

DIAGNOSTICO PARA RECOMENDACION DE FERTILIZACION NITROGENADA EN CULTIVOS DE INTERES AGRONOMICO

Fernando O. Garcia¹ e Inés C. Daverede²

SUMMARY

The diagnosis of crop nitrogen (N) needs to reach maximum biological and/or economic yields to i) maximize applied N use efficiency and investment return, and ii) to reduce the environmental impact as a result of excessive (soil, water and air pollution) and/or deficient (soil degradation) applications. This paper summarizes the main diagnosis methodologies or systems for wheat and corn crops, with emphasis in research carried out in the Pampas region of Argentina. Balances of N, soil available N at planting or during the cropping season, soil N mineralization indices, plant analysis, spectral and remote sensors, and agronomic simulation models are discussed. The regional calibration of these methodologies allows adjusting the variables to the local soil, climatic, and management conditions. This process is essential to achieve an adequate diagnosis for every field or field management zone.

Resumo

O diagnóstico do nitrogênio no cultivo precisa atingir o máximo rendimento biológico e econômico para i) maximizar a eficiência e o retorno do investimento, e ii) reduzir o impacto ambiental proveniente de aplicações excessivas (contaminação do solo, da água e do ar) e deficientes (degradação do solo). Este artigo resume as metodologias ou sistemas de diagnóstico para os cultivos de trigo e milho, com ênfase nas pesquisas realizadas na Região Pampeana da Argentina. Os modelos discutidos incluem balanços de nitrogênio disponível no solo no plantio ou durante o crescimento do cultivo, índices de mineralização do solo, análises de planta, sensores remotos e espectrais, e modelos de simulação agrônômica. A calibração regional destas metodologias permite ajustar as variáveis às condições edafo-climáticas e de manejo locais.

INTRODUCCION

El nitrógeno (N) es considerado el nutriente más importante para la producción vegetal debido a las cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observan deficiencias en suelos agrícolas. Por lo tanto, la agricultura de altos rendimientos depende del uso de fertilizantes nitrogenados. El diagnóstico de las necesidades de N de los cultivos para alcanzar el máximo rendimiento biológico y/o económico a nivel específico de lote y/o zona de lote, contribuye a i) maximizar la eficiencia de uso del N aplicado y el retorno de la inversión, y ii) a reducir los impactos ambientales que se generan tanto con aplicaciones excesivas (contaminación del suelo, aire y agua) como con aplicaciones deficientes (degradación del suelo por disminución de las reservas naturales de N, fundamentalmente N orgánico).

La importancia del N en la producción agrícola genera numerosas investigaciones y experimentaciones en la búsqueda de métodos de diagnóstico de la fertilidad nitrogenada para recomendaciones de fertilización. En general, los métodos de diagnóstico que pretenden predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada se basan en la disponibilidad de N en suelo y/o en planta y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento.

Históricamente, las recomendaciones de N en el cinturón maicero norteamericano se han basado en el rendimiento objetivo y en créditos por el N abastecido por cultivos previos (leguminosas) y abonos

¹ International Plant Nutrition Institute – IPNI. Cono Sur. Correo electrónico: fgarcia@ipni.net

² University of Illinois. Correo electrónico: daverede@uiuc.edu

orgánicos (estiércol) (Vitosh *et al.*, 1996). Sin embargo, en los últimos años, se han desarrollado distintas metodologías que contribuyen a definir con mayor precisión la dosis de N necesaria para los cultivos (Blackmer *et al.*, 1997; Sawyer y Nafziger, 2005).

En el caso de Brasil, las recomendaciones utilizadas se han basado en la expectativa de rendimiento, el tenor de materia orgánica, la historia del lote y la presencia de leguminosas previas (Bull y Cantarella, 1993; Comissao de Fertilidade do Solo RS/SC, 1997; Comissao Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo, 1998). A partir de la fuerte expansión de la siembra directa y el uso de cultivos de cobertura, Amado y Mielniczuk (2000) propusieron determinar las necesidades de N del cultivo de maíz considerando los requerimientos del cultivo según el rendimiento esperado, el aporte de N por mineralización del suelo y el N contenido en los residuos del cultivo antecesor.

En este escrito se discuten brevemente los principales métodos de diagnóstico de la fertilidad nitrogenada utilizados para cultivos de trigo y el maíz, con énfasis en los resultados obtenidos por diversos grupos de investigación en la región pampeana argentina. La región pampeana argentina incluye las llanuras ubicadas en el centro-este del país, que presentan un clima templado con precipitaciones que varían entre 700 y 1200 mm anuales, distribuidos principalmente en el período primavera-verano-otoño. Anualmente se cultivan unas 22-24 millones de ha, siendo soja el principal cultivo seguido por trigo, maíz, girasol y otros cereales de invierno (cebada, centeno, y avena). La siembra directa es el principal sistema de manejo en la zona y abarca aproximadamente 60-65% del área de cultivos (S. Lorenzatti y D. Peruzzi, AAPRESID, com. pers.).

Balances de nitrógeno

La metodología de balances de N responde a la evaluación de la oferta de N por el suelo y la demanda por el cultivo (Meisinger *et al.*, 1992). Un balance de N se define a partir de los procesos de ganancias, pérdidas y transformaciones de N, estableciéndose límites en el espacio y el tiempo para el sistema suelo-planta (Meisinger, 1984; Neeteson, 1990). El balance general de N en el suelo para el ciclo de un cultivo anual podría definirse según la siguiente ecuación:

$$N_f + N_a + N_{om} + N_{ii} = N_p + N_g + N_l + N_e + N_{iin} + N_{if} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde N_f = N aportado por el fertilizante

N_a = N aportado por fijación biológica y/o lluvias

N_{om} = N orgánico mineralizado

N_{ii} = N inorgánico inicial

N_p = N absorbido por la planta

N_g = N perdido en formas gaseosas (N_2 , N_2O o NH_3)

N_l = N perdido por lavado

N_e = N perdido por erosión

N_{iin} = N inorgánico inmovilizado

N_{if} = N inorgánico final

La formulación de este balance se puede utilizar para estimar las necesidades de fertilización (N_f):

$$N_f = (N_p + N_g + N_l + N_e + N_{iin} + N_{if}) - (N_a + N_{om} + N_{ii}) \quad (\text{Ec. 2})$$

La diferencia entre el N orgánico mineralizado (N_{om}) y el N inorgánico inmovilizado (N_{iin}) puede ser definida como N mineralizado neto (N_{min}). El N_a no es significativo para cereales u otras no-leguminosas y el N_{if} debe ser minimizado. La determinación de las pérdidas gaseosas y por lavado es probablemente el mayor limitante para la generalización del uso del balance de N como método de diagnóstico. La dificultad está dada fundamentalmente por la alta variabilidad espacial y temporal que se observan en este tipo de pérdidas (Parkin, 1984; Follet *et al.*, 1991). Para facilitar el cálculo del

balance, las pérdidas gaseosas, por lavado y por erosión son estimadas como un porcentaje del N disponible como fertilizante, inorgánico inicial y mineralizado durante el ciclo del cultivo, o simplemente se estima una eficiencia media de uso de N disponible para la planta que incluya estas pérdidas.

A partir de estas simplificaciones y considerando el balance sólo para la parte aérea del cultivo, la Ec. 2 resulta en:

$$N_f = \frac{N_p - (E * N_{min}) - (E * N_i)}{E} \quad (Ec. 3)$$

donde N_{min} = N mineralizado ($N_{om} - N_{iin}$)

N_{ii} = N inorgánico inicial

Para resolver esta ecuación podemos estimar N_p a partir del rendimiento esperado y una concentración de N en planta promedio. Los requerimientos de N para trigo y maíz han sido estimados en 30 y 22 kg de N por ton de grano producido, respectivamente (Echeverría y Sainz Rozas, 2005; García y Berardo, 2005). El N_{ii} se puede determinar por muestreo y análisis de suelo a la siembra del cultivo. El valor de N_{min} se puede aproximar a partir de información generada a nivel experimental (Rice y Havlin, 1994; Echeverría y Bergonzi, 1995) o estimar a partir del rendimiento de cultivos sin fertilizar (Schepers y Meisinger, 1994).

El valor E es la fracción de N disponible recuperada en la parte aérea de la planta con valores generales estimados de 0,40-0,70 y varía principalmente con las condiciones climáticas, de suelo y de manejo. El valor E debería ser distinto para cada fracción de N disponible (N_f , N_{min} y N_i) ya que la eficiencia de uso de N no es igual para todas estas fracciones. Para N_i , E puede variar de 0,40 a 0,60. El valor de E para N_{min} es mayor ya que la mineralización es favorecida por condiciones de temperatura y humedad que también favorecen el crecimiento y la absorción de N por parte de los cultivos, estimándose un rango de 0,60 a 0,85 (Meisinger, 1984). Para N_f , el valor de E depende del tipo de fertilizante y el momento y forma de aplicación, variando de 0,50 para aplicaciones pre-siembra de trigo a 0,85 en aplicaciones de fertilizante con agua de riego.

Como ejemplo supongamos que se deben estimar las necesidades de fertilización de un lote de maíz con un rendimiento objetivo de 8000 kg ha⁻¹. Las necesidades de N para toda la parte aérea se estiman en 22 kg N por cada 1000 kg de grano (Echeverría y Sainz Rozas, 2005). El N_{min} se estima en 150 kg N ha⁻¹. El N_{ii} , determinado por análisis de $N-NO_3^- + N-NH_4^+$ en el perfil, es de 60 kg N ha⁻¹. Como eficiencia promedio de uso de N se estima un valor del 70% (E=0.7). Reemplazando en la Ec. 3:

$$N_f = \frac{176 - (0.7 * 150) - (0.7 * 60)}{0.7} = 41 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Es decir que los requerimientos de fertilizante serían de 41 kg N ha⁻¹.

La utilización de balances de N para la formulación de recomendaciones de fertilización, si bien es sostenida por una sólida base teórica, está restringida por: 1) la variabilidad de los rendimientos esperados y los realmente alcanzados, 2) la variabilidad de Ns a escala de lote, 3) las estimaciones de N_{min} y 4) las eficiencias de uso estimadas de las distintas fracciones de N (Follet *et al.*, 1991; Rice y Havlin, 1994).

En la región pampeana argentina, se han calibrado balances simplificados a escala zonal para trigo y maíz que incluyen la evaluación de niveles de N disponible en pre-siembra, el manejo previo del lote,

las precipitaciones y el rendimiento objetivo (Barberis *et al.*, 1983; Barberis *et al.*, 1985; Novello *et al.*, 1986; Loewy, 1990; Berardo, 1994).

La metodología oficial de recomendación de fertilización nitrogenada en Inglaterra y Gales utiliza una versión modificada del balance de N que incluye el requerimiento de N del cultivo a partir del rendimiento objetivo, un índice de abastecimiento de N del suelo y un coeficiente de eficiencia de uso del N del fertilizante (MAFF, 2000). El trabajo de Amado y Mielniczuk (2000) en Rio Grande do Sul (Brasil), plantea un balance parcial de N para cultivos de maíz bajo siembra directa luego de cultivos de cobertura (Ec. 4):

$$N_f = (NR - N_d) / E_f \quad (\text{Ec. 4})$$

donde N_f es la dosis de N a aplicar, NR es el requerimiento de N del cultivo, N_d incluye la oferta de N por mineralización del N orgánico del suelo y del N contenido en los residuos del cultivo de cobertura antecesor, y E_f es la eficiencia de uso del N del fertilizante.

Disponibilidad de N en el suelo

Pre-siembra

La evaluación del N disponible ($N-NO_3^-$) en pre-siembra constituye una herramienta eficaz en el diagnóstico de la fertilización nitrogenada en áreas subhúmedas o semiáridas pero también ha demostrado su utilidad en zonas húmedas bajo consideraciones especiales de suelo, manejo de cultivo y profundidad de muestreo (Hergert, 1987). La determinación de la disponibilidad de N como nitratos en pre-siembra ha sido frecuentemente utilizada en trigo para caracterizar sitios deficientes y efectuar recomendaciones de fertilización, por ejemplo en Canadá (Fowler *et al.*, 1989; Campbell *et al.*, 1993) y Argentina (González Montaner *et al.*, 1991; García *et al.*, 1998). Los umbrales críticos varían según las condiciones edafo-climáticas, el rendimiento esperado del cultivo y el sistema de manejo, como se observa para distintas zonas de la región pampeana argentina en la Tabla 1.

Tabla 1. Umbrales críticos de N disponible a la siembra ($N-NO_3^-$, 0-60 cm de profundidad) para trigo en distintas áreas de la región pampeana argentina con distintos niveles de rendimiento objetivo.

Area	Umbral crítico $N-NO_3^-$ 0-60 cm	Rendimiento Objetivo	Fuente
	-----	kg ha ⁻¹	-----
Sudeste de Buenos Aires	125	3500	González Montaner <i>et al.</i> , 1991.
Serrana de Buenos Aires	110	4000-4500	García <i>et al.</i> , 1998.
Oeste de Buenos Aires	90	3000	González Montaner (com. pers.)
Centro-Sur de Santa Fe	70	2500	González Montaner (com. pers.)
Norte de Buenos Aires	100-140	3500-4000	Satorre (com. pers.)
Sudeste de Buenos Aires	175	5000-5500	González Montaner <i>et al.</i> , 2003.
Sur de Santa Fe y Córdoba	100-150	3200-4400	Blanco <i>et al.</i> , 2004.

La recomendación de fertilización nitrogenada con este método se realiza estimando la cantidad de N a aplicar como la diferencia entre el umbral crítico y la disponibilidad de N-NO₃⁻ determinada en pre-siembra (Ec. 5):

$$N_f = UC - X \quad (\text{Ec. 5})$$

donde N_f es la cantidad de N a aplicar como fertilizante, UC es el umbral crítico de N disponible a la siembra y X es la cantidad de N-NO₃⁻ determinada en el suelo a 0-60 cm de profundidad.

Es importante tener en cuenta que los umbrales zonales indicados en la Tabla 1 dependen del nivel de rendimiento objetivo. En el sudeste de Buenos Aires, el umbral de 125 kg N ha⁻¹, determinado inicialmente para rendimientos de 3500-4000 kg ha⁻¹ (González Montaner *et al.*, 1991), ha sido actualizado a 175 kg N ha⁻¹ para niveles de rendimiento superiores a los 5000 kg ha⁻¹ (Echeverría *et al.*, 2001; González Montaner *et al.*, 2003).

En maíz, esta metodología se utiliza en modelos predictivos en algunas zonas de EE.UU. (Bundy *et al.*, 1992), y en la región pampeana argentina fue desarrollado 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). Ruiz *et al.* (2001) propusieron un esquema simplificado de decisión para la fertilización nitrogenada basado en la disponibilidad inicial de N-NO₃⁻ (N del suelo + N del fertilizante), pH del suelo y los años de agricultura continua (Fig. 1). La Fig. 2 muestra la calibración de esta metodología para ensayos realizados en 2000 y 2004 en Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires. Evaluaciones de resultados experimentales más recientes indican que disponibilidades de N-NO₃⁻ en el suelo (0-60 cm) + N fertilizante de 150-170 kg N ha⁻¹, según el potencial de rendimiento, maximizan el beneficio económico de la fertilización nitrogenada (Alvarez *et al.*, 2003; García *et al.*, 2005).

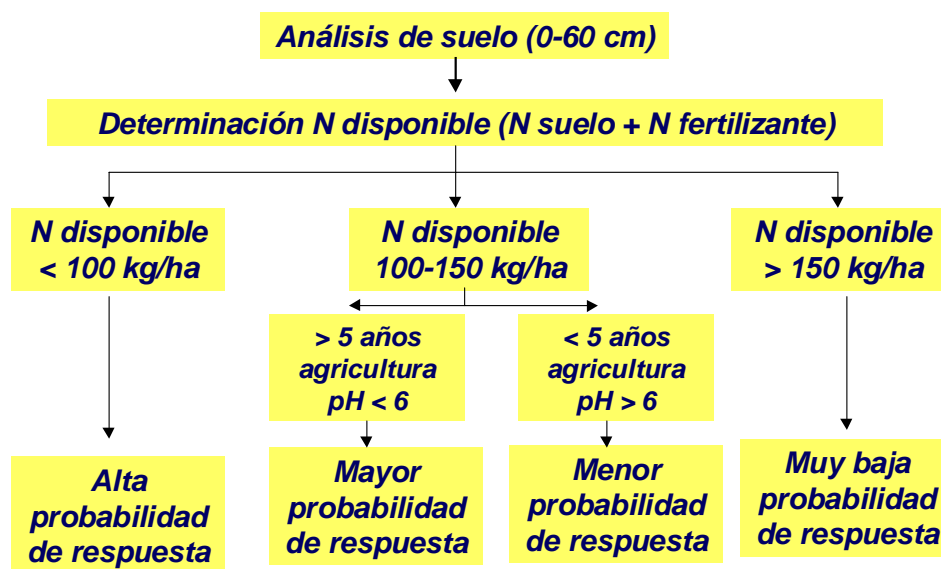


Figura 1. Esquema de decisión para la fertilización nitrogenada de maíz en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe desarrollado por la Cátedra de Cereales (FAUBA) y las zonas CREA Sur de Santa Fe y Norte de Buenos Aires (Ruiz *et al.*, 2001).

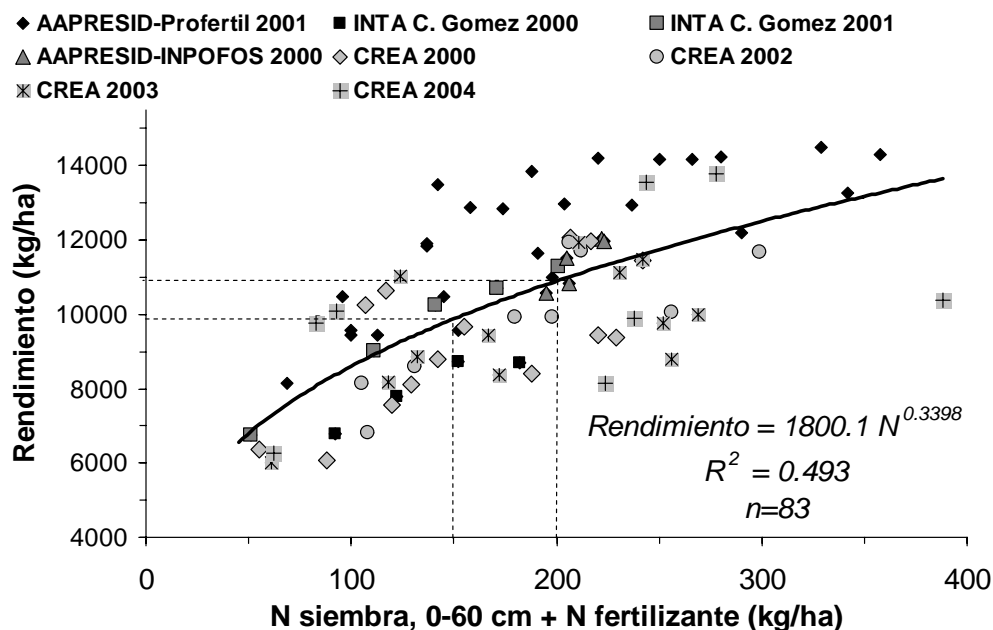


Figura 2. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N a la siembra (N suelo + N fertilizante), en ensayos realizados por diferentes grupos de experimentación entre 2000 y 2004 en Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires (Argentina).

Durante el ciclo del cultivo

En trigo, en el sudeste de Buenos Aires, Echeverría *et al.* (2004) reportaron umbrales entre 120 y 130 kg N ha⁻¹ para rendimientos de 5000-7000 kg ha⁻¹ en las campañas 2002 y 2003 con la determinación del contenido de N-NO₃⁻ en el suelo (0-60 cm) durante el macollaje del trigo. Esta determinación presentó una menor variación en los umbrales de respuesta entre años y por efecto de variedades que el análisis de nitratos en pre-siembra.

En Uruguay, el nivel de N-NO₃⁻ en el suelo (0-20 cm de profundidad) al estado de 2 macollos (Zadoks 2.2; Zadoks *et al.*, 1974), se utiliza junto con el nivel de N-NO₃⁻ en el suelo (0-20 cm de profundidad) a la siembra para decidir la fertilización nitrogenada de cereales de invierno. En cebada y trigo, también puede usarse el contenido de N en planta a fin de macollaje, para verificar y corregir el suministro de N (Bordoli y Perdomo, 2005).

En maíz, el análisis de N-NO₃⁻ a 0-30 cm de profundidad al estado de 5-6 hojas desarrolladas (V5-6, Ritchie *et al.*, 1993) o “*pre-sidedress soil nitrate test (PSNT)*” fue inicialmente desarrollado por Magdoff *et al.* (1984) en el noreste de EE.UU. Este análisis se basa en el monitoreo de la mineralización *in situ* y es un índice de la intensidad de mineralización (Meisinger *et al.*, 1992). Para su utilización se asume que la mayor parte del fertilizante nitrogenado será aplicado con el escardillo (“*sidedress application*”) y que a la siembra del cultivo sólo se aplican cantidades reducidas de N (menos de 50 kg ha⁻¹ de N). Blackmer *et al.* (1992) calibraron un análisis similar incluyendo sitios con aplicaciones de N en pre-siembra (“*late-spring test*”) (Blackmer *et al.*, 1997). Los niveles críticos por debajo de los cuales se observa respuesta a la fertilización varían entre 18 y 25 mg kg⁻¹ de N-NO₃⁻ (Fox *et al.*, 1989; Binford *et al.*, 1992; Meisinger *et al.*, 1992; Sims *et al.*, 1995; Bundy y Andraski, 1995).

Las evaluaciones en distintas áreas de la región pampeana argentina han mostrado resultados promisorios. En Entre Ríos, Melchiori *et al.* (1996) encontraron niveles críticos de 17.4 mg kg⁻¹ de N-

NO_3^- en pre-escardillada a la profundidad de 0-40 cm. Ferrarri *et al.* (2000) y Bianchini *et al.* (2005) reportaron niveles críticos de 18-20 mg kg^{-1} para la región pampeana norte. 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-NO_3^- es menor de 15-27 mg kg^{-1} , dependiendo del nivel de rendimiento alcanzado (Sainz Rozas *et al.*, 2000). En maíz de secano, con rendimientos promedio de 9000 kg ha^{-1} , los niveles críticos se ubicaron entre 15 y 17 mg kg^{-1} N-NO_3^- (García *et al.*, 1997; Sainz Rozas *et al.*, 2000) (Fig. 3). Bajo condiciones de riego, con rendimientos de hasta 15000 kg ha^{-1} , los umbrales críticos se ubican entre 24 y 27 mg kg^{-1} (Sainz Rozas *et al.*, 2000).

Esta metodología puede complementar el diagnóstico inicial realizado a través del análisis de suelo pre-siembra (Bordoli y Perdomo, 2005), o a través del balance de N. En forma práctica, se ha determinado que para alcanzar el nivel crítico (en mg kg^{-1}) se necesita aplicar de 8 a 12 kg N ha^{-1} para aumentar 1 mg kg^{-1} (Bianchini *et al.*, 2005; Echeverría y Sainz Rozas, 2005).

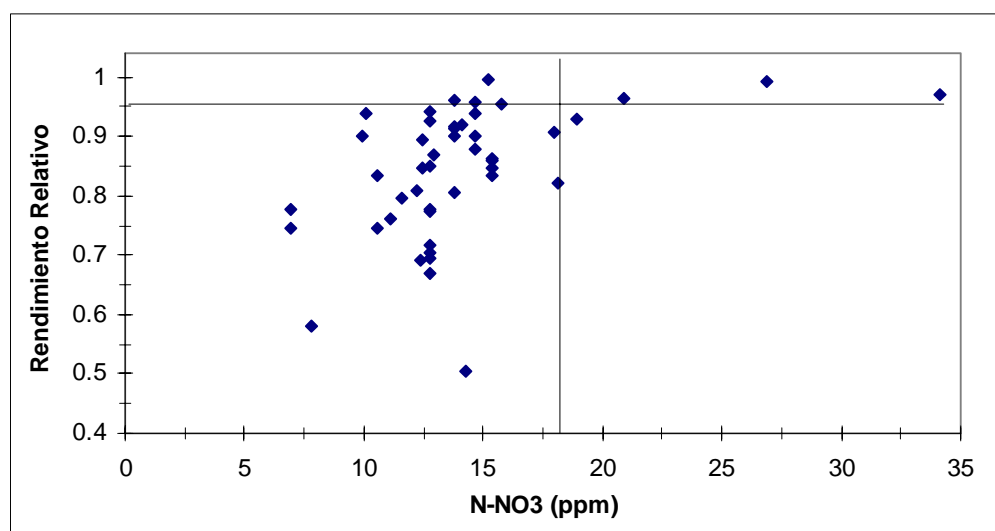


Figura 3. Rendimiento relativo de maíz en función del nivel de N-NO_3^- a 0-30 cm de profundidad al estado de 5-6 hojas. Ensayos Unidad Integrada EEA INTA-FCA Balcarce 1993-1996 (n=42). La línea vertical indica $\text{N-NO}_3^- = 18$ ppm y la horizontal Rendimiento Relativo = 0.95. (García *et al.*, 1997).

Indices de mineralización de nitrógeno

Varios métodos de análisis de laboratorio han intentado predecir la cantidad de N mineralizable durante el ciclo del cultivo, con el objetivo de mejorar la estimación del N_{min} en la Ec. 3. Este es un gran desafío debido a que la mineralización del N orgánico durante el ciclo del cultivo depende de factores difíciles de controlar, como la temperatura y la humedad.

Entre los métodos desarrollados se encuentran las incubaciones aeróbicas, anaeróbicas, y análisis químicos que intentan extraer el N más lábil de la materia orgánica, simulando la cantidad de N mineralizada durante el ciclo de un cultivo (N_{min}). El método original de incubaciones aeróbicas de 30 semanas para estimar el N_{min} potencial en un suelo fue desarrollado por Stanford and Smith (1972), y aunque se hayan encontrado buenas correlaciones con el N_{min} a campo (Curtin y McCallum, 2004), no resulta práctico para la adopción rutinaria por parte de laboratorios comerciales. Por otro lado, se han desarrollado métodos de incubaciones anaeróbicas (N_{an}) de una semana que también han dado buenas correlaciones con el N mineralizado en condiciones controladas (Keeney y Bremner, 1966; Dersch *et al.*, 2003). Sin embargo, otros investigadores en Pennsylvania (Fox y

Piekielek, 1984) y en Minnesota (Thicke *et al.*, 1993) no han encontrado que las incubaciones anaeróbicas se correlacionen con la disponibilidad de N durante cultivos a campo de maíz.

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Calviño y Echeverría (2003) encontraron que el método de incubación anaeróbica permitió separar suelos donde el cultivo de maíz no respondió al agregado de N de suelos donde respondió al N. Maíces en suelos con concentraciones de Nan superiores a 48 mg kg⁻¹ no mostraron respuestas al agregado de 60 kg N ha⁻¹, mientras que concentraciones inferiores produjeron una gran variabilidad en las respuestas, probablemente a causa de la diversidad de factores que afectan la mineralización de N, como la accesibilidad de los microorganismos al sustrato, calidad del mismo, humedad de suelo, ciclos de secado y humedecimiento y temperatura de suelo (Calviño y Echeverría, 2003). Los suelos con índices superiores a 48 mg kg⁻¹ habían estado bajo pasturas recientemente (1 a 3 años). Como el Nan es un índice de mineralización potencial del cultivo, podría complementarse bien con un análisis de N-NO₃⁻ a la siembra o en V6, que reflejaría si se dieron las condiciones oportunas para la mineralización de N durante el cultivo (Echeverría y Sainz Rozas, 2005).

Entre los análisis químicos se encuentran las extracciones de amonio del suelo con ácidos, agua caliente o sales, métodos rápidos y precisos que en algunos casos han dado buenas correlaciones con el N disponible durante cultivos en condiciones controladas de agua y temperatura. Mengel *et al.* (1999) observaron que el N amino extractable por medio de sales o electroultrafiltración es el indicador que mejor predice el N potencialmente mineralizable. Si bien estos métodos están disponibles hace más de 20 años, nunca fueron adoptados en forma masiva por no poder dar resultados confiables a campo (Curtin y McCallum, 2004).

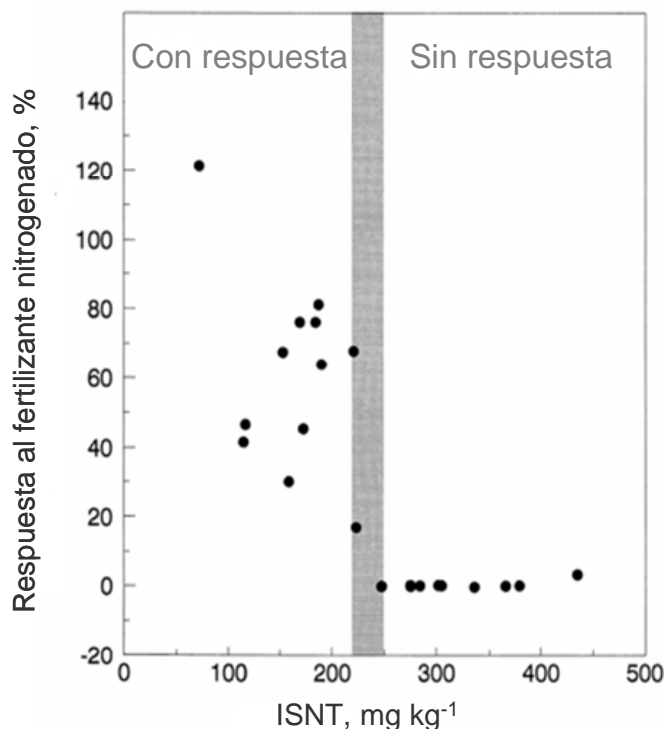


Figura 4. Relación entre el ISNT y la respuesta del maíz al agregado de fertilizante en 25 ensayos en Illinois (1990-1992). Porcentaje de respuesta = (rendimiento del cultivo fertilizado - rendimiento del control no fertilizado)/rendimiento del control no fertilizado (Khan *et al.*, 2001).

Recientemente, se ha desarrollado el Análisis de Nitrógeno en Suelo de Illinois, o ISNT (Khan *et al.*, 2001), un método diseñado para cuantificar el N lábil de una muestra mediante hidrólisis alcalina suave del suelo, completándose en un día y requiriendo de baja tecnificación. El ISNT está positivamente correlacionado con el N en forma de aminoazúcares ($r = 0.9$), y Mulvaney *et al.* (2001) observaron que éstos compuestos son más fácilmente mineralizables que los aminoácidos. Khan *et al.* (2001) encontraron que el maíz en Illinois no respondió al agregado de N cuando el nivel de ISNT del suelo era mayor que el rango crítico de 225 a 235 mg kg^{-1} y que la respuesta fue positiva cuando el ISNT era menor que este rango (Figura. 4).

Muchos productores de Illinois ya han adoptado el ISNT y varios laboratorios comerciales están ofreciendo el servicio de análisis. En Carolina del Norte, Williams *et al.* (2005) observaron fuertes correlaciones entre la dosis óptima económica de N y el ISNT. En el resto de los estados de EE.UU., el ISNT no tuvo tan buenos resultados como en Illinois y, por lo tanto, la determinación de N-NO_3^- en presembrado y el PSNT siguen usándose en forma rutinaria. El ISNT es un estimador del N que se podrá mineralizar durante el crecimiento del cultivo, pero no puede predecir la cantidad de N inorgánico inmediatamente disponible en un momento puntual, ya que la tasa de mineralización depende de factores como la humedad y la temperatura. Por esta razón, la estructura espacial del ISNT es más fuerte que la de nitratos, posibilitando la construcción y creación de mapas para el uso de ISNT en aplicaciones variables de N (Ruffo *et al.*, 2005). La estabilidad del ISNT encontrada en el tiempo implicaría que los mapas generados podrían ser utilizados en los modelos de diagnóstico de fertilización durante varios años. Resultados promisorios en Illinois generaron interés por analizar al ISNT como método de diagnóstico para la fertilización nitrogenada de maíz en la Argentina. El ISNT fue analizado en cuatro lotes en Santa Fe, donde se condujeron ensayos de respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz, supervisados por J. González Montaner y M. DiNápoli. La respuesta al agregado de aproximadamente 75 kg N ha^{-1} fue no significativa a niveles de ISNT mayores a 210 mg kg^{-1} , mientras que superó los 800 kg ha^{-1} en lotes de niveles de ISNT menores a 210 mg kg^{-1} (Fig. 5). Estos resultados preliminares generaron alentadoras perspectivas para la utilización de este test como método de diagnóstico para la fertilización nitrogenada.

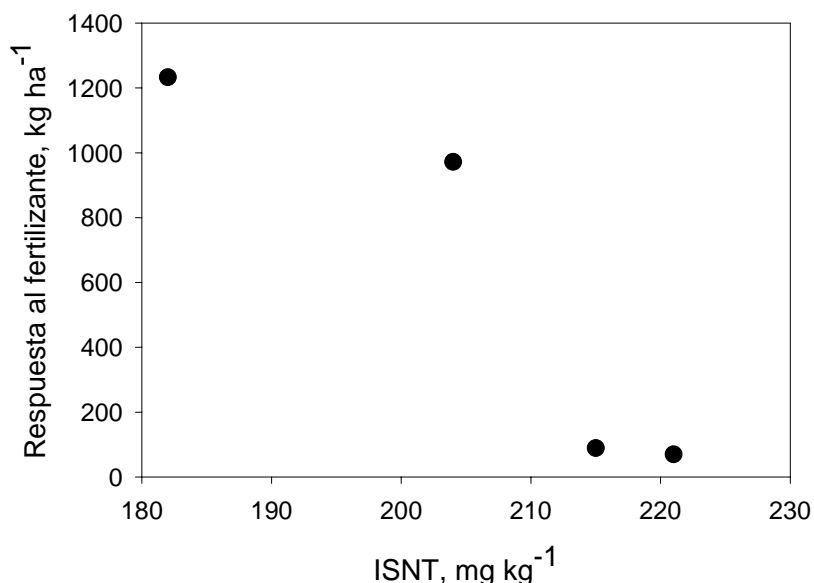


Figura 5. Relación entre el ISNT y la respuesta del maíz al agregado de fertilizante en 4 ensayos supervisados por J. González Montaner y M. DiNápoli en Las Rosas, Santa Fe (2002).

En síntesis, los análisis rápidos de Nmin no han podido generalizarse para todas las condiciones agroecológicas. La materia orgánica es una estructura muy compleja, y la disponibilidad de N inorgánico para el cultivo está sujeta a muchos factores que afectan a los microorganismos que llevan adelante la mineralización. Hasta ahora los índices de mineralización han servido para separar suelos con cultivos que responderán o no responderán al agregado de fertilizante nitrogenado, pero son muy pocos los casos donde se ha podido determinar el Nmin con exactitud.

Análisis de planta

Los análisis de planta presentan la ventaja, sobre los análisis de suelo, de integrar los efectos de factores meteorológicos y edáficos sobre el estado nutricional del cultivo (Papastylianou y Puckridge, 1981). Distintas metodologías de análisis de planta han sido utilizadas para determinar las deficiencias nutricionales de trigo, maíz y otros cultivos.

Concentración de N total

El estado de nutrición nitrogenada ha sido evaluado a través de la concentración de N en planta entera o en diferentes órganos (Jones, 1998). Se determina un valor crítico calibrando la concentración de N en un órgano determinado y en un estadio de crecimiento específico en función del rendimiento relativo obtenido de datos provenientes de ensayos. El valor óptimo o crítico es aquel que alcanza el 90-95% del rendimiento relativo máximo. Este valor crítico se compara como un standard con el valor determinado en la muestra a diagnosticar. Considerando las variaciones que se pueden producir por efectos no relacionados con la nutrición del cultivo (otros factores abióticos y bióticos), se suele usar un rango de suficiencia.

Para planta entera de trigo al estado de emergencia de la espiga (Feekes 10.1, Large, 1954; Zadoks 50), el rango de suficiencia de concentración de N sugerido es de 1.75-3.0% (Ward *et al.*, 1973; Jones, 1998), mientras que para hojas superiores al inicio de floración (Feekes 10.5, Zadoks 65), el rango de suficiencia es de 3.0-3.3% (Malavolta *et al.*, 1997).

La determinación de la concentración total de N al final de macollaje en trigo (Zadoks 30 o Feekes 5) ha sido utilizada para determinar deficiencias de N y necesidades de fertilización, con niveles críticos entre 3.5 y 3.95% (Baethgen y Alley, 1989; Roth *et al.*, 1989; Vaughan *et al.*, 1990). Esta metodología fue complementada con determinaciones de número de macollos y disponibilidad de N-NO₃⁻ en suelo (0-90 cm) en Zadoks 25 para diseñar un programa de fertilización nitrogenada para el este de EE.UU. (Scharf y Alley, 1993).

En maíz, se han reportado rangos de suficiencia 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% (Voss, 1993). En la región pampeana argentina (Ambrogio *et al.*, 2001; Bianchini *et al.*, 2005), se han encontrado niveles críticos de N en hoja de la espiga o inferior a la espiga en floración (estado R1) de 2.7-2.8%, coincidentes con los del rango considerado crítico por Voss (1993) y otros autores de EE.UU. En determinaciones en grano de maíz, se han reportado valores críticos de N total de 1.2-1.4% (Uhart y Echeverría, 2002; Bianchini *et al.*, 2005).

El uso de rangos de suficiencia está limitado por las variaciones en concentración de N a medida que el cultivo crece. Las alternativas para N son el uso de las curvas de dilución, que se presenta en la siguiente sección, o del sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS) desarrollado por Walworth y Sumner (1987). Este sistema utiliza relaciones entre nutrientes en lugar de valores críticos para hacer el diagnóstico. En la medida que la planta madura, los tejidos contienen mayor proporción de materia seca que de humedad y nutrientes y, por consiguiente, al expresar la concentración de nutrientes en función del contenido de materia seca (MS), el valor decrece en el tiempo, por ejemplo, $N(\%) = 100N/MS$. Sin embargo, al usar las relaciones entre nutrientes, como ejemplo, $N/P =$

(100N/MS)/(100P/MS), se cancela la MS y la relación N/P se vuelve menos dependiente de los cambios relativos en MS con la edad. La metodología de DRIS requiere de la formulación de normas locales para los distintos cultivos. La Tabla 2 muestra normas ya publicadas para maíz, soja, trigo, alfalfa y girasol que pueden ser usadas como una primera aproximación.

Tabla 2. Normas DRIS para N en maíz, soja, trigo, alfalfa y girasol (adaptado de Sumner, 2001).

Parámetro	Maíz †	Soja ‡	Trigo §	Alfalfa ¶	Girasol *
	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
N (%)	3.26			3.29	
N/P	10.13	14.9	12.74	10.3	12.80
N/K	1.40	2.69	1.45	1.26	1.71
N/S	12.17		14.7		

† Walworth and Sumner (1987); ‡ Beverly et al. (1985); § Sumner (1981); ¶ Erickson et al. (1982); * Grove and Sumner (1982).

En Argentina, Valenzuela y Ariño (2000) en Entre Ríos, y Goldman *et al.* (2000) en Balcarce, Paraná y Rafaela, 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.

Curvas de dilución de nitrógeno

Entre las metodologías que utilizan la determinación de N total en planta, las denominadas “curvas de dilución” permiten definir la concentración crítica de N para cualquier estado de crecimiento según la biomasa acumulada por el cultivo. La concentración crítica de N es definida como la concentración de N mínima para que el cultivo alcance la tasa máxima de crecimiento. Esta concentración crítica disminuye a medida que los cultivos crecen por un efecto de dilución (Greenwood *et al.*, 1990). Concentraciones por debajo del nivel crítico, producen un estrés de N y tasas de crecimiento inferiores a la óptima. La intensidad del estrés se cuantifica a través de un índice de estrés de N (IEN) que relaciona la concentración de N actual y la concentración crítica. El IEN no está relacionado linealmente con el rendimiento ya que los efectos del estrés no sólo dependen de su intensidad sino también del momento del ciclo del cultivo en que se produce.

Para trigo, Justes *et al.* (1994) establecieron la siguiente relación entre la concentración crítica de N y la biomasa acumulada (Ec. 6):

$$CCN = 5.3 B^{-0.44} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde CCN es la concentración crítica de N y B es la biomasa acumulada. La CCN según Justes *et al.* (1994), se ubica por arriba de la estimada para ensayos realizados en Balcarce (Buenos Aires) en 1997 y 1998 (Fig. 6). En estos ensayos, los sitios sin respuesta (SR) se diferencian claramente de los sitios con respuesta (CR).

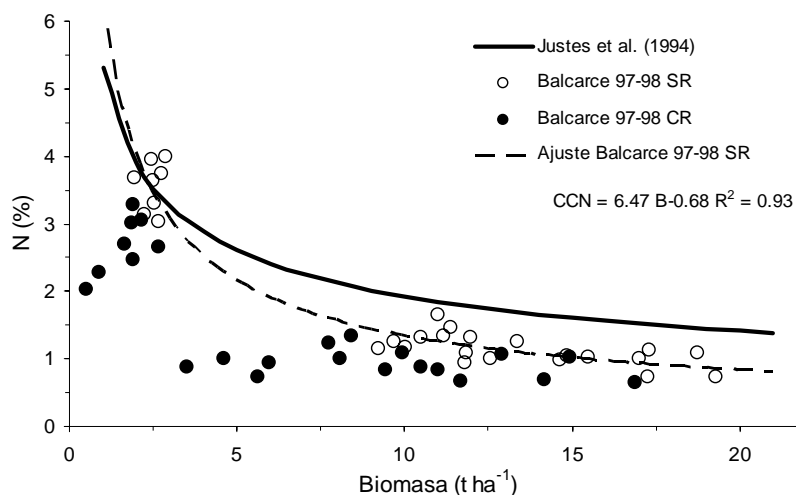


Figura 6. Concentración de N en función de la cantidad de biomasa aérea acumulada en trigo. Se indican la curva según Justes *et al.* (1994) (Ec. 5) y datos de ensayos realizados en Balcarce (Buenos Aires) en 1997 y 1998, con el respectivo ajuste para los sitios sin respuesta a N (SR), condiciones sin limitación de N ($CCN = 6.47 B^{-0.68}$; $R^2 = 0.93$). CR indica sitios con respuesta a N.

Para maíz, Uhart y Andrade (1996) obtuvieron una única ecuación de ajuste entre concentración de N en materia seca aérea y peso seco para datos de diferentes híbridos de maíz de varias regiones del mundo:

$$CCN = 4.1 B^{-0.42} \quad R^2 = 0.91 \quad (\text{Ec. 7})$$

Concentración de nitratos en base de tallos

Este método involucra la determinación de la concentración de nitratos (NO_3^-) en un extracto de la base del tallo principal (NBT) (González Montaner *et al.*, 1987; Justes *et al.*, 1997). En trigo, el extracto se obtiene por prensado de unas 60 bases del pseudotallo (vainas de hojas en estado de macollaje) por muestra. El NBT no refleja el flujo de absorción instantánea de nitratos, sino que representa un valor integrado del flujo de exportación de nitratos desde la raíz hacia los tallos durante los días precedentes a la determinación (Justes *et al.*, 1997). El nivel crítico de NBT debajo del cual el N es limitante para el cultivo varía según el estado de desarrollo del cultivo, la densidad de plantas y la condición edafo-climática por lo cual se requieren calibraciones locales. En Francia, se han indicado niveles críticos de 1500 a 2300 mg L^{-1} de NO_3^- .

Como este método no puede ser utilizado para efectuar recomendaciones de fertilización, se lo combinó con un método de balance de N conformando el método Jubil® (Justes *et al.*, 1994; Justes *et al.*, 1997). Básicamente, los pasos involucrados en el método Jubil® son los siguientes: 1) cálculo de las necesidades de N según el balance de N, 2) aplicación de una cantidad reducida de fertilizante nitrogenado en macollaje (Feekes 3) y el resto a "espiga 1 cm" (Feekes 5), 3) determinación de NBT durante la elongación del tallo (Feekes 6 a 8-9), y 4) una última aplicación de N si el nivel de NBT es inferior al nivel crítico.

Una alternativa para la determinación de NBT es el análisis del contenido de N-NO_3^- en pseudotallos al estado de macollaje pero en base seca (Papastylianou y Puckridge, 1983). En Argentina, Vigliezzi *et al.* (1996) encontraron umbrales de 4.47 $\text{g N-NO}_3^- \text{kg}^{-1}$ y 1.25 $\text{g N-NO}_3^- \text{kg}^{-1}$ en pseudotallos de trigo

para los estados apicales de “doble arruga” y “espiguilla terminal”, respectivamente, con esta metodología.

En maíz, la determinación de NBT permite evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo en distintos estados de desarrollo, con la posibilidad, en estados tempranos como V5-7, 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 (1997) indican un nivel crítico de 4500 mg L^{-1} . Sin embargo, trabajando en el sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, Ferrari *et al.* (2001) encontraron un nivel crítico, para alcanzar el 90% del rendimiento máximo, del orden de 1439 mg L^{-1} de NO_3^- . Trabajos realizados en el sudeste de Buenos Aires mostraron niveles críticos variables entre años y ensayos de $1200\text{-}2400 \text{ mg L}^{-1} \text{NO}_3^-$ (Sainz Rozas *et al.*, 2001). García *et al.* (2005) reportaron un nivel crítico de $2000 \text{ mg L}^{-1} \text{NO}_3^-$ para alcanzar el 90% del rendimiento máximo en ensayos realizados en el sur de Santa Fe y Córdoba. La elevada variabilidad observada en los umbrales críticos ha sido adjudicada fundamentalmente a diferencias en el manejo del cultivo y la humedad del suelo y radiación incidente, y limita el uso de la metodología a aquellos ambientes en los que se disponga de calibraciones locales actualizadas.

Las determinaciones sobre base seca en madurez fisiológica de maíz (R6) se indican como una alternativa para detectar cultivos que han recibido una oferta excesiva de N. 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 (Blackmer *et al.*, 1992). La concentración de NO_3^- incrementa linealmente con dosis de fertilización superiores a la óptima, lo cual permite distinguir situaciones en las cuales la dosis aplicada fue excesiva (Varvel *et al.*, 1997). Concentraciones de $400\text{-}800 \text{ mg kg}^{-1}$ han sido reportadas como suficientes para alcanzar rendimientos relativos de 90% del máximo (Binford *et al.*, 1992; Sainz Rozas *et al.*, 2001; Bianchini *et al.*, 2005).

Sensores espectrales y sensores remotos

Medidor de clorofila (Índice de verdor)

El medidor de clorofila Minolta SPAD 502 ® constituye una alternativa para el monitoreo del status de N, a través de la cuantificación no destructiva del verdor de la hoja. El SPAD determina la transmitancia de luz de la hoja a longitudes de onda de 650 y 940 nm. La longitud de onda larga es la referencia y tiene en cuenta factores relacionados al espesor de la hoja y su humedad, mientras que la transmitancia a la longitud de onda corta determina una medida relativa del contenido de clorofila (Blackmer y Scheepers, 1995). La lógica del medidor de clorofila se basa en las estrechas relaciones positivas que existen entre la intensidad del color verde de la hoja o índice de verdor (IV) y el contenido de clorofila de la misma, y entre éstas y la concentración de N en hoja. Al ser un método rápido, no destructivo y fácil de utilizar, permite realizar muestreos frecuentes y explorar en mayor medida la variabilidad en un sitio comparado con otros métodos. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el IV es afectado por numerosos factores como genotipos, estados de crecimiento, otros nutrientes, enfermedades o ataques de insectos, y condiciones ambientales como humedad y temperatura al momento de la medición. Numerosos estudios han demostrado variaciones del IV generadas por distintos genotipos de una misma especie, entre estados de crecimiento, independientemente de la aplicación de N, y por la disponibilidad hídrica (Schepers *et al.*, 1992; Strada y Echeverría, 1998; León *et al.*, 2001; Gandrup *et al.*, 2004). Por lo tanto, se puede afirmar que no existe un valor de IV crítico único que indique suficiencia de N en todos los cultivos, sitios, años y condiciones ambientales. Debido a esto, y para minimizar la influencia causada por los factores mencionados, se recomienda calibrar las lecturas SPAD estableciendo áreas de referencia con exceso de N para lograr una concentración máxima de clorofila en las hojas. A partir de las lecturas de IV en las áreas de referencia sin limitación de N, se estima un índice de suficiencia de N (ISN), que surge del cociente entre el IV del sector del lote o parcela a caracterizar y el IV del área sin limitación de N.

En trigo, el IV y el ISN diferencian las situaciones de deficiencia de N y se relacionan más estrechamente con los rendimientos a partir de fin de macollaje (Feekes 5 o Zadoks 30) en adelante (Fig. 7 y Tabla 3) (Fox *et al.*, 1994; Peltonen *et al.*, 1995; Gandrup *et al.*, 2004).

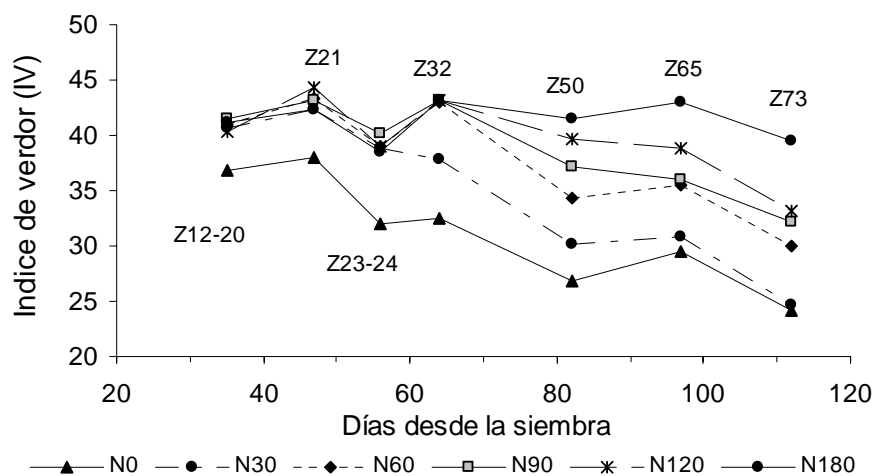


Figura 7. Evolución del índice de verdor (IV) en un ensayo realizado en Balcarce (Buenos Aires) durante el ciclo del cultivo de trigo 1997/98, para los tratamientos con 0 (N0), 30 (N30), 60 (N60), 90 (N90), 120 (N120) y 180 (N180) kg N ha⁻¹. Se indican los estados de desarrollo según Zadoks *et al.* (1974). Fuente: Gandrup *et al.* (2004).

Tabla 3. Relación entre el índice de verdor (IV) y el índice de suficiencia de N (ISN) en distintos estados de desarrollo del cultivo con el rendimiento en grano (Rto) para dos ensayos realizados en Balcarce (Buenos Aires). Se indican los estados de desarrollo según Zadoks *et al.* (1974). Fuente: Gandrup *et al.* (2004).

Estado	IV		ISN	
	Ecuación de regresión	R ²	Ecuación de regresión	R ²
Z 20	Rto= -55.5 x ² + 4969 x - 104632	0.59	Rto= -162680 x ² + 326318 x - 157396	0.28
Z 32	Rto= -33.7 x ² + 2896 x - 55857	0.68	Rto= - 57860 x ² + 116442 x - 52257	0.70
Z 50	Rto= -21.6 x ² + 1750 x - 28864	0.84	Rto= - 37217 x ² + 72560 x - 28805	0.84
Z 65	Rto= -24.0 x ² + 1959 x - 33357	0.71	Rto= - 40850 x ² + 78639 x - 31323	0.76
Z 73	Rto= -14.5 x ² + 1131 x - 15542	0.81	Rto= - 24005 x ² + 46981 x - 16434	0.80

En maíz, la sensibilidad de las mediciones no es lo suficientemente elevada al estado de 5-6 hojas desarrolladas para diferenciar niveles contrastantes de disponibilidad de N (Blackmer y Schepers, 1995; Sainz Rozas y Echeverría, 1998; Ferrari *et al.* 2000; Urricarriet y Zubillaga, 2001). 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 (Sainz Rozas y Echeverría, 1998). En ambientes controlados

de alta producción, Argenta *et al.* (2002, 2004) encontraron relaciones significativas entre el IV y los rendimientos de maíz aún en estados vegetativos, pero con una mayor variabilidad. Se puede concluir que esta metodología presenta mejores posibilidades de uso en estados avanzados, por lo cual se adapta mejor a planteos de maíz bajo riego.

Sensores remotos

Hay un creciente interés por desarrollar sistemas precisos y confiables de detección de las necesidades de N en el cultivo con el fin de eficientizar la producción de granos y minimizar el impacto de excesos de N sobre el medioambiente. Los sensores remotos sirven para obtener información sobre un objeto sin entrar en contacto con el mismo, y en agricultura se han usado, por ejemplo, para identificar cultivos, monitorear plagas y enfermedades, y efectuar censos agrícola-ganaderos.

Las imágenes aéreas y satelitales proporcionan información sobre el contenido de clorofila del cultivo (cantidad de reflexión de rojo y verde), y sobre la cantidad de vegetación viviente (cantidad de reflexión del infrarrojo cercano). Como la mayoría del N está contenido en la clorofila, hay una estrecha relación entre el N en la hoja y el contenido de clorofila de la misma. Las plataformas de imágenes aéreas, como las satelitales, proveen información sobre los cultivos, pero su baja resolución (20 m aproximadamente) y su dependencia de cielos descubiertos disminuyen la precisión de la información aportada. Por otro lado, la traducción de la información espacialmente variable contenida en las imágenes (intensidad y colores del suelo y cultivo), a las recomendaciones de manejo de cultivo requiere de considerable experiencia y habilidad. El contenido de clorofila en hojas depende de otros factores más allá del N, y por lo tanto es necesario asegurarse a campo que no haya otra limitante antes de hacer un diagnóstico. En el caso del maíz, por ejemplo, la deficiencia de N es la causa más frecuente de clorosis, seguida de ciertos micronutrientes cuando el pH del suelo es elevado.

En general, los sensores de cultivos combinan diferentes anchos de banda para representar un índice sensible al parámetro que se está evaluando. Por ejemplo, el índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI) se creó para evaluar el índice de área foliar y se representa como $NDVI = (NIR - rojo)/(NIR + rojo)$. Otro índice denominado Verde NDVI = $(NIR - verde)/(NIR + verde)$ es útil cuando el índice de área foliar (IAF) es superior a ~2.5 (Schepers, 2002). Esencialmente, la reflexión verde es más indicativa del status de N en cultivo cuando hay suficiente material vegetativo para absorber una mayor parte de la luz roja (vía fotosíntesis).

En un trabajo conducido en Argentina, Urricarriet y Zubillaga (2001) demostraron la utilidad de las fotos aéreas para diferenciar sitios con distintas disponibilidades de N en maíz al estado de grano pastoso (R4). En otro experimento conducido en Nebraska (EE.UU.), Osborne *et al.* (2004) usaron imágenes multispectrales aéreas para estimar rendimientos y deficiencias nutritivas en maíz, y observaron que el índice Verde NDVI fue el que tuvo la mayor correlación ($r=0.83$) con la biomasa vegetal en V5-V7, y con la concentración de N en planta de V14-R1 ($r=0.73$).

Con la llegada de la agricultura de precisión, surgió la necesidad de desarrollar instrumentos que sincronicen la demanda de N por parte del cultivo con la aplicación del fertilizante. Con este fin, se han desarrollado sensores terrestres montados en tractores o pulverizadoras de alto despeje que proveen datos de reflexión del cultivo en tiempo real. Varios trabajos realizados en Oklahoma (EE.UU.) y México por Raun *et al.* (2001) demostraron que los niveles de rendimiento actuales pueden predecirse a partir de mediciones NDVI que se realizaron en el trigo de invierno en la mitad de campaña. Más adelante, los mismos investigadores encontraron que la lectura NDVI de un sensor (GreenSeeker®; N Tech Industries, Inc.) tomada entre el estadio de crecimiento Feekes 5 a 7 (primer a segundo nudo), dividida por la cantidad de días desde la siembra hasta la medición, tuvo una buena predicción del rendimiento real. Los días fueron contados como Grados Día de Crecimiento (GDD;

$(T_{min} + T_{max})/2 - 4.4^{\circ}C$) que fueran superiores a 0. Esta metodología pudo predecir los rendimientos reales en lotes de distintas condiciones, como momento de siembra, precipitaciones, y momento de las mediciones (Fig. 8). El próximo paso fue el desarrollo de un método para calcular las dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar en la mitad de la campaña. El método consta de tres pasos (Raun *et al.*, 2002; Mullen *et al.*, 2003):

- Determinar un índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI) que estima el rendimiento potencial del cultivo,
- Estimar el índice de respuesta a N como el cociente entre el NDVI para una franja sin limitaciones de N y el NDVI del lote bajo estudio, y
- Determinar la cantidad de N a aplicar a través de un algoritmo que incluye el rendimiento potencial estimado del lote, el índice de respuesta a N, y un factor de eficiencia de uso de N aplicado.

Numerosos ensayos a campo han demostrado la validez del algoritmo y el buen desempeño de los sensores y su adaptación a sistemas de aplicación con dosis variables. Al mismo tiempo, se desarrollaron modelos de predicción de rendimiento para otros cultivos como maíz y pasto bermuda (Raun *et al.*, 2004).

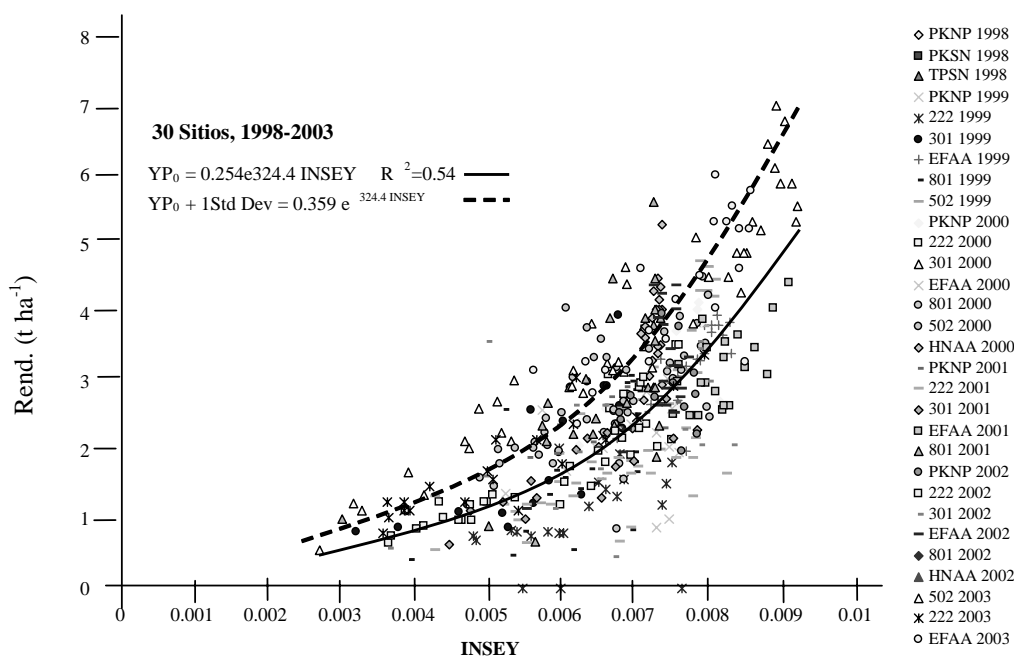


Figura 8. Relación entre el INSEY (rendimiento calculado en la mitad de la campaña) o NDVI dividido por la cantidad de días desde la siembra hasta la medición (donde GDD >0), y el rendimiento real del grano de trigo. La línea de puntos es igual a la línea sólida + 1 desviación estándar, para reflejar mejor el “rendimiento potencial” o el borde externo de las observaciones (Raun, et al. 2004).

En maíz, Melchiori *et al.* (2001) compararon aplicaciones de N uniformes y variables utilizando el N-Sensor® de Hydro. 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 están evaluando

actualmente los sensores Crop Circle® de Holland Scientific y GreenSeeker®, recientemente desarrollados en Nebraska y Oklahoma (EE.UU.), respectivamente (R. Melchiori, com. personal). En Nebraska, Solari *et al.* (2005) midieron el alcance de la luz emitida por estos dos sensores en maíz mediante defoliaciones desde la base o desde la punta de la planta, y observaron que los sensores no penetran más allá de 5 a 6 hojas de la planta, que las mediciones de los sensores son proporcionales a la biomasa del maíz, y que ambos sensores diferenciaron bien las plantas con alta y baja disponibilidad de N.

Los sensores de cultivos, si bien todavía se encuentran en la etapa de experimentación, podrían ser una herramienta útil y económica en la aplicación variada de N en tiempo real.

Modelos de simulación agronómica (MSA)

Los MSA constituyen una herramienta muy promisoriosa para el manejo eficiente del N en el sistema suelo-planta ya que integran los factores de suelo, clima y manejo que afectan la dinámica de N y el crecimiento y rendimiento del cultivo. Los MSA permiten diagnosticar situaciones de deficiencia de N del cultivo y generan información sobre las probabilidades de respuesta a dosis y momentos de aplicación de N para el mismo escenario. Existe abundante literatura sobre los MSA y trabajos en los cuales se destaca su utilización para el diagnóstico de deficiencias de N y la recomendación de fertilización (Smith *et al.*, 1996; Jeuffroy y Recous, 1997; González Montaner *et al.*, 1997; Maddoni, 1997; de Willigen, 2001; Satorre *et al.*, 2001).

El trabajo desarrollado por Satorre *et al.* (2001) permitió generar el software Triguero (FAUBA-AACREA, 2005), un sistema interactivo para apoyar la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo de trigo en la región pampeana argentina de acuerdo a las condiciones de clima, suelo, cultivar y disponibilidad hídrica inicial. La Figura 9 muestra una salida del software en la que se simulan rendimientos, promedios para una serie histórica climática, suelo y agua a la siembra determinados, con distintas disponibilidades iniciales de N. A partir de esta información, se pueden estimar las necesidades de aplicación de N para una determinada respuesta en rendimiento y generar una recomendación de fertilización.

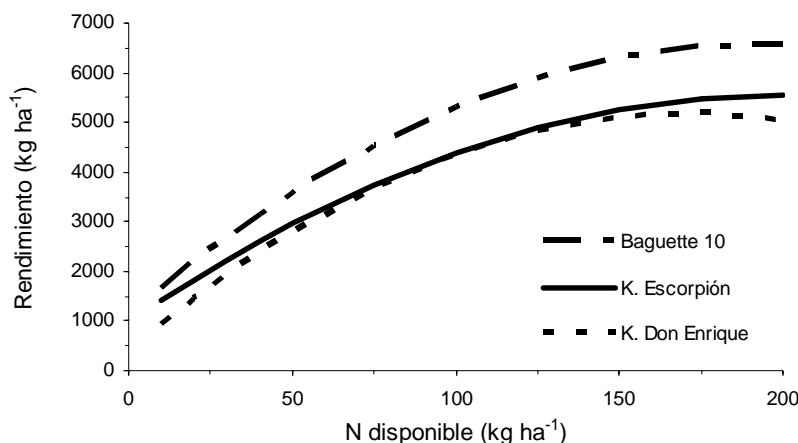


Figura 9. Rendimiento simulado de trigo para tres variedades en función de la disponibilidad de N a la siembra en un suelo Serie Bragado con disponibilidad de agua a la siembra a capacidad de campo para una serie climática de la localidad de 9 de Julio (Buenos Aires). Rendimientos simulados con el software Triguero desarrollado por la Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires) y AACREA (Satorre *et al.*, 2001).

En maíz, 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 $N-NO_3^-$ a una profundidad de 60 cm 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 Figura 10 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.

LOCALIDAD: JUNÍN SERIE: Santa Isabel DK 752
 Baja ← MATERIA ORGÁNICA → Alta

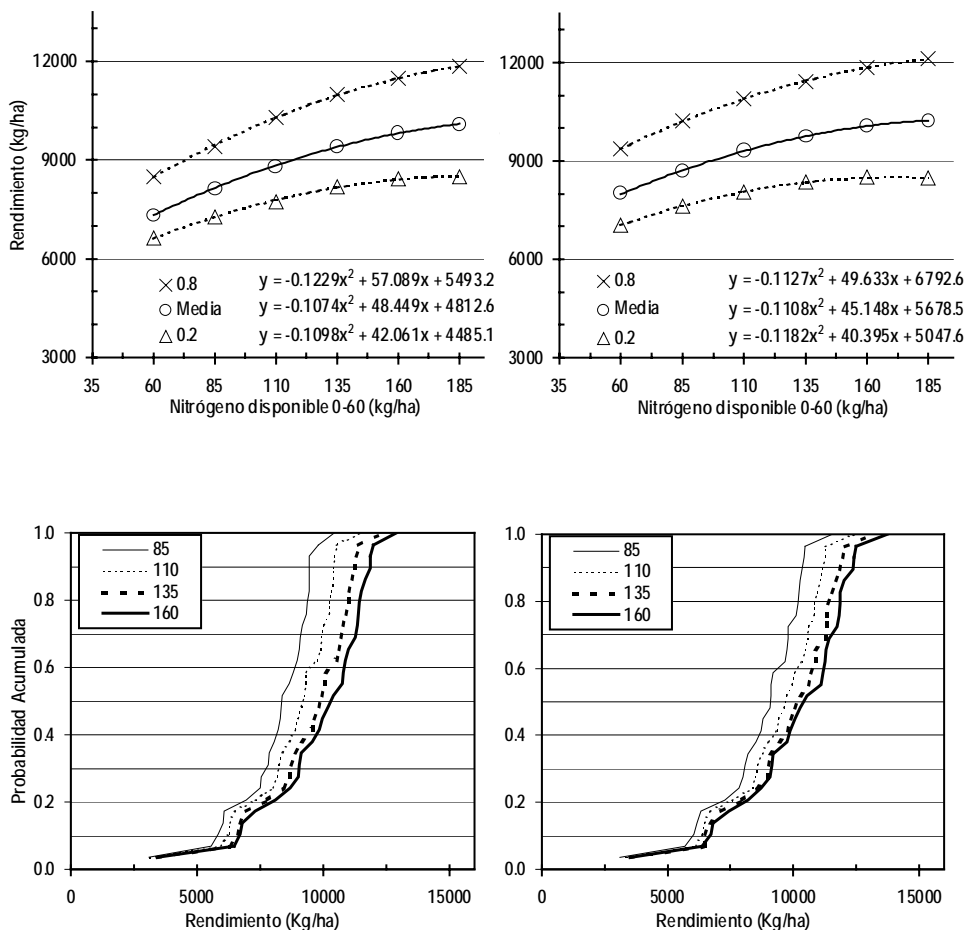


Figura 10. Relación entre el rendimiento de maíz y la disponibilidad de $N-NO_3^-$ a 0-60 cm con el 20%, 50% y 80% de probabilidad (figuras superiores) y distribución de probabilidad acumulada de rendimientos para cuatro planteos de disponibilidad inicial de N (figuras inferiores). Modelo GECER, Localidad 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).

Comentarios finales

El diagnóstico de las necesidades de fertilización nitrogenada es un aspecto esencial para alcanzar elevadas eficiencias de uso de N en los sistemas de producción. Las metodologías descritas en este escrito presentan diferentes alternativas para cultivos de grano, y su mayor o menor utilidad dependerá de la disponibilidad de calibraciones locales o zonales. La calibración local o zonal permite ajustar las variables a las condiciones edáficas, climáticas y de manejo de suelo y de cultivo propias, y es imprescindible para lograr un diagnóstico adecuado para cada lote o zona de manejo.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez R., H. Steinbach, C. Alvarez y S. Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas* 18:14-19. INPOFOS Cono Sur, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Amado T. Y J. Mielniczuk. 2000. Estimativa da adubacao nitrogenada para o milho em sistemas de manejo e culturas de cobertura do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 24:553-560.
- 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.
- Argenta G., P. Ferreira da Silva, J. Mielniczuk y C. Bortolini. 2002. Parametros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. *Pesq. Agropec. Bras.* 37 (4): 519-527.
- Argenta G., P. Ferreira da Silva, y L. Sangoi. 2004. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. *Ciência Rural* 34 (5):1379-1387. Santa Maria, RS, Brasil.
- Baethgen, W. y M. Alley. 1989. Optimizing soil and fertilizer nitrogen use by intensively managed winter wheat: II: Critical levels and optimum rates of nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 81:120-125.
- Barberis L., A. Nervi, H. del Campo, S. Urricariet, J. Sierra, P. Daniel, M. Vazquez y D. Zourarakis. 1983. Análisis de la respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada en la Pampa Ondulada y su predicción. *Ciencia del suelo* 1:51-64.
- 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. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo de trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA-Balcarce. *Boletín Técnico* No. 128. EEA INTA Balcarce.
- Bianchini A., M.E. Magnelli, D. Canova, S.N. Lorenzatti, D. Peruzzi, J. Rabasa, A. Sylvestre Begnis y F.O. García. 2005. Diagnóstico de Fertilización Nitrogenada para Maíz en Siembra Directa. *Actas VIII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA-Maizar*. Rosario, 16-18 Noviembre 2005. pp. 230-233.
- Binford G., A. Blackmer y B. Meese. 1992. Optimal concentrations of nitrate in cornstalks at maturity. *Agron. J.* 84:881-887.

- Blackmer A., T. Morris y G. Binford. 1992. Advances in Iowa. *In* Predicting N fertilizers needs for corn in humid regions. B. Bock y K. Kelly (ed.). Bulletin Y-226. TVA/NFERC-92/2. Tennessee Valley Authority- National Fertilizer and Environmental Research Center. Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
- Blackmer A., R. Voss y A. Mallarino. 1997. Nitrogen fertilizar recommendations for corn in Iowa. PM-1714. University Extensión, Iowa State University. Ames, Iowa, EE.UU.
- Blackmer, T.M. y J.S. Schepers. 1995. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J. Prod. Agric.* 8:56-60.
- Blanco, H., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Houssay, G. Deza Marin, A. Berardo y F. García. 2004. Red de Ensayos en Nutrición de Cultivos Región CREA Sur de Santa Fe-Resultados de la campaña 2003/04: Trigo. Simposio Fertilidad 2004. Rosario, 22-23 Abril 2004. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Bordoli J.M. y C.H. Perdomo. 2005. Balance de nutrientes y principales criterios de fertilización de cultivos en Uruguay. Actas CD Simposio Binacional Uruguay-Argentina "Impacto de la intensificación agrícola en el recurso suelo". Colonia, Uruguay, 6-7 Octubre 2005.
- Bull L. y H. Cantarella. 1993. Cultura do milho. POTAFOS. Piracicaba, SP, Brasil. 301 p.
- Bundy, L.G. y T.W. Andraski. 1995. Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests. *J. Prod. Agric.* 8:561-568.
- Bundy L., M. Schmitt y G. Randall. 1992. Advances in the Upper Midwest. *In* Predicting N fertilizers needs for corn in humid regions. B. Bock y K. Kelly (ed.). Bulletin Y-226. TVA/NFERC-92/2. Tennessee Valley Authority- National Fertilizer and Environmental Research Center. Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
- Calviño P. y H. Echeverría. 2003. Incubación anaeróbica del suelo como diagnostico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo.* 21:24-29.
- Campbell, C., R. Zentner, F. Selles, B. McConkey y F. Dyck. 1993. Nitrogen management for spring wheat grown annually on zero-tillage: Yields and nitrogen use efficiency. *Agron. J.* 85:107-114.
- Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC. 1997. Recomendações de adubação e de galagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3ª Ed. SBCS, Nucleo Regional Sul. Santa Maria, RS, Brasil.
- Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo. 1998. Recomendações da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo. XXX Reunião da Comissão Sul-Brasileira de Pesquisa de Trigo. Chapecó, SC, 24-26 Marco 1998. 82 p.
- Curtin, D., y F.M. McCallum. 2004. Biological and chemical assays to estimate nitrogen supplying power of soils with contrasting management histories. *Australian J. Soil Research.* 42:737-747
- Dersch, G., M. Pfeffer, O.H. Dannebert. 2003. Determination of the N mineralization potential of different soils by anaerobic incubation as calibrated in a pot-experiment. *Bodenkultur* 52:69-81.
- de Willingen P. 2001. The use of modelling to improve the effectiveness of fertiliser recommendations. Proc. No. 473. International Fertiliser Society, York, UK. pp. 1-20.

- Echeverría, H.E., P.A. Barbieri, H. Sainz Rozas y F. Covacevich. 2004. Métodos de diagnóstico de requerimiento de nitrógeno en trigo en el sudeste bonaerense. Actas Congreso A Todo Trigo. Mar del Plata, 13-14 Mayo 2004. Federación de Centros y Entidades Gremiales de Acopiadores de Cereales. Mar del Plata, Argentina.
- Echeverría, H. y R. Bergonzi. 1995. Estimación de la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. Boletín Técnico 135. EEA INTA Balcarce, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, H., P. Calviño y M. Redolatti. 2001. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada y fosfatada bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. Jornada de Actualización Profesional en el Cultivo de Trigo, 18. Mar del Plata, Abril 2001. EEA INTA Balcarce-FCA Balcarce-CIAM. Mar del Plata, Argentina.
- Echeverría H. y H. Sainz Rozas. 2005. Maíz. In H. Echeverría y F. García (ed.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA. Buenos Aires. pp. 255-282.
- FAUBA-AACREA. 2005. Software Triguero (CD). Facultad de Agronomía (UBA)-AACREA. Buenos Aires, Argentina. Disponible en www.aacrea.org.ar.
- 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., F. Rimatori, G. Ferraris, J. Ostojic, M. Galetto y R. Gómez. 2001. 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.
- Follet R.F., D.R. Keeney y R.M. Cruse. 1991. Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. SSSA. Madison, Wisconsin (E.U.A.).
- Fowler, D., J. Brydon y R. Baker. 1989. Nitrogen fertilization of no-till winter wheat and rye. I. Yield and agronomic responses. Agron. J. 81:66-72.
- Fox, R. H., and W. P. Piekielek. 1984. Relationships among anaerobically mineralized nitrogen, chemical indexes, and nitrogen availability to corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:1087-1090.
- Fox, R., W. Piekielek y K. Macneal. 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 25(3-4):171-181.
- Fox, R.H., G.W. Roth, K.V. Iversen y W.P. Piekielek. 1989. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. Agron. J. 81:971-974.
- Gandrup, M.E., F. García, K. Fabrizzi y H. Echeverría. 2004. Evolución de un índice de verdor en hoja para evaluar el status nitrogenado en trigo. Rev. Inv. Agropecuarias 33 (3):101-117.
- García F. y A. Berardo. 2005. Trigo. In H. Echeverría y F. García (ed.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA. Buenos Aires. pp. 233-253.
- García F.; Boxler M.; Minteguiaga J.; Blanco H.; Houssay R.; Deza Marín G. y Berardo A. 2005. Efectos directos y residuales de la fertilización en maíz: Resultados de la red de nutrición CREA

- sur de Santa Fe. Actas VIII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA-Maizar. Rosario, 16-18 Noviembre 2005. pp. 154-157.
- García, F.O., K.P. Fabrizzi, A. Berardo y F. Justel. 1998. Fertilización nitrogenada de trigo en el sudeste bonaerense: Respuesta, fuentes y momentos de aplicación. Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16. Carlos Paz, 4-7 Mayo 1998. AACCS. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- 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.
- 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. AACCS. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- González Montaner J., y M. Di Napoli. 1997. 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., M. Di Nápoli, P. Calviño, N. Mailland, M. Posborg, F. Dodorico y J. Andenoché. 2003. Nitrógeno en trigo. Revista de los CREA. 272:56-59.
- González Montaner, J., G. Maddoni y M.R. Di Napoli. 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. Field Crops Res. 51:241-252.
- González Montaner, J., G. Maddonni, N. Mailland y M. Porsborg. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). Ciencia del Suelo 9:41-51.
- González Montaner, J., J.M. Meynard y B. Mary. 1987. Contrôle de la nutrition azote du blé par l'analyse des teneurs en nitrates dans la plante. C.R. Acad. Agric. Fr. 73(3):105-115.
- Greenwood, D., G. Lemaire, G. Gosse, P. Cruz, A. Draycott y J. Neeteson. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. Ann. Bot. 66:426-436.
- Hergert G. 1987. Status of residual nitrate-nitrogen soil tests in the United States of America. In Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation. J. R. Brown (ed.). SSSA Spec. Pub. No. 21. SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Jeuffroy, M. y S. Recous. 1997. Modelling the changes in crop N requirements and soil N supply for wheat over time: A tool for decision making in fertilization strategy. Pp. 111-116. In: G. Lemaire y I. Burns (eds) Diagnostic procedures for crop N management. INRA Editions. Paris, Francia.
- Jones, J.B. 1998. Plant Nutrition Manual. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Justes, E., B. Mary y J. Meynard. 1997. Evaluation of a nitrate test indicator to improve the nitrogen fertilization of winter wheat crops. Pp. 93-110. In: G. Lemaire y I. Burns (eds) Diagnostic procedures for crop N management. INRA. Paris, Francia.
- Justes, E., B. Mary, J. Meynard, J. Machet y L. Thelier-Huche. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. Ann. Bot. 74:397-407.

- Keeney, D.R., y J.M. Bremner. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agron. J.* 58:498-503.
- Khan, S.A., R.L. Mulvaney y R.G. Hoelt. 2001. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1751-1760.
- Large, E. 1954. Growth stages of cereals. Illustration of Feekes scale. *Plant Pathol.* 3:128-129.
- León, M., M.F. Dreccer y D. Rodríguez. 2001. Estimación del N foliar utilizando el SPAD en trigo creciendo con deficiencia de agua y de nitrógeno. [CD rom]. Congreso Nacional de Trigo, 5 y Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño - Invernal, 3. Carlos Paz, Setiembre 2001. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Loewy T. 1990. Fertilización nitrogenada del trigo en el Sudoeste bonaerense. I. Respuesta física y diagnóstico. *Ciencia del Suelo* 8:47-56.
- Maddoni, G. 1997. Los requerimientos de nitrógeno y la fertilización del cultivo de trigo. p. 1-9. En: *Suplemento Trigo. Fertilizar, Buenos Aires, Argentina.*
- MAFF. 2000. Fertiliser recommendations for agricultural and horticultural crops (RB209). 7th edition. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. The Stationary Office Ltd. Norwich, UK. 177pp. ISBN 0112430589.
- Magdoff F. R., D. Ross y J. Amdon. 1984. A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1301-1304.
- Malavolta, E., G. Vitti y S. de Oliveira (eds). 1997. *Avaliaco do estado nutricional das plantas. 2ª Ed. POTAFOS. Sao Paulo, Brasil.*
- Meisinger J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil-crop systems. *In* R. Hauck (ed.). *Nitrogen in crop production. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin (E.U.A.).*
- Meisinger J. J., F. Magdoff y J. Schepers. 1992. Predicting N fertilizers needs for corn in humid regions: Underlying principles. *In* Predicting N fertilizers needs for corn in humid regions. B. Bock y K. Kelly (ed.). Bulletin Y-226. TVA/NFERC-92/2. Tennessee Valley Authority- National Fertilizer and Environmental Research Center. Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
- 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.
- Mengel, K., B. Schneider, y H. Kosegarten. 1999. Nitrogen compounds extracted by electroultrafiltration (EUF) or CaCl₂ solution and their relationships to nitrogen mineralization in soils. *J. Plant Nutrition and Soil Sci.* 162:139-148.
- Mercau J., E. Satorre, M. Otegui, G. Maddoni, J. Carcova, R. Ruiz, M. Uribelarra 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.

- Mullen, R., K. Freeman, W. Raun, G. Johnson, M. Stone y J. Solie. 2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agron. J.* 95:347-351.
- Mulvaney, R.L., S.A. Khan, R.G. Hoefl y H.M. Brown. 2001. A soil organic fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1164-1172.
- Neeteson J.J. 1990. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fert. Res.* 26:291-298.
- Novello P., A. Legassa y M. Peretti. 1986. Evaluación conjunta de la fertilización y factores de productividad que explican la variación de los rendimientos en el cultivo de trigo. Primer Congreso Nacional de Trigo. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires.
- Osborne, S.L., J.S. Schepers y M.R. Schlemmer. 2004. Detecting nitrogen and phosphorus stress in corn using multi-spectral imagery. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 35:505-516.
- Papastylianou I. y D. Puckridge. 1981. Nitrogen nutrition of cereals in short term rotation. Stem nitrate as an indication of nitrogen availability. *Aust. J. Agric. Res.* 32:713-723.
- Papastylianou, I. y D. Puckridge. 1983. Stem nitrate nitrogen and yield of wheat in a permanent rotation experiment. Stem nitrate as an indication of nitrogen availability. *Aust. J. Agric. Res.* 34:599-606.
- Parkin T. 1984. Soil microsites as a source of denitrification variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1194-1199.
- Peltonen, J., A. Virtanen y E. Haggren. 1995. Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively-managed small-grain cereals. *J. Agron. Crop Sci.* 174:309-318.
- Raun, W., J. Solie, G. Johnson, M. Stone, E. Lukina, W. Thomason y J. Schepers. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.* 93:131-138.
- Raun, W., J. Solie, G. Johnson, M. Stone, R. Mullen, K. Freeman, W. Thomason y E. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 94:815-820.
- Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.W. Freeman, K.L. Martin, R. Teal, B. Arnall, B. Tubana, C. Byungkyun, K.B. Morris, K. Girma, S. Moges y C. Mack. 2004. Cómo aumentar la eficiencia de uso del nitrógeno del cereal utilizando un sensor basado en tecnología. Congreso Nacional de AAPRESID, 12, Rosario, de 10-13 de Agosto de 2004. AAPRESID. Rosario (Santa Fe), Argentina.
- Rice, C. y J. Havlin. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. Pp. 1-13. In: J. Havlin y J. Jacobsen (eds) *Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations*. SSSA Spec. Pub. 40. SSSA. Madison, WI, USA.
- 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).
- Roth, G., R. Fox y H. Marshall. 1989. Plant tissue tests for predicting nitrogen fertilizer requirements of winter wheat. *Agron. J.* 81:502-507.

- Ruffo, M.L., D.G. Bullock, R.G. Hoefl y G.A. Bollero. 2005. Spatial variability of the Illinois Soil Nitrogen Test: Implications for soil sampling. *Agron. J.* 97:1485-1492.
- 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 nitrogenada de cultivos de maíz en el norte de la provincia de Buenos Aires. *Actas VI 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 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.
- Satorre, E., R. Ruiz, D. Miralles, D. Calderini y G. Maddoni. 2001. Bases de decisión para la fertilización nitrogenada en las zonas Norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe y Centro de AACREA. Pp. 30-38. En: Cuadernillo de Actualización Técnica 63. AACREA. Buenos Aires, Argentina.
- Sawyer J. y E. Nafziger. 2005. Regional approach to making nitrogen fertilizer rate decisions for corn. North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference. 16-17 Noviembre, 2005. Des Moines, Iowa, EE.UU.
- Scharf, P. y M. Alley. 1993. Spring nitrogen in winter wheat. II: A flexible multicomponent rate recommendation system. *Agron. J.* 85:1186-1192.
- Schepers, J.S. 2002. Manejo de nitrógeno: Nuevas tecnologías para el manejo y diagnóstico de la fertilización nitrogenada. Congreso Nacional de AAPRESID, 10, Rosario, 13-16 de Agosto de 2002. AAPRESID. Rosario (Santa Fe), Argentina.
- Schepers J. S., T. Blackmer y D. Francis. 1992. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: Using chlorophyll meters. *In Predicting N fertilizers needs for corn in humid regions.* B. Bock y K. Kelly (ed.). Bulletin Y-226. TVA/NFERC-92/2. Tennessee Valley Authority- National Fertilizer and Environmental Research Center. Muscle Shoals, Alabama, EE.UU.
- Schepers, J. y J. Meisinger. 1994. Field indicators of nitrogen mineralization. Pp. 31-47. In: J. Havlin y J. Jacobsen (eds) *Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations.* SSSA Spec. Pub. 40. SSSA. Madison, WI, USA.
- Senigaglia C., R. García y M. L. de Galetto. 1984. Evaluación de la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada y fosfatada en el area centro-norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. III Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires.
- Sims, J.T., B.L. Vasilas, K.L. Gartley, B. Milliken y V. Green. 1995. Evaluation of soil and plant nitrogen test for Maize on manured soils of atlantic coastal plain. *Agron. J.* 87:213-222.

- Smith, J., N. Bradbury y T. Addiscott. 1996. SUNDIAL: A PC-based system for simulating nitrogen dynamics in arable land. *Agron. J.* 88:38-43.
- Solari, F., P.J. Hodgen, J. Shanahan, S. Kang, y J. Schepers. 2005. Effect of canopy depth on estimates of corn biomass and N status using active sensors. *Agron. Abstr. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.*
- Stanford, G., and S.J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potential of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:465-472.
- Strada, R.A. y H.E. Echeverría. 1998. Comparación del contenido de clorofila en cultivares de trigo pan. Congreso Nacional de Trigo, 4 y Simposio Nacional de Cereales de Siembra Otoño – Invernal, 2. Mar del Plata, Noviembre 1998. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Sumner M. 2001. Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. *Archivo Agronómico No. 5. Informaciones Agronómicas del Cono Sur 9: 1-8. INPOFOS Cono Sur. Argentina.*
- Thicke F. E.; M. P. Russelle ; O. B. Hesterman ; and C. C. Sheaffer. 1993. Soil nitrogen mineralization indexes and corn response in crop rotations. *Soil science. Vol. 156, No5, pp. 322-335 (1 p.1/2)*Gambaudo S. y H. Fontanetto. 1996. Fertilización. En *Maíz. Información para Extensión. EEA INTA Rafaela. Santa Fe.*Uhart S. y F. Andrade. 1996. Curva de dilución de N y fertilización nitrogenada en maíz. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. Luján, Mendoza. Pp. 448-449.
- Uhart, S.A. y H.E. Echeverría 2002. Diagnóstico de la fertilización. p. 239-272. En: Andrade, F.H. y V. Sadras (eds.). *Bases para el manejo de maíz, girasol y soja. INTA Balcarce-Facultad de Ciencias Agrarias. Balcarce, Argentina.*
- 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.
- 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. AACCS. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.*
- Varvel G., J. Schepers, y D. Francis. 1997. Chlorophyll meter and stalk nitrate techniques as complementary indices for residual nitrogen. *J. Prod. Agric.* 10:147-151.
- Vaughan, B., D. Westfall, K. Barbarick y P. Chapman. 1990. Tissue nitrogen levels for dryland hard red winter wheat. *Agron. J.* 82:561-565.
- Vigliezzi, A., H. Echeverría y G. Studdert. 1996. Nitratos en seudotallos de trigo como indicador de la disponibilidad de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 14(2):57-62.
- Vitosh M., J. Johnson y D. Mengel. 1996. Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. *Extension Bulletin E-2567. Michigan State University. East Lansing, Michigan, EE.UU.*
- 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.
- Ward, R., D. Whitney y D. Westfall. 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing small grains. Pp. 329-348. In: L. Walsh y J. Beaton (eds) *Soil Testing and Plant Analysis*. SSSA, Madison, WI, USA.
- Williams, J.D., C.R. Crozier, J.G. White, and D.A. Crouse. 2005. Amino sugar nitrogen test to predict nitrogen fertilizer rates in corn. *Agron. Abstr. ASA-CSSA-SSSA*, Madison, WI.
- Zadoks, J., T. Chang y C. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14:415-421.