogenados sobre el rastrojo bajo SD, pueden ser de igual o mayor magnitud que las pérdidas por volatilización.

3.2. Fósforo

La aplicación de los fertilizantes fosfatados debe hacerse a la siembra o antes de la siembra de manera tal que el P esté disponible para el cultivo desde la implantación. La reducida movilidad del ión ortofosfato y la retención (fijación, adsorción e inmovilización) del fertilizante fosfatado en el suelo requieren de la aplicación localizada del mismo, especialmente en suelos de bajo contenido de P disponible y en siembras tempranas. Sin embargo, en los últimos años, en ensayos realizados bajo sistemas de SD estabilizados (más de 5 años), se han encontrado eficiencias de uso del P aplicado

similares para aplicaciones al voleo anticipadas al menos 60 días antes de la siembra y aplicaciones en bandas a la siembra (Bianchini et al., 2004b).

Entre las fuentes de P, los fosfatos diamónico y monoamónico tienen la ventaja sobre el superfosfato triple de presentar N-amonio en su composición, lo que mejoraría el efecto de arranque del fertilizante a partir de los efectos benéficos de la interacción amonio-fosfato. Sin embargo, estas diferencias entre fuentes fosfatadas no suelen observarse a campo cuando se igualan las dosis de N aplicadas (Ventimiglia et al., 2001a).

4. Consideraciones finales

En este escrito se han discutido los principales criterios de diagnóstico de fertilización para cada nutriente en el cultivo de maíz. Estas herramientas deben insertarse en el manejo de la fertilización de cultivos dentro de la rotación o sistema. Al incluir a la rotación de cultivos en el análisis del manejo de la fertilización, se consideran los efectos residuales de nutrientes de movilidad reducida como P (Berardo, 2003), o incluso de movilidad media como S. Asimismo, las fertilizaciones anteriores muestran efectos indirectos como, por ejemplo, la mayor producción de rastrojos que permite capturar una mayor cantidad de C en el suelo y, de esa manera, mejorar los niveles de materia orgánica con sus consecuentes beneficios. El manejo de la fertilización en la rotación también presenta beneficios desde el punto de vista operativo y económico. A modo de ejemplo, el P puede reponerse en momentos del año de baja actividad (luego de la cosecha de cultivos de verano) y/o en cultivos de mayor respuesta (trigo, luego maíz y finalmente soja y girasol).

Un segundo aspecto que debe tenerse en cuenta al considerar los criterios de diagnóstico y los aspectos de manejo de la fertilización, discutidos individualmente para cada nutriente, lo constituye la interacción positiva que se observa al aplicar dos o más nutrientes deficientes. La fertilización balanceada permite que, a medida que se cubren las deficiencias de un nutriente, se incrementen la eficiencia de uso de todos los nutrientes. La Fig. 9 muestra un ejemplo de fertilización balanceada e interacción positiva entre nutrientes. La respuesta a la aplicación de conjunta de NPS fue de 3857 kg/ha, mientras que la suma de los efectos individuales de N, P y S fue de 3020 kg/ha.

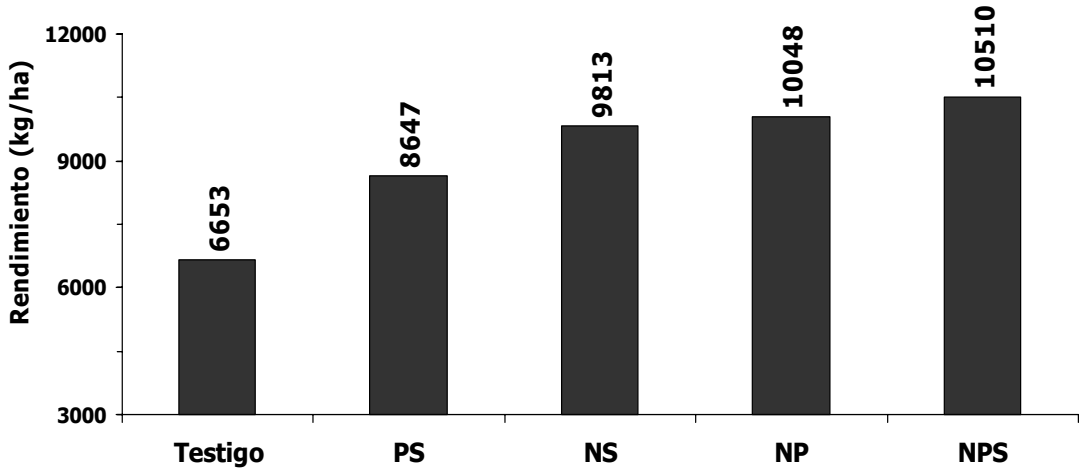

Figura 9. Rendimientos de maíz, promedios para seis ensayos, en la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campaña 2003/04 (Blanco et al., 2004).

5. Referencias

Ambrogio M., S. Lorenzatti, W. Tanducci y F. García. 2001. Explorando deficiencias nutricionales en la región pampeana: Resultados de los ensayos de fertilización AAPRESID-INTA-INPOFOS – Maíz 2000/01. *En* Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2001". INPOFOS Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Barberis L., E. Chamorro, C. Baumann Fonay, D. Zourarakis, D. Canova y S. Urricariet. 1985. Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada en la Pampa Ondulada. Campañas 1980/81 - 1983/84. II. Modelos predictivos y explicativos. Rev. Fac. Agronomía 6:65-84.

Berardo A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. In Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires. Pp. 38-44.

Berardo A., S. Ehrt, F. Grattone y F. García. 2001. Corn yield response to phosphorus fertilization in the *southeastern Pampas. Better Crops International 15 (1):3-5.*

Bianchini A. y col. 2004a. Nutrición en la rotación: Cinco años de la red de ensayos de AAPRESID-INPOFOS. Resultados de maíz de la campaña 2003/04. Maíz en Siembra directa. AAPRESID. Rosario, Santa Fe. pp. 71-75.

Bianchini A. y col. 2004b. Localización de fósforo en siembra directa. Campaña 2003/04. Maíz en Siembra directa. AAPRESID. Rosario, Santa Fe. pp. 81-89.

Blanco H. y col. 2004. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2003/04: Maíz. Informaciones Agronómicas 23:9-14. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires.

Carta H., L. Ventimiglia y S. Rillo. 2001. Maíz: Fertilización con zinc. Experimentación en campo de productores. Campaña 2000/01. UEEA INTA 9 de Julio. Buenos Aires, Argentina.

Cordone G., F. Martínez, J. Capurro y R. Abrate. 2001. Fertilización de maíz con nitrógeno y azufre en el centro-sur de la provincia de Santa Fe. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Díaz Zorita M. 1998. Azufre: Balanceando la formula con otros nutrientes. Fertilizar, No. Esp. Pasturas, pp. 16-17.

Di Napoli M. 2001. Análisis comparado de deficiencias de nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en siembra directa. Monografía Especialista Programa de Post-Grado en Producción Vegetal. FCA-INTA Balcarce. Argentina.

Echeverría H. y F. Garcia. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.

Ferrari M., J. Ostojic, L. Ventimiglia, H. Carta, G. Ferraris, S. Rillo, M. Galetto y F. Rimatori. 2000. Fertilización de maíz: Buscando una mayor eficiencia en el manejo de nitrógeno y fósforo. Actas

Jornadas de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad 2000”. Rosario, 28 de Abril de 2000. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires.

Ferrari M., J. Ostojic, G. Ferraris, L. Ventimiglia, H. Carta y S. Rillo. 2001b. Momento de aplicación del fertilizante nitrogenado en maíz de siembra directa. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Ferrari M., F. Rimatori, G. Ferraris, J. Ostojic, M. Galetto y R. Gómez. 2001a. Diagnóstico de deficiencias de N en maíz basado en la concentración de nitratos en savia. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Fontanetto H. 1999. Maíz en la región central de Santa Fe. Actas “Seminario Diagnóstico de deficiencias de nitrógeno, fósforo y azufre en cultivos de la región pampeana”. EEA INTA Balcarce. Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Fontanetto H., O. Keller, R. Inwinkelried y N. Citroni. 1999. Efecto del fósforo y el azufre en maíz. Jornadas de Intercambio Técnico de Maíz. AAPRESID. Rosario, Santa Fe, Argentina.

Fontanetto H., H. Vivas y R. Albrecht. 2001. Diferentes fuentes de azufre en maíz en dos sitios de la región centro-este de Santa Fe. Publicación Técnica “Maíz en Siembra Directa”. AAPRESID.

Gambaudo S. y H. Fontanetto. 1996. Fertilización. *En* Maíz. Información para Extensión. EEA INTA Rafaela. Santa Fe.

García F., K. Fabrizzi, M. Ruffo y P. Scarabicchi. 1997. Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

García F., K. Fabrizzi, L. Picone y F. Justel. 1999. Volatilización de amoniaco a partir de fertilizantes nitrogenados aplicados superficialmente bajo siembra directa y labranza convencional. 14º. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile. 8-12 Noviembre 1999.

Goldman V., H, Echeverría, F. Andrade y S. Uhart. 2000. Caracterización nutricional del cultivo de maíz: Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS). Actas CD XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACS.Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

González Montaner J., y M. Di Napoli. 1997a. Respuestas a nitrógeno del cultivo de maíz en el sur de la provincia de Santa Fe. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

González Montaner J., y M. Di Napoli. 1997b. Respuesta a P, cal, S, K y Zn del cultivo de maíz en el sur de la provincia de Santa Fe. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Gudelj V., P. Vallone, C. Galarza, O. Gudelj, C. Lorenzon y B. Masiero. 2000. Fertilización del cultivo de maíz en siembra directa. Maíz: Resultados de ensayos de la campaña 1999/2000. Información para Extensión No. 62. EEA INTA Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.

Martínez F. y G. Cordone. 1998. Fertilización azufrada en soja. Jornadas de Azufre. UEEA INTA Casilda, Septiembre 1998. Casilda, Santa Fe, Argentina

Melchiori R., P. Barbagelata, C, Christiansen y A. Von Martini. 2001. Manejo por sitios específicos del nitrógeno en maíz: Evaluación del N-sensor. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Melchiori R., O. Paparotti y W. Paul. 1996. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada de maíz: Nitratos en preescardillada. Serie de Extensión No. 11. EEA INTA Paraná. Entre Ríos.

Melgar R., J. Lavandera, M. Torres Duggan y L. Ventimiglia. 2001. Respuesta a la fertilización con boro y zinc en sistemas intensivos de producción de maíz. Ciencia del Suelo 19(2): 109-114.

Mercau J., E. Satorre, M. Otegui, G. Maddoni, J. Carcova, R. Ruiz, M. Uribelarrea y F. Menendez. 2001. Evaluación a campo del comportamiento del modelo CERES en cultivos de maíz del norte de la provincia de Buenos Aires. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Mistrorigo D., R. De Carli, F. Aranguren, P. Beret y A. Lisasso. 2000. Fertilización de maíz en siembra directa en Entre Ríos. En Jornadas de Intercambio Técnico de Maíz. AAPRESID. Rosario, Argentina.

Ritchie S., J. Hanway y G. Benson. 1993. Como se desarrolla una planta de maíz. Reporte Especial No. 48. Iowa State University. Edición en español de INPOFOS Cono Sur (Marzo 2002).

Ruiz R., E. Satorre, G. Maddoni, D. Calderini, D. Miralles, J. Carcova y M. Di Napoli. 1997. Bases funcionales de la respuesta a la fertilización ntrogenada de cultivos de maíz en el norte de la provincia de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Ruiz R., E. Satorre, G. Maddoni, J. Carcova y M. Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Sainz Rozas H. y H. 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.

Sainz Rozas H., H. Echeverría, E. Herfurt y G. Studdert. 2001. Nitrato en la base del tallo de maíz. II. Diagnóstico de la nutrición nitrogenada. Ciencia del Suelo 19(2):125-135.

Sainz Rozas H., H. Echeverría, G. Studdert y F. Andrade.1999. No-till maize nitrogen uptake and yield: Effect of urease inhibitor and application time. Agron. J. 91:950-955.

Sainz Rozas H., H. Echeverría, G. Studdert y G. Dominguez. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. Agron. J. 92:1176-1183.

Satorre E. y J. Mercau. 2001. Bases de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. Informe Convenio AACREA-FAUBA. Buenos Aires, Argentina.

Senigagliesi C., R. García y M.L. de Galetto. 1984. Evaluación de la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada y fosfatada en el área centro-norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. III Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino.

Urricarriet S. y M. Zubillaga. 2001. Fotografía aérea color e índice de verdor en la detección de la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

Urricarriet S., M. Zubillaga y L. Couzelo. 2000. Incidencia de pérdidas de nitrógeno por volatilización en la producción de maíz bajo siembra directa. Actas CD XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACS.Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Valenzuela O. y P. Ariño. 2000. Evaluación del estado nutricional del cultivo de maíz a través del diagnóstico foliar. Actas CD XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACS.Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Ventimiglia L., H. Carta y S. Rillo. 1998. Azufre: Para comenzar a pensar. Agromercado, No. XXI. Cuadernillo de Trigo.

Ventimiglia L., H. Carta y S. Rillo. 1999. Boro en maíz. Campaña 1998/99. Cosecha Gruesa: Resultados de experiencias. UEEA INTA 9 de Julio. Buenos Aires, Argentina.

Ventimiglia L., H. Carta y S. Rillo. 2001a. Utilización de diferentes fuentes fosforadas en maíz. Experimentación en campo de productores. Campaña 2000/01. UEEA INTA 9 de Julio. Buenos Aires, Argentina.

Ventimiglia L., H. Carta y S. Rillo. 2001b. Respuesta del maíz al azufre: Resultados de tres años de experiencias a campo. Experimentación en campo de productores. Campaña 2000/01. UEEA INTA 9 de Julio. Buenos Aires, Argentina.

Voss R. 1993. Corn. *In* Nutrient Deficiencies and Toxicities in Crop Plants. W. Bennet (ed.). APS Press. St. Paul, Minnesota, EE.UU.

Walworth J. y M. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system. Adv. Soil Sci. 6:149-185.