

# DOSIS ÓPTIMA ECONÓMICA DE NITRÓGENO EN MAÍZ BAJO SIEMBRA DIRECTA EN EL SUDESTE BONAERENSE

A PAGANI; HE ECHEVERRÍA; HR SAINZ ROZAS & PA BARBIERI

Unidad Integrada (UIB) Fac. Ciencias Agrarias (UNMdP) – EEA INTA Balcarce, CC.276, (7620), Balcarce, Argentina.  
E-mail: paganiagustin@hotmail.com

Recibido: 20/12/07

Aceptado: 18/06/08

## RESUMEN

La fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz es una práctica habitual en el SE bonaerense, sin embargo es escasa la información local para definir la dosis de nitrógeno (N) que responde al máximo beneficio económico. El objetivo de este trabajo fue determinar la dosis óptima económica (DOE) del fertilizante nitrogenado para el cultivo de maíz bajo SD en el SE bonaerense, seleccionando el modelo matemático y momento de fertilización más adecuado. Además, se comparó el efecto de la relación de precios N-grano de maíz y la potencialidad del año sobre la definición de la DOE. Se utilizó información de 23 experimentos de fertilización nitrogenada, 15 al momento de la siembra (SI) y 8 en el estadio de seis hojas (V6), para el período 1994-2005 con condiciones ambientales contrastantes (años con diferente potencialidad). Si bien no se determinó un criterio estadístico para seleccionar el modelo más apropiado, el cuadrático-plateau arrojó los resultados más racionales desde el punto de vista agronómico. Para el modelo cuadrático-plateau, se observó que el efecto de la potencialidad del año produjo variaciones en la DOE de 59 y 54 kg N ha<sup>-1</sup> para el momento de SI y V6, respectivamente; mientras que el efecto de la relación de precios produjo variaciones tan solo de 30 y 23 kg N ha<sup>-1</sup> para el momento de SI y V6, respectivamente. Se concluye que el modelo cuadrático-plateau produce los resultados de mayor racionalidad agronómica. Además, el estadio de V6 se mostró como el momento más apropiado para la fertilización tanto desde la perspectiva económica como ambiental y la potencialidad del año condicionó la DOE en mayor medida que la relación de precios.

**Palabras clave.** Maíz, nitrógeno, siembra directa, dosis óptima económica.

## ECONOMIC OPTIMAL NITROGEN RATE FOR CORN UNDER NO-TILLAGE IN SOUTHEAST BUENOS AIRES PROVINCE

### ABSTRACT

Nitrogen fertilization in corn under no-till is a common practice in SE Buenos Aires Province; however, there is insufficient local information to define the nitrogen (N) rate that corresponds to the maximum economic benefit. The aim of this work was to optimize the economic nitrogen rate (DOE) for corn under no-tillage using an improved mathematical model and by choosing the best moment for N fertilization. In addition, the effect of N-corn grain price and year potentiality was compared to the DOE. Data was obtained from 23 N fertilization experiments which took place from 1994 to 2005 and had contrasting environmental conditions (years with different potentiality). Fifteen of these experiments had N applied at planting (SI) and 8 at the six-leaf stage (V6). A statistical criterion to select the best model for defining the DOE was not found; the quadratic-plateau model presented the most conservative results from an agronomic point of view. For the quadratic-plateau model, the year potentiality effect produced variations in the DOE of 59 and 54 kg N ha<sup>-1</sup> for SI and V6, respectively; whereas the price relationship effect produced variations of 30 and 23 kg N ha<sup>-1</sup> for SI and V6, respectively. In conclusion, the year potentiality affected the DOE more than the N-corn grain price relationship and the six-leaf stage appeared to be the most appropriate moment for N fertilization taking into account economic and environmental aspects.

**Key word.** Corn, nitrogen, no-tillage systems, economic optimal rate.

## INTRODUCCIÓN

El SE bonaerense se caracteriza por contar con suelos de muy buena aptitud y clima templado-frío que acorta la estación de crecimiento de los cultivos estivales. Estas características hacen que dicha zona difiera considera-

blemente del resto de la Región Pampeana y determina que los materiales genéticos de maíz utilizados posean ciclos de crecimiento intermedios a cortos que se adaptan a la estación de crecimiento y al período libre de heladas de alrededor de 150 días (Andrade, 1995). El maíz

presenta una gran importancia en los sistemas productivos del SE bonaerense debido a que constituye un componente clave de las rotaciones agrícolas (Domínguez *et al.*, 2005). Dicho cultivo realiza grandes aportes de residuos orgánicos al suelo, mejorando el balance de carbono del mismo (Janzen, 2006) y por lo tanto, contribuye al mantenimiento de su calidad. Además, en el SE bonaerense, se ha producido un incremento de la superficie sembrada con maíz bajo siembra directa (SD) debido a ventajas operativas, en el almacenamiento de agua y en la conservación del recurso suelo, entre otras (Tellería, 1996; Rizzali, 1998).

La adopción del maíz dentro de los planteos productivos está mayoritariamente condicionada por la rentabilidad que el cultivo le aporta a la empresa agropecuaria. En este sentido, la relación de precios entre el N y el grano de maíz cobra gran relevancia en la definición de los niveles de N a aplicar (Álvarez *et al.*, 2003). Teniendo en cuenta que los fertilizantes nitrogenados tienen una alta importancia relativa dentro del costo de producción, se hace necesario contar con herramientas locales que permitan determinar la dosis óptima económica (DOE), es decir, la cantidad de insumo (fertilizante nitrogenado) que maximiza la renta de este cultivo. El diagnóstico de requerimiento de nitrógeno (N) en maíz más utilizado se basa en la determinación del contenido de N como nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) hasta los 60 cm de profundidad antes de la siembra (Ruiz *et al.*, 2001). Sin embargo, también se ha propuesto como alternativa superadora la determinación de  $\text{N-NO}_3^-$  a una profundidad de 30 cm al estadio de seis hojas (V6) (Ritchie & Hanway, 1992). En estos trabajos se asume que el N disponible en el suelo es equivalente al aportado por el fertilizante o sea que su valorización es similar. A su vez, se ha demostrado una mayor eficiencia de recuperación del N cuando las aplicaciones se realizan en este estadio fenológico (Sainz Rozas *et al.*, 2004).

Frecuentemente, los trabajos de investigación generan abundante información acerca de la relación entre el rendimiento relativo y el contenido de N en suelo al momento de la siembra o al estadio de V6 (estudios de calibración), pero no se cuenta con información que permita calcular la DOE teniendo en cuenta el N disponible en el suelo. Tanto para las calibraciones de análisis de suelo como para el cálculo de la DOE se recurre a distintos modelos de respuesta a la aplicación de N. Estos, frecuentemente no coinciden en la identificación de este nivel objetivo (Nelson *et al.*, 1985; Barreto & Westerman, 1987). Para seleccionar el mejor modelo de respuesta se emplean distintos criterios: estadísticos, de conveniencia de cálculo o agronómicos.

El objetivo de este trabajo fue determinar la DOE de fertilizante nitrogenado para el cultivo de maíz bajo SD

en el SE bonaerense, seleccionando el modelo matemático y momento de fertilización más adecuado. Además, se comparó el efecto de la relación de precios N-grano de maíz y la potencialidad del año sobre la definición de la DOE.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se realizaron estimaciones del nivel de N (NN) óptimo económico basado en funciones de respuesta del cultivo de maíz a la disponibilidad de N al momento de la siembra (SI) o al estadio de V6, según la potencialidad del año y la relación de precios N/grano de maíz. El NN se define como los  $\text{kg N ha}^{-1}$  presentes en el suelo más los aplicados en forma de fertilizante y se asume que la valorización de ambos es equivalente. La DOE se determina como la diferencia entre el NN y la disponibilidad de N edáfica de 0-60 o 0-30 cm, para SI y V6, respectivamente. La información utilizada provino de 23 ensayos de fertilización nitrogenada realizados en el SE bonaerense (partidos de Gral. Pueyrredón, Balcarce y Tandil) por el Grupo de Suelos de la Unidad Integrada (INTA-FCA) Balcarce, entre los años 1996 y 2007 (Tabla 1). Las poblaciones de datos cubrieron una amplia gama de condiciones meteorológicas y de fertilidad de suelos con el fin de contemplar diversos escenarios productivos. Los conjuntos de datos obtenidos representan un abanico de respuestas en rendimiento a la disponibilidad y aplicación de N, no siendo otros nutrientes como fósforo y azufre limitantes, ya que se aseguró adecuada disponibilidad de los mismos. La fuente de N fue urea granulada aplicada al voleo en cobertura total. En los ensayos en los cuales las condiciones meteorológicas atentaban contra la supervivencia del cultivo, se recurrió a la aplicación de láminas de agua de entre 30 y 50 mm para permitir sobrellevar dicho estrés. De esta forma se aseguró la continuidad de los ensayos por lo que el rendimiento máximo estuvo determinado principalmente por las precipitaciones.

Se ajustaron tres modelos matemáticos de respuesta a las poblaciones de datos de rendimiento en función del NN: lineal-plateau, cuadrático y cuadrático-plateau.

El modelo lineal-plateau es definido como:

$$Y = a + bX \quad \text{si } X < C$$

$$Y = P \quad \text{si } X > C$$

donde Y es el rendimiento en grano expresado al 14% de humedad ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y X es el NN ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); a (ordenada al origen), b (coeficiente lineal), C (NN crítico, donde ocurre la intercepción entre la fase de respuesta lineal y el plateau) y P es el rendimiento plateau.

El modelo cuadrático es definido como:

$$Y = a + bX + cX^2$$

Tabla 1. Información descriptiva de los sitios experimentales para el análisis a la siembra (SI) y en 6 hojas expandidas (V6). MO: materia orgánica (0-20 cm) (Walkley, Black 1934), pH: determinado con electrodo de vidrio en suspensión de 1:2,5 suelo/agua (0-20cm), P: fósforo disponible (0-20) (Bray, Kurtz, 1945), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitrógeno como nitratos.

Table 1. Soil description of the experimental sites at the planting (SI) and six-leaf stages (V6). MO: organic matter (0-20 cm) (Walkley, Black 1934), pH: determined with a glass electrode in a suspension of 1:2.5 soil:water ratio (0-20 cm), P: available phosphorous (0-20) (Bray, Kurtz, 1945), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitrogen as nitrates.

Ensayo	Campaña	Sitio	Antecesor	Riego	MO (g kg <sup>-1</sup> )	pH	P (g kg <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	Dosis N (kg ha <sup>-1</sup> )
SI									
1	1994/95	Balcarce	Maíz	sí	55	5,8	18	41	0, 70, 140
2	1995/96	Balcarce	Maíz	sí	55	5,8	20	11	0, 35, 70, 140, 210
3	1996/97	Tandil	Maíz	sí	55	5,8	24	9	0, 70, 210
4	1996/97	Balcarce	Maíz	sí	55	5,8	21,4	32	0, 70, 210
5	1997/98	Balcarce	Trigo	no	65	6	16,0	55	0, 70, 140, 210, 280
6	1997/98	Gral. Pueyrredón	Maíz	sí	56	5,8	22	85	0, 70, 140, 210, 280
7	1999/00	Tandil	Maíz	sí	55	6	17,2	54	0, 60, 120, 180
8	2000/01	Balcarce	Maíz	no	55	6,4	36,9	31	0, 70, 180
9	2001/02	Balcarce	Maíz	sí	54	6,4	16,9	22	0, 180
10	2001/02	Balcarce	Maíz	no	54	6,4	16,9	22	0, 180
11	2002/03	Gral. Pueyrredón	Maíz	no	54	6,4	18,9	13	0, 180
12	2002/03	Balcarce	Maíz	no	54	6,4	18,9	13	0, 180
13	2004/05	Balcarce	Maíz	sí	57	5,3	14,9	42	0, 60, 120
14	2005/06	Balcarce	Soja 2da	sí	53	5,9	19,8	65	0, 150
15	2006/07	Balcarce	Soja 2da	no	53	5,3	8	88	0, 50, 100
V6									
16	1994/95	Balcarce	Maíz	sí	55	5,8	18	49	0, 35, 70, 140
17	1995/96	Balcarce	Maíz	sí	55	5,8	20	28	0, 35, 70, 140, 210
18	1996/97	Balcarce	Maíz	sí	55	5,8	24	44	0, 70, 140, 210
19	1997/98	Tandil	Maíz	sí	56	5,8	22	32	0, 60, 120, 180
20	1998/99	Balcarce	Maíz	no	58	5,8	15	43	0, 70, 140, 210
21	1999/00	Gral. Pueyrredón	Maíz	sí	59	6	17,3	56	0, 60, 180
22	1999/00	Balcarce	Maíz	sí	59	6	17,3	42	0, 60, 180
23	2004/05	Balcarce	Maíz	sí	49	5,6	19,5	56	0, 60, 120

donde Y es el rendimiento en grano expresado al 14% de humedad (kg ha<sup>-1</sup>) y X es el NN (kg ha<sup>-1</sup>); a (ordenada al origen), b (coeficiente lineal) y c (coeficiente cuadrático).

El modelo cuadrático-plateau es definido como:

$$Y = a + bX + cX^2 \text{ si } X < C$$

$$Y = P \text{ si } X > C$$

donde Y es el rendimiento en grano expresado al 14% de humedad (kg ha<sup>-1</sup>) y X es el NN (kg ha<sup>-1</sup>); a (ordenada al origen), b (coefi-

ciente lineal), c (coeficiente cuadrático), C (NN crítico, donde ocurre la intercepción entre la fase de respuesta cuadrática y el plateau) y P es el rendimiento plateau.

Se realizó un análisis de residuales (rendimientos observados menos rendimientos predichos) para cada momento y modelo utilizado. Todos estos análisis fueron llevados a cabo utilizando el Software Table Curve (Jandel Scientific, Corte Madera, CA).

Los modelos cuadrático y cuadrático-plateau fueron derivados y las rectas resultantes se graficaron en función de la relación de precios entre el N y el grano de maíz a fin de determinar el NN óptimo económico.

La estimación del contenido de N mineral del suelo se realizó en base a la concentración de  $N-NO_3^-$  determinado mediante microdestilación por arrastre de vapor (Bremner & Keeney, 1966). En el caso del análisis a la SI el muestreo se realizó a 60 cm de profundidad (Ruiz *et al.*, 2001), para lo cual se tomaron estratos de 20 cm (0-20, 20-40 y 40-60 cm) y se promediaron las concentraciones de N correspondientes a cada uno de ellos. Para el caso del análisis en V6, el muestreo fue realizado a 30 cm (Meisinger *et al.*, 1992) sin división en estratos (0-30 cm). Para realizar la transformación a  $kg\ N\ ha^{-1}$  se utilizaron valores de densidad aparente considerados de referencia para suelos bajo SD en el Sudeste bonaerense:  $1,2\ Mg\ m^{-3}$  para el estrato de 0-30 cm y un valor de  $1,3\ Mg\ m^{-3}$  para el de 0-60 cm.

La relación de precios entre el N y el grano de maíz se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Relación de precios} = \frac{\text{Precio N } (\$/kg\ N) + \text{interés} + \text{costo de aplicación}}{\text{Precio bruto grano } (\$/kg) - \text{gastos}}$$

A su vez, el precio del N depende del precio del fertilizante y de su concentración de N:

$$\text{Precio del N } (\$/kg\ N) = \frac{\text{Precio fertilizante } (\$/t)}{kg\ N/t\ fertilizante}$$

En el cálculo de la relación de precios se consideró como costo del fertilizante, el precio del mismo puesto en el campo más el costo financiero (en el caso de existir este) por haber usado crédito para adquirirlo. El valor del grano utilizado fue el neto, luego de descontar los gastos de cosecha, flete, secado y comercialización.

Para el cálculo del interés se consideró la tasa mensual y el período de inmovilización (generalmente 6-8 meses).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan los valores de rendimiento en grano de maíz en función del NN para los momentos de SI y V6. Cada punto representa el promedio de rendimiento (de al menos tres repeticiones) correspondiente a cada tratamiento o sea NN (disponibilidad de N inicial + dosis de N aplicada) de los diferentes ensayos. Del ajuste de los tres modelos surgieron ecuaciones cuyos coeficientes se presentan en la Tabla 2. Si bien las regresiones fueron significativas ( $p < 0,01$ ), los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de las mismas, podrían ser mejorados (Tabla 2). Esto se debe a que la relación entre el rendimiento de un cultivo y el N disponible está afectada por factores genéticos, ambientales y de manejo (Carcová, 2004). Esta limitación fue parcialmente superada cuando se agruparon los resultados en poblaciones correspondientes a años con diferente potencialidad, para ambos momentos (SI y V6). Se ajustaron los mismos modelos para años cuyos rendimientos máximos fueron superiores a  $12.000\ kg\ ha^{-1}$  (años favorables), entre  $12.000$  y  $10.000\ kg\ ha^{-1}$  (años promedio), y para los que no superaron los  $10.000\ kg\ ha^{-1}$  (años poco favorables). De esta manera se logró cubrir tres escenarios de respuesta a la fertilización (Fig. 2). La construcción de tres curvas de respuesta para cada momento de muestreo-fertilización permitió reducir la variabilidad aumentando el valor predictivo de los

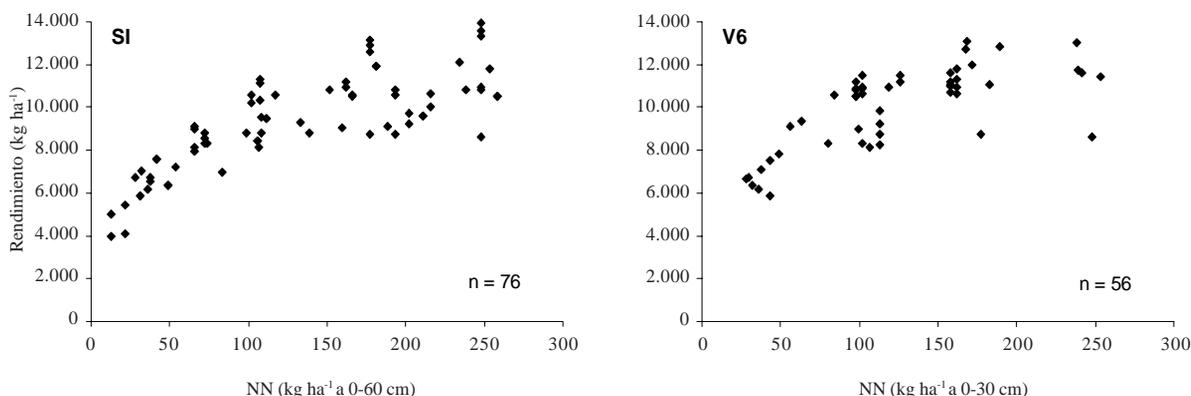


Figura 1. Relaciones entre el rendimiento de maíz y el nivel de N (NN) a la siembra (SI) y al estadio de seis hojas (V6) del maíz en el SE bonaerense.

Figure 1. Relationships between grain yield and N levels (NN) at planting (SI) and six-leaf stage (V6) in SE Buenos Aires Province.

Tabla 2. Coeficientes de las funciones de ajuste de rendimiento al nivel de N (NN) para el momento de la siembra (SI) y seis hojas (V6) según el modelo matemático utilizado. Lin-plat: lineal-plateau, cuadr: cuadrático, cuadr-plat: cuadrático-plateau. c: coeficiente cuadrático, b: coeficiente lineal, a: ordenada al origen, C: NN crítico, donde ocurre la intercepción entre la fase de respuesta lineal o cuadrática y el plateau, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación de la regresión.

Table 2. Coefficients for models describing relationships between grain yield and N levels (NN) at planting (SI) and six-leaf stage (V6). Lin-plat: linear-plateau, cuadr: quadratic, cuadr-plat: quadratic-plateau. c: quadratic coefficient, b: linear coefficient, a: intercept, C: critical N level at the intersection of the linear or quadratic response and the plateau lines, R<sup>2</sup>: coefficient of determination.

Modelo	c	b	a	C	R <sup>2</sup>
SI					
Lin-plat.	-	48,12	4.620	128	0,71
Cuadr.	-0,135	59,97	4.488	-	0,71
Cuadr-plat.	-0,182	70,44	4.115	177	0,72
V6					
Lin-plat.	-	44,73	5.465	131	0,65
Cuadr.	-0,186	71,97	4.640	-	0,66
Cuadr-plat.	-0,223	78,42	4.434	168	0,66

modelos (Tabla 3). Como se mencionó, el N no es el único factor que determina el rendimiento de maíz, por lo que la utilización de tres curvas de respuesta permitió realizar un análisis más detallado y sobre todo de mayor aplicabilidad para cada situación en particular. Debido a que todos los experimentos fueron conducidos bajo adecuadas prácticas de manejo (selección del material genético, fecha de siembra, densidad, espaciamento entre hileras, control de plagas, malezas y fertilización con otros nutrientes), es evidente que las diferencias en respuesta a N entre las curvas de la Figura 2 se deben a las variaciones anuales en las condiciones meteorológicas. Dentro de estas variables se encuentran como más relevantes para definir el rendimiento de maíz, la disponibilidad hídrica durante el ciclo del cultivo, sobre todo alrededor de la floración (Calviño *et al.*, 2003), aunque también la temperatura y la radiación (Carcová, 2004).

La relevancia de esta segregación, radica en la posibilidad de optar entre curvas de alto o bajo rendimiento, en los casos que sea posible definir escenarios de precipitación diferente al promedio. En situaciones donde se prevea que no existirán limitaciones hídricas importantes para el cultivo por aplicación de riego, podría elegirse trabajar con la función de altos rendimientos (años favorables). Por el contrario, en situaciones donde sean probables precipitaciones menores que el promedio o que la actitud del productor sea más conservadora, sería aconsejable estimar la dosis de N a aplicar con la función de menores rendimientos (años poco favorables). Este caso puede darse si se cuenta con pronósticos meteo-

rológicos que indiquen un efecto “Año Niña” para el ciclo del cultivo, en el cual sean probables precipitaciones menores a la media. Si no se cuenta con información de este tipo, probablemente la utilización de la función de años promedio sea la que arroje resultados económicamente más convenientes a largo plazo (Álvarez *et al.*, 2003). De todas maneras, la elección de una u otra estrategia forma parte del contexto, racionalidad y filosofía de cada productor.

Una vez obtenidas las ecuaciones de respuesta de rendimiento a la disponibilidad de N para ambos momentos de muestreo-fertilización, se procedió a derivar los modelos cuadrático y cuadrático-plateau con el fin de obtener nuevas funciones que fueron graficadas utilizando el NN como variable independiente, y la relación de precios N-grano de maíz como variable dependiente (Fig. 3). Este procedimiento no se realizó con el modelo lineal-plateau ya que dicha ecuación determina un único NN óptimo que coincide con el punto de quiebre de la recta cuando la pendiente de la fase lineal es mayor que la relación de precios (Waugh *et al.* 1973). La Figura 3 permite, previa selección de la recta a utilizar, ingresar horizontalmente con una relación de precios determinada y obtener el NN que responde al óptimo beneficio económico para la condición seleccionada. Se determinó que los NN óptimos aumentaron a medida que mejoró la potencialidad del año, independientemente del momento de fertilización o del modelo evaluado. En otras experiencias también ha sido reportado que los requerimientos nutricionales de los cultivos aumentan a medida que mejora

Tabla 3. Coeficientes de las funciones de ajuste de rendimiento al nivel de N (NN) para el momento de la siembra (SI) y seis hojas (V6) según el modelo matemático utilizado (Lin-plat: lineal-plateau, cuadr: cuadrático, cuadr-plat: cuadrático-plateau) y la potencialidad del año. c: coeficiente cuadrático, b: coeficiente lineal, a: ordenada al origen, C: NN crítico, donde ocurre la intersección entre la fase de respuesta lineal o cuadrática y el plateau, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación de la regresión.

Table 3. Coefficients for models describing relationships between grain yield and N levels (NN) at planting (SI) and six-leaf stage (V6) according to the chosen function (Lin-plat: linear-plateau, cuadr: quadratic, cuadr-plat: quadratic-plateau) and the year potentiality. C: quadratic coefficient, b: linear coefficient, a: intercept, C: critical N level at the intersection of the linear or quadratic response and the plateau lines, R<sup>2</sup>: coefficient of determination.

Modelo	Años	c	b	a	C	R <sup>2</sup>
SI						
Lin-plat.	Favorables	-	59,54	4.249	149	0,96
	Promedio	-	35,88	5.477	148	0,85
	Poco favorables	-	41,06	4.048	122	0,94
Cuadr.	Favorables	-0,203	91,50	3.075	-	0,94
	Promedio	-0,132	56,58	4.890	-	0,83
	Poco favorables	-0,147	55,54	3.957	-	0,94
Cuadr-plat.	Favorables	-0,212	92,89	3.085	209	0,93
	Promedio	-0,179	67,14	4.425	194	0,85
	Poco favorables	-0,215	68,54	3.559	160	0,95
V6						
Lin-plat.	Favorables	-	43,96	6.151	150	0,93
	Promedio	-	52,01	5.138	117	0,82
	Poco favorables	-	35,74	4.746	111	0,88
Cuadr.	Favorables	-0,146	65,68	5.617	-	0,94
	Promedio	-0,163	64,62	5.257	-	0,74
	Poco favorables	-0,170	60,02	3.985	-	0,80
Cuadr-plat.	Favorables	-0,208	82,17	4.710	198	0,95
	Promedio	-0,319	94,65	4.146	145	0,80
	Poco favorables	-0,293	79,52	3.420	113	0,92

la oferta de las otras variables que condicionan el rendimiento (Andrade *et al.*, 2002).

Los NN óptimos fueron menores, medios y mayores cuando se utilizaron los modelos lineal-plateau, cuadrático-plateau y cuadrático, respectivamente, independientemente de la potencialidad del año y del momento evaluado (Tabla 3 y Fig. 3). Estos resultados coinciden con los reportados por Cerrato & Blackmer (1990) quienes indicaron que el modelo lineal-plateau tendía a sobreestimar los rendimientos en la zona de la curva de respuesta cercana al nivel óptimo de N. Dicha sobreestimación es consistente con la naturaleza de este modelo ya que posee una abrupta discontinuidad, que es difícil de justificar biológicamente, y resulta en la identificación

de un NN óptimo demasiado bajo. Por otro lado, estos autores señalaron que el modelo cuadrático tendía a sobreestimar: i) los rendimientos en el rango de NN identificados como óptimo, debido a la convexidad que el modelo describe y ii) la pendiente de la curva de respuesta en el rango de NN ligeramente inferiores al óptimo. Por lo mencionado, la utilización de este modelo determina NN óptimos que son demasiado altos, desde el punto de vista agronómico. Cerrato & Blackmer (1990) concluyen que el modelo cuadrático-plateau describe en forma más adecuada el rendimiento del maíz en función del N, ya que aporta un NN óptimo aparentemente insesgado y agronómicamente aceptable. En cuanto al momento de muestreo-fertilización, en general se observó que los NN

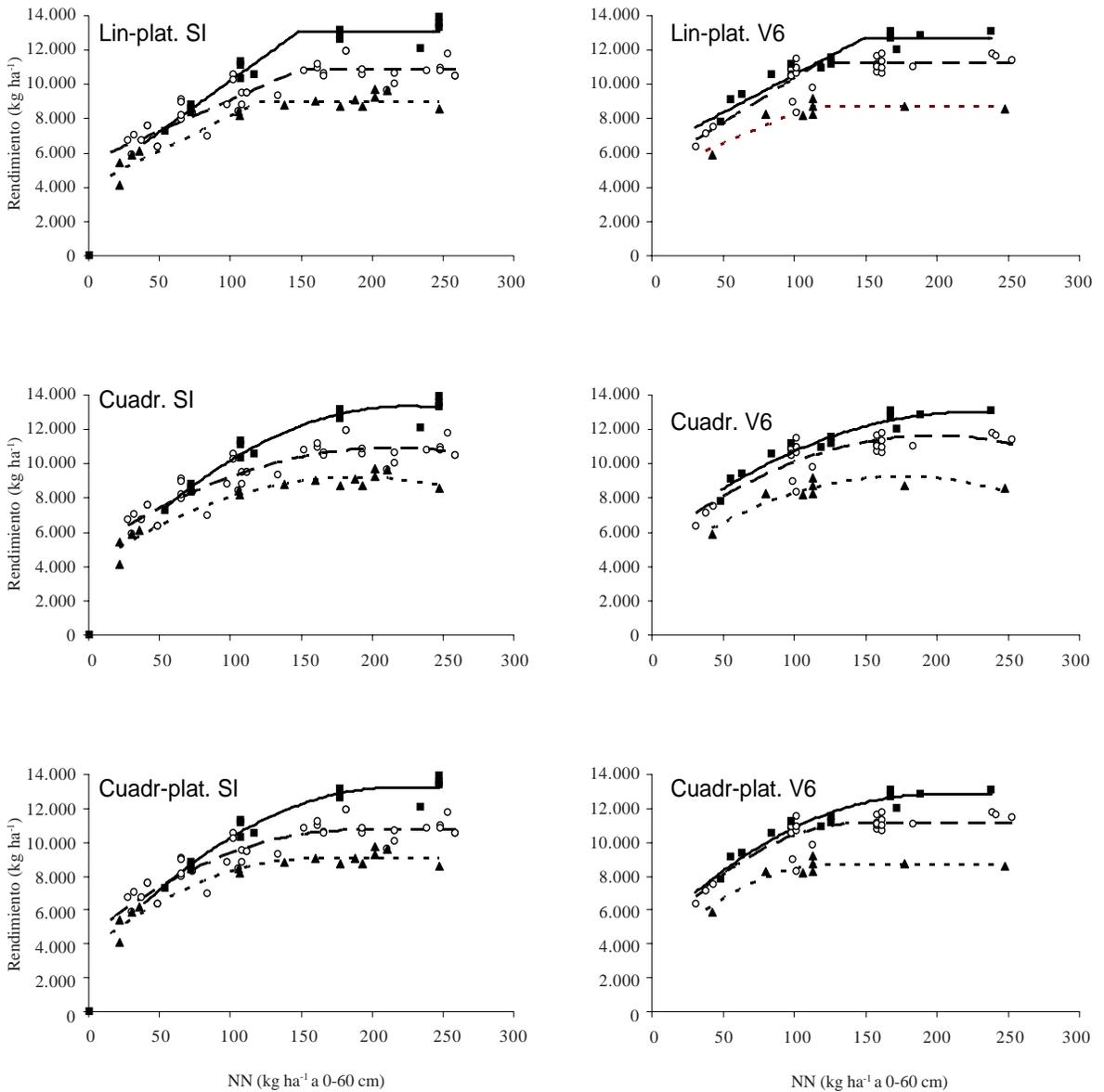


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento de maíz y el nivel de N (NN) determinado a la siembra (SI) y al estadio de seis hojas (V6) en el SE bonaerense. Las curvas presentan funciones de ajuste de tres modelos (Lin-plat: lineal plateau, Cuadr: cuadrático, Cuadr-plat: cuadrático plateau) para los rendimientos correspondientes a años favorables (cuadrados negros), promedio (círculos blancos) y poco favorables (triángulos negros).

Figure 2. Relationships between grain yield and N levels (NN) at planting (SI) and six-leaf stage (V6) in SE Buenos Aires Province. Three models are shown (Lin-plat: linear plateau, Cuadr: quadratic, Cuadr-plat: quadratic plateau) for yields under favourable (black squares), average (white circles) and non favourable years (black triangles).

Tabla 4. Coeficientes de las funciones derivada (para el modelo cuadrático: Cuadr. y cuadrático-plateau: Cuadr-plat.) de las relaciones entre el rendimiento del cultivo y el nivel de N (NN) en el suelo determinado a la siembra (SI) y al estadio de seis hojas (V6) en el SE bonaerense. b: coeficiente lineal, a: ordenada al origen.

Table 4. Coefficients of derivative functions (for the quadratic: Cuadr. and the quadratic-plateau model: Cuadr-plat) of the relationships between grain yield and N levels (NN) at planting (SI) and at the six-leaf stage (V6) in SE Buenos Aires Province. B: linear coefficient, a: intercept.

Modelo	Años	SI		V6	
		b	a	b	a
Cuadr.	Favorables	-0,407	91,50	-0,292	65,68
	Promedio	-0,264	56,58	-0,327	64,62
	Poco favorables	-0,293	55,54	-0,341	60,02
Cuadr-plat.	Favorables	-0,424	92,89	-0,416	82,17
	Promedio	-0,357	67,14	-0,639	94,66
	Poco favorables	-0,429	68,55	-0,586	79,52

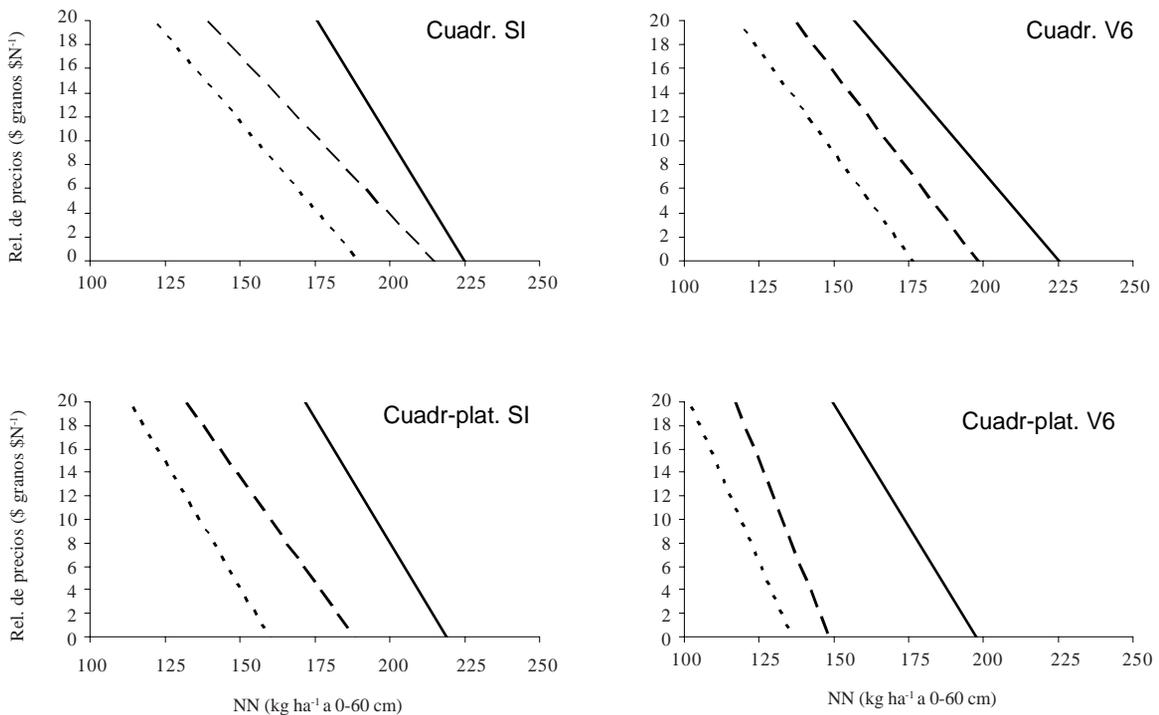


Figura 3. Funciones derivada para el modelo cuadrático (Cuadr) y cuadrático-plateau (Cuadr-plat) de las relaciones entre el rendimiento del cultivo y el nivel de N (NN) en el suelo a la siembra (SI) y al estadio de seis hojas (V6) en el SE bonaerense. Años favorables (línea llena), promedio (línea discontinua) y poco favorables (línea punteada).

Figure 3. Derivative functions for the quadratic (Cuadr.) and the quadratic-plateau (Cuadr-plat.) model for the relationships between grain yield and N levels (NN) at planting (SI) and six-leaf stage (V6) in SE Buenos Aires Province. Favourable (full line), average (dashed line) and non favourable years (dotted line).

óptimos fueron menores en V6 respecto de SI para todos los modelos y años. Lo anterior está de acuerdo con los resultados de Sainz Rozas *et al.* (2004) quienes determinaron menores pérdidas de N del sistema en V6 respecto de la aplicación a la SI. Esto se traduce en mayores eficiencias de recuperación del fertilizante en V6, cuando las tasas de absorción de N por el maíz comienzan a ser significativas (Abbate & Andrade, 2005).

A fin de evaluar la aptitud de los tres modelos para describir los conjuntos de datos, se realizó un análisis de residuales para cada uno de ellos (Fig. 4). La dispersión de los valores de cada modelo fue relativamente similar en ambos momentos, indicando que no se recopilaban evidencias suficientes, como para seleccionar el modelo más apto. Estos resultados no están de acuerdo con los de Cerrato & Blackmer (1990) quienes identificaron

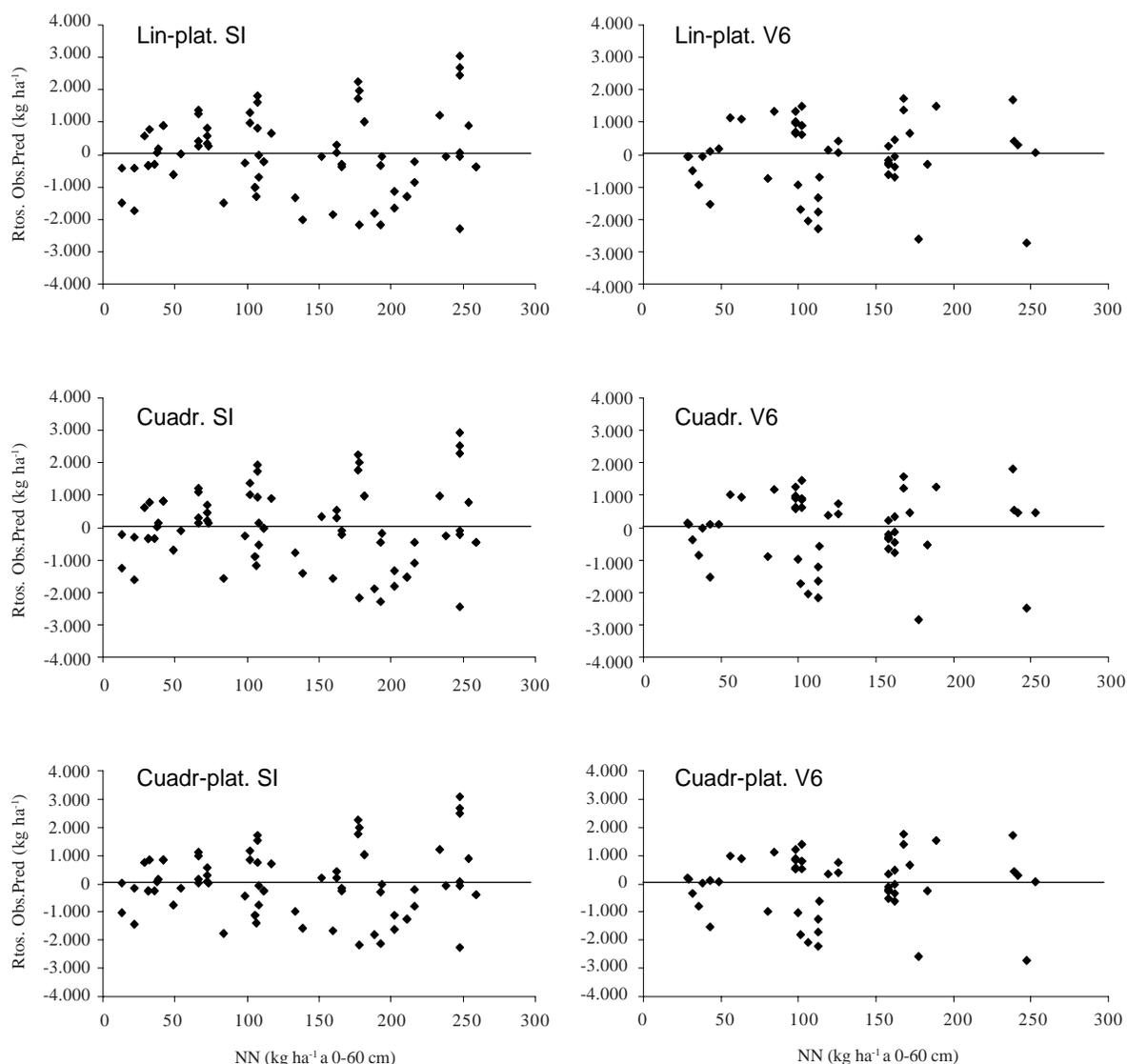


Figura 4. Residuales (rendimientos observados – rendimientos predichos) en función del nivel de N (NN) a la siembra (SI) y al estadio de seis hojas (V6) para los tres modelos utilizados (Lin-plat: lineal plateau, Cuadr: cuadrático, Cuadr-plat: cuadrático plateau.).

Figure 4. Residuals (observed – predicted yields) as a function of N levels (NN) at planting (SI) and six-leaf stage (V6) for the three models (Lin-plat: linear plateau, Cuadr: quadratic, Cuadr-plat: quadratic plateau).

un importante sesgo en el modelo cuadrático y determinaron que el cuadrático-plateau representaba mejor la relación entre el NN y el rendimiento del maíz. Por otro lado, en la fertilización a la SI se observó que la dispersión de los puntos tendió a incrementarse a medida que aumentaba el NN indicando que el supuesto de homogeneidad de varianzas no se estaría cumpliendo en términos estrictos. Este comportamiento fue menos marcado para el muestreo-fertilización en V6, donde los valores se ubicaron insesgadamente y manteniendo similar variabilidad (Fig. 4). A raíz de lo discutido, y teniendo en cuenta que no se encontró un método estadístico que permita la identificación del mejor modelo para describir la respuesta del rendimiento del cultivo de maíz al NN, probablemente el criterio agronómico sea la mejor herramienta para realizar dicha selección. En este sentido, el modelo cuadrático-plateau se presentaría como más apto que el lineal-plateau, debido a que responde a cambios en la relación de precios, y que el cuadrático por definir NN menores, más compatibles con la sustentabilidad ambiental.

En la Figura 5 se presenta la evolución de la relación de precios N-grano de maíz para los últimos diez años en Argentina, donde se observa que dicho valor fluctuó entre un mínimo de 5,3 y un máximo de 17,5. Este amplio rango de oscilación de precios, para el modelo cuadrático-plateau provoca variaciones en el NN óptimo económico, y por lo tanto en la DOE de 30 y 23 kg N ha<sup>-1</sup> para SI y V6, respectivamente (promedio de años favorables,

promedio y poco favorables). Cuando se considera el efecto de potencialidad del año para el mismo modelo y rango de relación de precios, las variaciones en el NN y la DOE, prácticamente se duplican, puesto que se determinaron valores de 59 y 54 kg N ha<sup>-1</sup> para SI y V6, respectivamente (diferencia entre los años favorables y poco favorables). Considerando que, para una situación determinada, es muy poco probable definir la potencialidad del año y que, por el contrario las fluctuaciones en la relación de precios son de menor magnitud que la mencionada, el impacto del efecto año sobre los cambios en el NN y por lo tanto en la DOE es aún mayor. Estos resultados enfatizan la importancia del nivel de rendimiento máximo como mayor condicionante de la DOE. En este sentido, es más factible definir acertadamente el rendimiento máximo en V6 que a la SI debido a que generalmente se cuenta con mayor información disponible en ese momento (disponibilidad hídrica en el suelo, pronósticos climáticos, relaciones de precios).

Para otros ambientes de la Región Pampeana, si bien los rendimientos absolutos y la respuesta a la fertilización nitrogenada son diferentes a los del SE bonaerense, es altamente probable que el modelo seleccionado en este trabajo siga siendo el más apropiado. Sin embargo, es posible que los efectos del momento de fertilización y de la relación de precios sobre el NN óptimo económico y la DOE sean diferentes. Probablemente, sea mayor el efecto producido por cambios en la relación de precios y menor el del momento de fertilización. Sin embargo, sería conveniente confirmar estas hipótesis de trabajo.

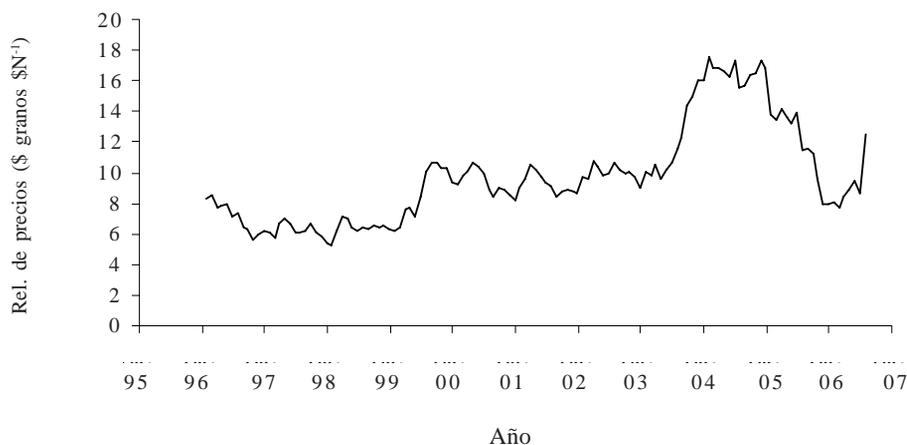


Figura 5. Relación de precios N-grano de maíz durante el período 1997-07 en la Argentina. Fuente: Series de precios AACREA.  
Figure 5. Nitrogen/corn grain price ratio during the 1997-07 period in Argentina. Source: Price series AACREA.

Se concluye que el modelo cuadrático-plateau produce los resultados más racionales desde el punto de vista agronómico. Además, el estadio de V6 se mostró como el momento más apropiado para la fertilización tanto desde la perspectiva económica como ambiental, y la potencialidad del año condicionó la DOE en mayor medida que la relación de precios.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto INTA AERN5656, el AGRxx/08 de la FCA-UNMP y con recursos de la Est. Exp. INTA Balcarce.

## REFERENCIAS

- Abbate, P & FH Andrade. 2005. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. *En: HE Echeverría & FO García (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp. 43-66.
- Álvarez, R; HS Steinbach; CR Álvarez & MS Grigera. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N° 18.
- Andrade, FH. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crop Res.* 41: 1-12.
- Andrade, FH; EH Echeverría; NS González & SA Uhart. 2002. Capítulo 8: Requerimientos de nutrientes minerales. *En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. EEA INTA Balcarce-Fac. de Ciencias Agrarias UNMdP. pp. 211-237.
- Barreto, HJ & LR Westerman. 1987. YIELDFIT: A computer program for determining economic fertilization rates. *J. Agron. Educ.* 16: 11-14.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphate in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J & D Keeney. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soil: 3. Exchangeable ammonium, nitrate and nitrite by extraction-distillation methods. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 577-582
- Calviño, PA; FH Andrade & VO Sadras. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agron. J.* 95: 275-281.
- Carcova, J; G Abeledo & M López Pereira. 2004. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. H Satorre; RL Vence; GA Slafer; EB de la Fuente; DJ Miralles; ME Otegui & R Savin (eds.). Editorial Facultad de agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp. 75-95.
- Cerrato, ME & AM Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82: 138-143.
- Domínguez, G; G Studdert & HE Echeverría. 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. *En: HE Echeverría & FO García (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. pp. 207-229.
- Janzaen, JJ. 2006. The soil carbon dilemma. Shall we hoard it or use it? *Soil Soil. Biochem.* 38: 419-424.
- Meisinger, JJ; VA Bandel; JS Angle; BE O'keefe & CM Reynolds. Presidedress soil nitrate test evaluation in Maryland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1527-1532.
- Nelson, LA; RD Voss & JT Pesek. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. *In: OP Engelstad (ed.) Fertilizer technology and use*, 3<sup>rd</sup> ed. ASA, Madison.
- Sainz Rozas, HR; HE Echeverría & PA Barbieri. 2004. Nitrogen Balance as Affected by Application Time and Nitrogen Fertilizer Rate in Irrigated No-Tillage Maize. *Agron. J.* 96: 1622-1631.
- Ritchie, SW & JJ Hanway. 1992. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report N° 48.
- Rizzalli, RH. 1998. Siembra directa y convencional de maíz ante distintas ofertas de N. Tesis de Magister Scientiae. Fac. Ciencias agrarias. UNMP, Balcarce, Argentina. 60 pp.
- Ruiz, R; E Satorre; G Maddoni; J Carcova & ME Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en Maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino, Buenos Aires. Argentina.
- Tellería, JG. 1996. Siembra Directa de Maíz. *En: Maíz, Cuaderno de Actualización Técnica N°57*. CREA. Buenos Aires, Argentina. pp. 90-96.
- Walkley, A & IA Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
- Waugh, DL; RB Cate & LA Nelson. 1973. Discontinuous models for rapid correlation, interpretation, and utilization of soil analysis and fertilizer response data. *Techn. Bull.* 7. International Soil Fertility Evaluation and Improvement Program. North Carolina State Univ., Raleigh, NC.