

DOSIS ÓPTIMA ECONÓMICA DE NITRÓGENO EN TRIGO SEGUN MOMENTO DE FERTILIZACIÓN EN EL SUDESTE BONAERENSE

PABLO A BARBIERI¹; HERNÁN E ECHEVERRÍA & HERNÁN R SAINZ ROZAS^{1,2}

¹Unidad Integrada (UIB) EEA INTA Balcarce - Fac. Ciencias Agrarias (UNMP). CC. 276 (7620), Balcarce, Argentina.

²CONICET - Correo electrónico: pbarbieri@balcarce.inta.gov.ar

Recibido: 22-11-08

Aceptado: 27-05-09

RESUMEN

La fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo 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) de fertilizante nitrogenado para el cultivo de trigo en función de la variedad (tradicional o francesa) y momento de aplicación del N (siembra o macollaje) en dicha región, considerando dos modelos matemáticos (cuadrático y cuadrático-plateau). Se utilizó información de ensayos de fertilización en trigo de diferentes sitios (Otamendi, Balcarce, Mar del Plata y Tandil) y años (2002/03 a 2007/08). El modelo cuadrático-plateau produjo los resultados más racionales desde el punto de vista agronómico determinando DOEs menores que el cuadrático. El estadio de macollaje permitió determinar DOEs menores que al momento de la siembra. La diferencia en la DOE entre momentos de fertilización fue menor para las variedades francesas que para las tradicionales, lo que sería explicado por una mayor EUN de las primeras. Por último, para las variedades francesas la potencialidad del año condicionó la DOE en mayor medida que la relación de precios N-grano de trigo. Estos resultados enfatizan la importancia de identificar con precisión el rendimiento objetivo del cultivo ya que el mismo tendría un impacto mayor que los cambios en las relaciones de precios N-grano de trigo a la hora de definir la DOE.

Palabras clave. Trigo, nitrógeno, dosis óptima económica, variedades tradicionales y francesas.

ECONOMIC OPTIMAL NITROGEN RATE FOR WHEAT AS AFFECTED BY FERTILIZATION TIMING IN SOUTHEASTERN BUENOS AIRES PROVINCE

ABSTRACT

Nitrogen fertilization in wheat is a common practice in the SE of Buenos Aires Province. However, there is a lack of local information to define the nitrogen (N) rate that responds to the maximum economic benefit. The objective of this work was to determine the economic optimal nitrogen rate (DOE) for genotypes of wheat (traditional or french) fertilized at sowing or tillering in this region. Two mathematic models were evaluated (quadratic and quadratic-plateau). Twenty-two N fertilization experiments from different sites (Otamendi, Balcarce, Mar del Plata y Tandil) and years (from 2002 to 2007) were used. The quadratic-plateau model produced the most rational results from an agronomic point of view because it gave lower DOEs than the quadratic model. Fertilization at tillering showed lower DOEs compared to fertilization at sowing. The difference in DOE between fertilization times was lower in french genotypes than traditional ones, and this difference would be explained by the greater N use efficiency determined in french genotypes. In french genotypes, the potential grain yield produced more variations in the DOE than the N-grain wheat price relationship. These results emphasize the importance of knowing the potential grain yield at the time of defining the DOE.

Key words. Wheat, nitrogen, economic optimal rate, traditional and french genotypes.

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L) es el cultivo de invierno más importante en los sistemas productivos del sudeste Bonaerense, en donde la intensificación de la agricultura en los últimos años ha producido una disminución de la materia orgánica (MO) del suelo (Sainz Rozas & Echeverría, 2008), y por consiguiente, es frecuente determinar una respuesta generalizada al agregado de nitrógeno (N) (Calviño *et al.*, 2002), particularmente bajo siembra di-

recta (SD) (Falotico *et al.*, 1999). En tal sentido, el N es el nutriente que con mayor frecuencia limita la producción vegetal, debido a las grandes cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observa su deficiencia en los suelos (Echeverría & Sainz Rozas, 2005).

La metodología más difundida de diagnóstico de N para el cultivo de trigo, se basa en la determinación del contenido de nitrato en el suelo (0-60 cm) al momento de

la siembra (González Montaner *et al.*, 1997; Calviño *et al.*, 2002). Se han reportado distintos umbrales de nitrato a la siembra según la zona, el rendimiento objetivo del cultivo y el sistema de labranza. Para variedades tradicionales con antecesor soja bajo SD y con rendimientos de aproximadamente 5.000 kg ha⁻¹, se requieren 150 kg N ha⁻¹ (N en el suelo de 0-60 cm +N del fertilizante), mientras que para variedades francesas con rendimientos superiores a 6.000 kg ha⁻¹, se requieren 170 kg N ha⁻¹ (Calviño *et al.*, 2002).

En el sudeste Bonaerense es más frecuente la ocurrencia de excesos hídricos al comienzo que al final de la estación de crecimiento del trigo (Reussi Calvo & Echeverría, 2006) y en consecuencia, la aplicación de N de base a la siembra podría resultar en mayores pérdidas de N, reportándose menores rendimientos y eficiencias de uso de N (EUN) del fertilizante y de N en planta, respecto de la fertilización al macollaje (Melaj *et al.*, 2003; Barbieri *et al.*, 2008). En consecuencia, el diagnóstico de requerimiento y la aplicación de N al estadio de macollaje es una estrategia de manejo apropiada que permite incrementar la EUN, respecto de la aplicación del fertilizante al momento siembra (Barbieri *et al.*, 2009).

La aplicación de los métodos de diagnóstico comentados no contempla la incidencia del costo de los insumos y de su relación con el precio del trigo (relación insumo-producto). Álvarez (2008) analizando redes de ensayos de fertilización reportó que la utilización de umbrales de N fijos permitió lograr márgenes netos positivos de la inversión en fertilización sólo en años con relaciones de precios favorables. En el último año, se ha incrementado significativamente dicha relación y por lo tanto, es necesario evaluar la incidencia de dichos cambios sobre la dosis óptima económica (DOE). En tal sentido, para maíz bajo SD en el sudeste Bonaerense, se ha determinado que la potencialidad del año condicionó la DOE en mayor medida que la relación de precios, determinada mediante dos modelos matemáticos (Pagani *et al.*, 2008). Numerosos modelos de respuesta a la aplicación de N han sido utilizados para definir la DOE, no existiendo consenso respecto de cuál es el más conveniente (Nelson *et al.* 1985; Barreto & Westerman, 1987; Blackmer & Meisinger, 1990). Para tal fin, en algunos trabajos se recurre al modelo que arroje los resultados más racionales desde el punto de vista agronómico (Pagani *et al.*, 2008).

Para el cultivo de trigo de diferente potencial de rendimiento en el sudeste Bonaerense, se plantean como objetivos determinar: i.- la aptitud de dos modelos para describir la respuesta a la fertilización nitrogenada y de esta manera definir la DOE y ii.- el efecto del momento de aplicación de N (siembra vs macollaje) sobre la DOE.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se realizaron estimaciones del N disponible (ND) óptimo económico basado en funciones de respuesta del cultivo de trigo a la disponibilidad de N al momento de la siembra o al macollaje, según la potencialidad del año y la relación de precios N-grano de trigo. El ND se define como los kg N ha⁻¹ presentes en el suelo más los aplicados en forma de fertilizante. La DOE se determina como la diferencia entre el ND óptimo económico y la disponibilidad de N en el suelo (Bremner & Keeney, 1966) en los 0-60 cm para el momento de la siembra y del macollaje. La información utilizada provino de 22 ensayos de fertilización nitrogenada realizados en el SE Bonaerense (Otamendi, Mar del Plata, Balcarce y Tandil) por el grupo de Suelos de la Unidad Integrada (INTA-FCA) Balcarce, entre los años 2002 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 sets 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. Se efectuaron aplicaciones preventivas de herbicidas y funguicidas.

Con el objeto de poder agrupar la información surgida de los ensayos y poder analizar el efecto de la dosis de N sobre el cultivo de trigo, los rendimientos provenientes de los diferentes sitios, años y variedades fueron agrupados en poblaciones utilizando como criterio de clasificación los rendimientos simulados utilizando el análisis estacional sin limitaciones de N del modelo CERES-Trigo. Se utilizó la versión DSSAT v4 para simular los efectos de las dosis de N usando 27 años de datos climáticos (1978-2005) los que fueron obtenidos de la estación de la estación meteorológica de la EEA-INTA de Balcarce. El perfil del suelo utilizado fue Paleudoll Petrocalcico con 5% de materia orgánica y 25 kg ha⁻¹ de N disponible a la siembra (0-60 cm). El contenido de agua disponible en el suelo a la siembra fue fijado al 80% del agua útil, valor frecuentemente observado para el área en trigo bajo SD (Calviño & Sadras, 2002). El cultivo antecesor fue soja bajo SD y las condiciones iniciales del suelo se reajustaban cada año. Para las variedades tradicionales, los rendimientos se clasificaron como bajos, menores de 4.550 kg ha⁻¹ (años con disponibilidad hídrica menor a la mediana) y altos, mayores de 4.550 kg ha⁻¹ (años con precipitaciones iguales o superiores a la mediana de 425 mm). Los rangos determinados para las variedades francesas fueron un 20% mayor que los establecidos para las variedades tradicionales, esto es, rendimientos bajos, menores de 5.500 kg ha⁻¹ y altos, mayores de 5.500 kg ha⁻¹. Esta diferencia en rendimiento entre variedades francesas y tradicionales surge de los datos publicados por Calviño *et al.* (2002) para diferentes ambientes y niveles de N.

Para ambas variedades, se ajustaron dos modelos matemáticos de respuesta a las poblaciones de datos de rendimiento en función del ND: cuadrático y cuadrático-plateau. El modelo cuadrático, responde a la ley de rendimientos no proporcionales y presenta un óptimo alrededor del máximo rendimiento luego del cual declina más allá del nivel del nutriente donde se alcanza el máximo rendimiento (Steinbach, 2005). Si bien este modelo permite realizar la evaluación económica de la fertilización, algunas de las desventajas que presenta es que puede distorsionar la forma

Tabla 1. Variables edáficas y de manejo y precipitaciones durante la estación de crecimiento del trigo para los diferentes años y localidades. MO: materia orgánica, P-Bray: fósforo disponible por el método de Bray I, N-NO₃⁻: nitrógeno como nitrato.

Table 1. Soil and management variables and rainfall during wheat growing season for different years and growing seasons. MO: organic mater, P-Bray: available phosphorous by Bray I method, N-NO₃⁻: nitrogen as nitrate.

Sitio	Año	Localidad	Variedad	Antecesor	MO	pH	P-Bray	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₃ ⁻	Precipitaciones
					%			Siembra	Macollaje	
						mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	(mm)	
1	2002	Otamendi	Tradicional	Girasol	5,1	6,2	19,7	19,2	13,4	581
2	2002	Balcarce	Tradicional	Soja	5,7	6,0	14,3	20,7	44,1	731
3	2002	Tandil	Tradicional	Maíz	5,3	6,0	20,3	10,7	28,2	660
4	2003	Otamendi	Tradicional	Girasol	5,1	6,2	19,7	26,2	52,3	666
5	2003	Balcarce	Tradicional	Girasol	4,2	6,2	17,1	22,4	44,1	618
6	2003	Tandil	Tradicional	Maíz	5,8	6,0	25,9	45,4	28,8	302
7	2004	Balcarce	Tradicional	Soja	5,7	6,1	11,0	67,8	23,1	450
8	2004	Tandil	Tradicional	Maíz	6,1	6,2	12,0	63,6	42,2	288
9	2004	Mar del Plata	Tradicional	Maíz	5,6	5,9	13,0	92,5	26,6	452
10	2005	Balcarce	Tradicional	Girasol	5,3	6,0	8,2	52,2	27,7	397
11	2002	Otamendi	Francesa	Girasol	5,1	6,2	17,9	21,0	7,9	581
12	2002	Balcarce	Francesa	Soja	5,7	6,0	14,3	29,1	34,7	731
13	2002	Tandil	Francesa	Maíz	5,3	6,0	20,3	7,7	42,1	660
14	2003	Otamendi	Francesa	Girasol	5,1	6,2	19,7	24,3	69,7	666
15	2003	Balcarce	Francesa	Girasol	4,2	6,2	17,1	26,2	44,5	618
16	2003	Tandil	Francesa	Maíz	5,8	6,0	25,9	25,1	22,1	302
17	2005	Mar del Plata	Francesa	Soja	5,9	5,6	13,8	35,8	36,5	512
18	2006	Mar del Plata	Francesa	Trigo/Soja	5,2	6,2	17,2	123,8	122,3	471
19	2006	Balcarce	Francesa	Trigo/Soja	4,7	5,7	8,5	39,2	24,2	404
20	2006	Balcarce	Francesa	Girasol	4,4	5,7	22,7	9,2	17,0	404
21*	2007	Mar del Plata	Francesa	Soja	5,4	6,1	40,0	65,0	-	416
21§	2007	Mar del Plata	Francesa	Soja	5,4	6,1	40,0	-	67,0	416

* Experimento fertilizado y muestreado a la siembra.

§ Experimento fertilizado y muestreado al macollaje.

real de los datos experimentales. Si los datos muestran un importante incremento para bajo nivel de nutriente y existe un amplio rango del nutriente para el máximo rendimiento, la función cuadrática tiende a superar el valor de los datos presentando un máximo superior al que muestran los datos (Black, 1993). La consecuencia de este comportamiento es que se sobreestima la cantidad de nutriente donde se alcanza el máximo beneficio económico. Por otra parte, el modelo cuadrático-plateau, responde a cambios en la relación de precios y permite definir ND menores respecto del cuadrático siendo más compatible con la sustentabilidad ambiental. Por lo tanto, generalmente este modelo es preferible al cuadrático para predecir los requerimientos de N (Cerrato & Blackmer, 1990; Bullock & Bullock, 1994). Los modelos cuadrático y cuadrático-plateau fueron derivados y se graficó la eficiencia agronómica (kg grano kg N disponible⁻¹) en función del nivel de N disponible. El ND óptimo económico se determinó en la intersección de la recta proveniente de la derivada primera y la línea horizontal correspondiente a diferentes relaciones insumo-producto. Todos estos análisis fueron llevados

a cabo utilizando el Software Table Curve (Jandel Scientific, Corte Madera, CA).

La relación de precios entre el N y el grano de trigo se calculó de manera análoga a la realizada por Pagani *et al.* (2008):

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

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

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

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) por haber usado crédito para adquirirlo. El valor del grano utilizado fue el neto, luego de descontados 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

Para las variedades tradicionales (sitios 1 a 10), los rendimientos oscilaron según nivel de disponibilidad de N desde 3.114 a 5.092 kg ha⁻¹. Cuando se emplearon variedades francesas los rendimientos oscilaron desde 2.630 a 4.280 kg ha⁻¹ para los sitios de bajos rendimientos (15, 19 y 20) y desde 4.370 a 6.834 kg ha⁻¹ para los sitios de elevados rendimientos. En los sitios 19 y 20, si bien las precipitaciones registradas durante la estación de crecimiento no fueron escasas (Tabla 1), su distribución fue inadecuada, ya que se registró déficit hídrico desde antesis hasta madurez fisiológica. En el sitio 15, si bien las precipitaciones ocurridas durante toda la estación de crecimiento y particularmente durante los 60 días anteriores hasta los 10 días posteriores a antesis fueron adecuadas (218 mm), la escasa profundidad efectiva del suelo habría limitado la disponibilidad de agua útil para el cultivo. El rendimiento máximo determinado para la mayor disponibilidad de N es similar al reportado por Calviño & Sadras (2002) para suelos someros (50 y 70 cm) con elevada disponibilidad de N y similares precipitaciones durante el período mencionado.

Para la totalidad de los ensayos (n=21), el rendimiento de las variedades tradicionales y francesas de trigo se relacionó con el ND (N mineral en suelo + fertilizante) en el suelo al momento de la siembra y al macollaje (Fig. 1). En dicha Figura, cada punto representa el promedio de rendimiento (de por lo menos tres repeticiones) correspondiente a cada tratamiento. Los coeficientes de determinación (r²) de dicha relación determinados mediante el modelo cuadrático fueron 0,50 y 0,45, para las variedades tradicionales y francesas, respectivamente, cuando no se discriminó por sitio de bajo y alto rendimiento y por momento de fertilización.

En la Figura 2 se muestra el ajuste de los modelos cuadrático y cuadrático-plateau del rendimiento de las variedades tradicionales en función del ND. Para estas variedades, los tratamientos fertilizados con la dosis más elevada de N se clasificaron solamente dentro de la categoría de alto rendimiento, ya que no se registraron rendimientos inferiores a 4.550 kg ha⁻¹. Para las variedades francesas, el agrupamiento de los datos en función de los rendimientos (bajos y altos) permitió reducir la variabilidad aumentando el valor predictivo de los modelos (Fig. 1 vs Fig. 3). Debido a que todos los experimentos fueron conducidos bajo adecuadas prácticas de manejo (selección del material genético, fecha de siembra, densidad, control de plagas, malezas y fertilización con otros nutrientes), las diferencias en respuesta al N entre las curvas de la Figura 3 para los sitios de bajo y alto rendimiento se deberían, como ha sido mencionado, a la ocurrencia de estrés hídrico durante la etapa crítica de deter-

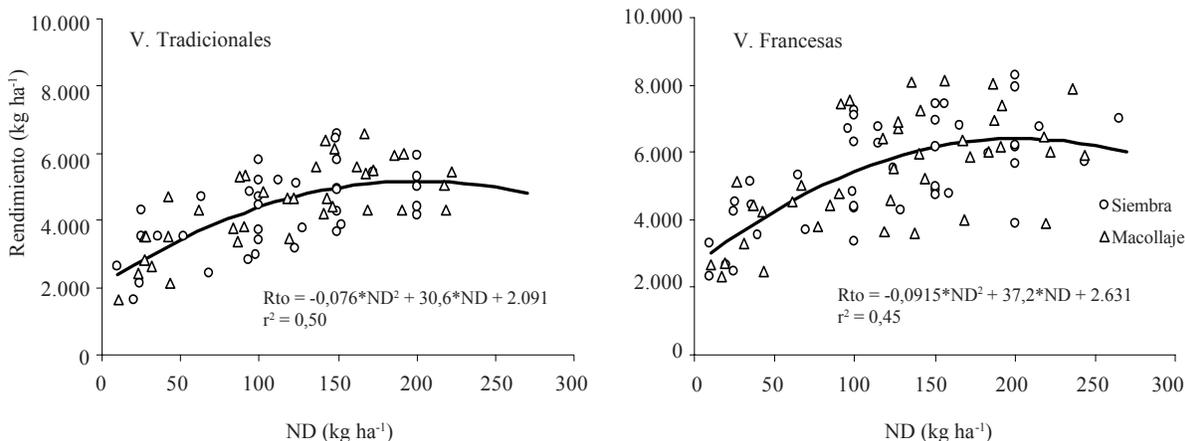


Figura 1. Relaciones entre el rendimiento de trigo y el N disponible (ND) a la siembra y al macollaje en función de la variedad en el SE Bonaerense.

Figure 1. Relationship between wheat grain yield and soil available N (ND) at sowing and tillering as a function of genotype in the SE of Buenos Aires Province.

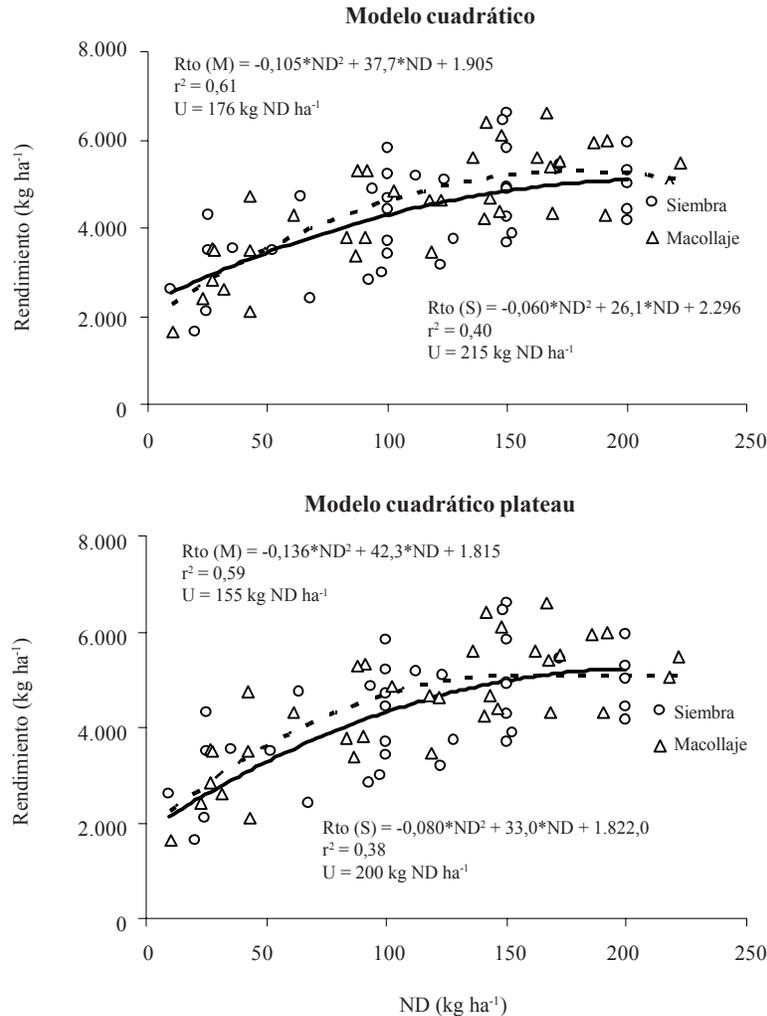


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento de las variedades de trigo tradicional y el N disponible (ND) a la siembra (línea llena) y al macollaje (línea punteada) en el SE Bonaerense descriptas con modelos cuadrático y cuadrático-plateau. U= umbral. Línea llena corresponde al ajuste de los datos para el momento de la siembra y la línea punteada al macollaje

Figure 2. Relationship between wheat grain yield and soil available N (ND) at sowing (full line) or tillering (dotted line) in the SE of Buenos Aires Province as described by quadratic and quadratic-plateau models. U= threshold. Full line correspond adjustment to sowing data and dashed lines to tillering data

minación del rendimiento. Carcova *et al.* (2004) reportaron que la relación entre el rendimiento de los cultivos y el N disponible es afectada por factores genéticos, ambientales y de manejo.

En las variedades francesas los umbrales de ND para máximo rendimiento determinados con el modelo cuadrático-plateau se incrementaron en función del nivel de rendimiento, siendo los mismos de 131 y 162 kg ha⁻¹ (pro-

medio de momento de fertilización) para años de bajo y alto rendimiento, respectivamente, lo que representa un incremento del 23% (Fig. 3). Sin embargo, el rendimiento máximo se incrementó de 4.180 a 6.480 kg ha⁻¹, lo que representa un aumento del 53%. Este incremento en el umbral de ND para el máximo rendimiento diferenciado entre años se debe a los cambios en la eficiencia de uso de N (EUN=kg grano kg ND⁻¹) determinada para el umbral de

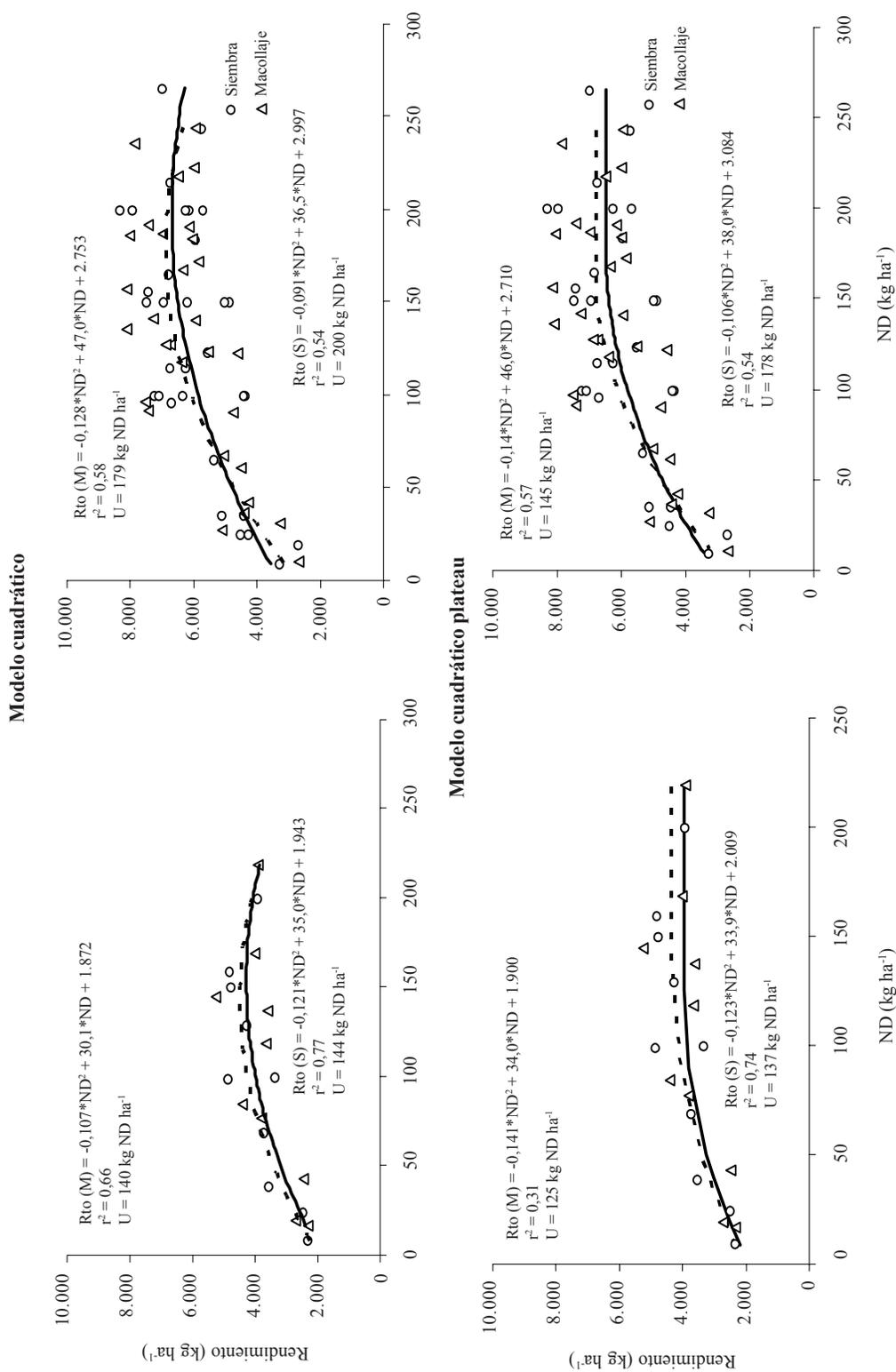


Figura 3. Relaciones entre el rendimiento de las variedades de trigo francesas y el N disponible (ND) a la siembra y al macollaje en el SE Bonaerense en función de los rendimientos bajos (izquierda) y altos (derecha). Las curvas presentan funciones de ajuste de los modelos cuadrático y cuadrático-plateau. U= umbral. Línea punteada al macollaje y datos para el momento de la siembra y la línea punteada al macollaje

Figure 3. Relationship between wheat grain yield and soil available N (ND) at sowing or tillering in the SE of Buenos Aires Province in a function of low (right) and high (left) grain yield. Two models are shown quadratic and quadratic plateau. U= threshold. Full line correspond adjustment to sowing data and dashed lines to tillering data.

ND, es decir, el valor de ND en el cual se alcanza el máximo rendimiento, fue de 40 y 32 kg grano kg ND⁻¹, para los años de alto y bajo rendimiento, respectivamente. Se han reportado variaciones en la EUN por efecto de la disponibilidad hídrica desde -10 hasta 44 kg grano kg ND⁻¹ (Anderson, 1992; Fischer *et al.*, 1993 y Asseng *et al.*, 2001).

Para ambas variedades y momentos de fertilización, el umbral de ND para máximo rendimiento del modelo cuadrático-plateau fue inferior al del modelo cuadrático (Figs. 2 y 3). Para la situación de alto rendimiento, los umbrales de ND determinados con el modelo cuadrático-plateau fueron de 178 y 162 kg ha⁻¹ (promedio de momentos de fertilización) para las variedades tradicionales y francesas, respectivamente (Figs. 2 y 3). Estos umbrales no coinciden con los reportados por Calviño *et al.* (2002), a pesar de que los rendimientos máximos de ambas variedades determinados en esta experiencia fueron similares a los reportados por dichos autores. El menor umbral de ND para las variedades francesas sería explicado por la diferente EUN determinada para máximos rendimientos, la cual fue de 30 y 40 kg grano kg ND⁻¹ (promedio de momento de fertilización), para variedades tradicionales y francesas, respectivamente. Esta diferencia en la EUN sería debida a que para las dosis más elevadas de N, las variedades tradicionales presentaron mayores concentraciones de proteína en grano que las variedades francesas (13 vs 10%, promedio de años y momentos de fertilización). Estos resultados coinciden con lo reportado

por Fowler (2003) quien determinó una relación inversa entre nivel de rendimiento y proteína, aún en suelos con elevada disponibilidad de N.

Por otra parte, para ambos modelos y variedades, es válido mencionar que para los años sin deficiencias hídricas, la relación entre el rendimiento y el ND para el muestreo de suelo y la fertilización realizados al macollaje presentó un mayor valor de r² y un menor umbral de ND que el muestreo y fertilización realizados a la siembra (Figs. 2 y 3). Este mejor ajuste y menor umbral de ND se explica en parte por la existencia de menores pérdidas de N, particularmente por lavado de nitratos, en la fertilización al macollaje (Barbieri *et al.*, 2008).

Una vez obtenidas las ecuaciones de respuesta de rendimiento versus la disponibilidad de N para años de alto y bajo rendimiento, momentos de muestreo-fertilización y variedades, se procedió a derivar los modelos cuadrático y cuadrático-plateau con el fin de obtener nuevas funciones que fueron graficadas utilizando el ND como variable independiente, y la eficiencia agronómica, kg grano kg ND⁻¹ como variable dependiente (Figs. 5 y 6). Estas Figuras permiten, previa selección de la recta a utilizar en función de los rendimientos esperados, ingresar horizontalmente con una relación de precios determinada y obtener el ND óptimo económico, lo que a su vez permite definir la DOE, como la diferencia entre éste y la disponibilidad de N en el suelo a la siembra o al macollaje. En la Figura 4 se presenta la evolución de la

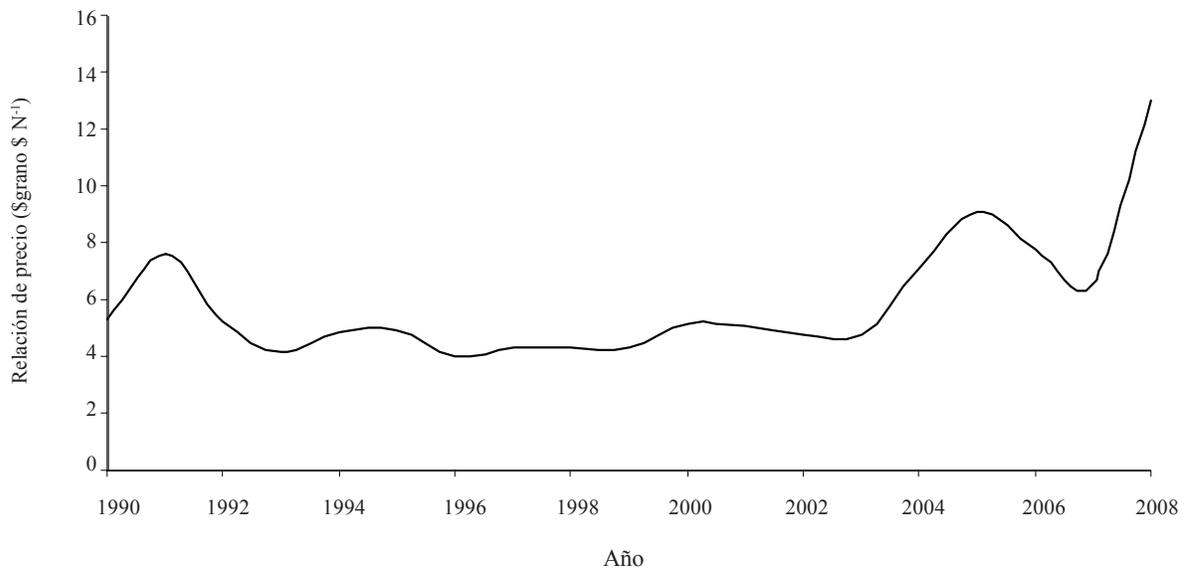


Figura 4. Relación de precio grano de trigo-N durante el período 1990-2008 en Argentina. Fuente: Series de precios AACREA.
Figure 4: Price relationship wheat grain-N during the 1990-2008 period in Argentina. Source: Price series AACREA.

relación de precios N-grano de trigo durante el período 1990-2008; durante este período el menor y mayor valor determinado para dicha relación fue de 4:1 y 13:1, respectivamente. Este último valor corresponde a setiembre del 2008, mientras que el valor promedio hasta el 2007 fue de 5,9:1.

Los ND óptimos económicos determinados para el modelo cuadrático-plateau fueron inferiores a los del modelo cuadrático, independientemente de la variedad, momento de fertilización, nivel de rendimiento y relación de precios (Figs. 5 y 6), lo que es consecuencia de lo observado en los modelos de respuesta a la fertilización (Figs. 2 y 3). Cerrato & Blackmer (1990) trabajando con maíz, señalaron que el modelo cuadrático tendía a sobreestimar los requerimientos de N y la utilización de este modelo determina ND óptimos que son demasiado altos desde el punto de vista agronómico. Dichos autores concluyen que el modelo cuadrático-plateau describe en forma más adecuada el rendimiento de los cultivos en función del N, ya

que aporta un ND óptimo aparentemente insesgado y agronómicamente aceptable. Para maíz bajo SD en el sudeste bonaerense Pagani *et al.* (2008) reportaron similares resultados.

Para las variedades tradicionales, utilizando la relación 5,9:1, el modelo cuadrático-plateau determinó ND óptimo económicos más bajos para la fertilización al macollaje respecto de la fertilización a la siembra (134 y 170 kg ND ha⁻¹), mientras que para la relación de 13:1 estos valores fueron de 108 y 125 kg ND ha⁻¹ (Fig. 5). Este comportamiento es debido a que el umbral físico de respuesta a la fertilización fue menor para la fertilización y el muestreo al macollaje (Figs. 2 y 3). Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de retrasar la aplicación de N como medio para incrementar la EUN y por ende la rentabilidad de la fertilización.

Para las variedades francesas y en los sitios con bajos rendimientos, utilizando la relación 5,9:1, el modelo cuadrático-plateau determinó ND óptimo económicos

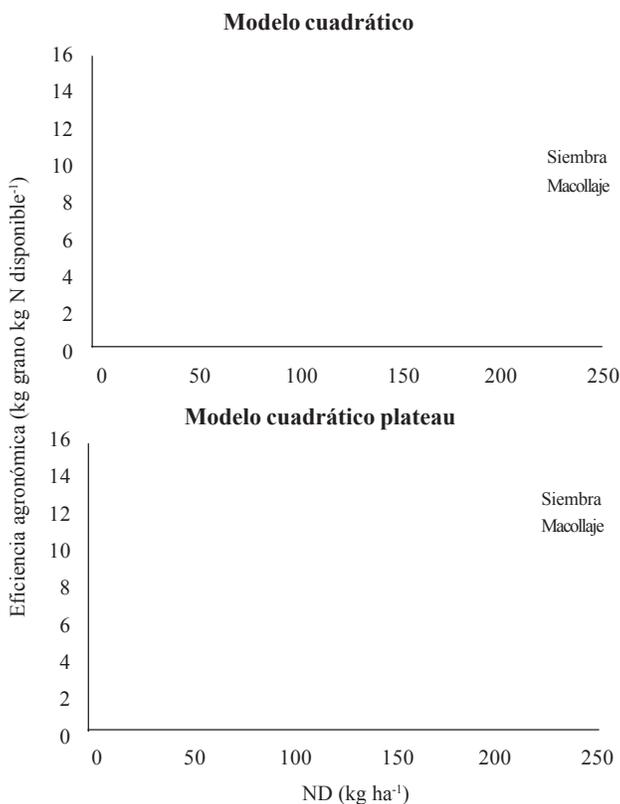


Figura 5. Funciones derivadas para el modelo cuadrático y cuadrático-plateau de las relaciones entre el rendimiento de las variedades tradicionales y el N disponible (ND) a la siembra y al macollaje en el SE Bonaerense.

Figure 5 Derivative functions for the quadratic and the quadratic-plateau model of the relationships between grain yield and available N level (ND) at sowing and tillering in the SE of Buenos Aires Province.

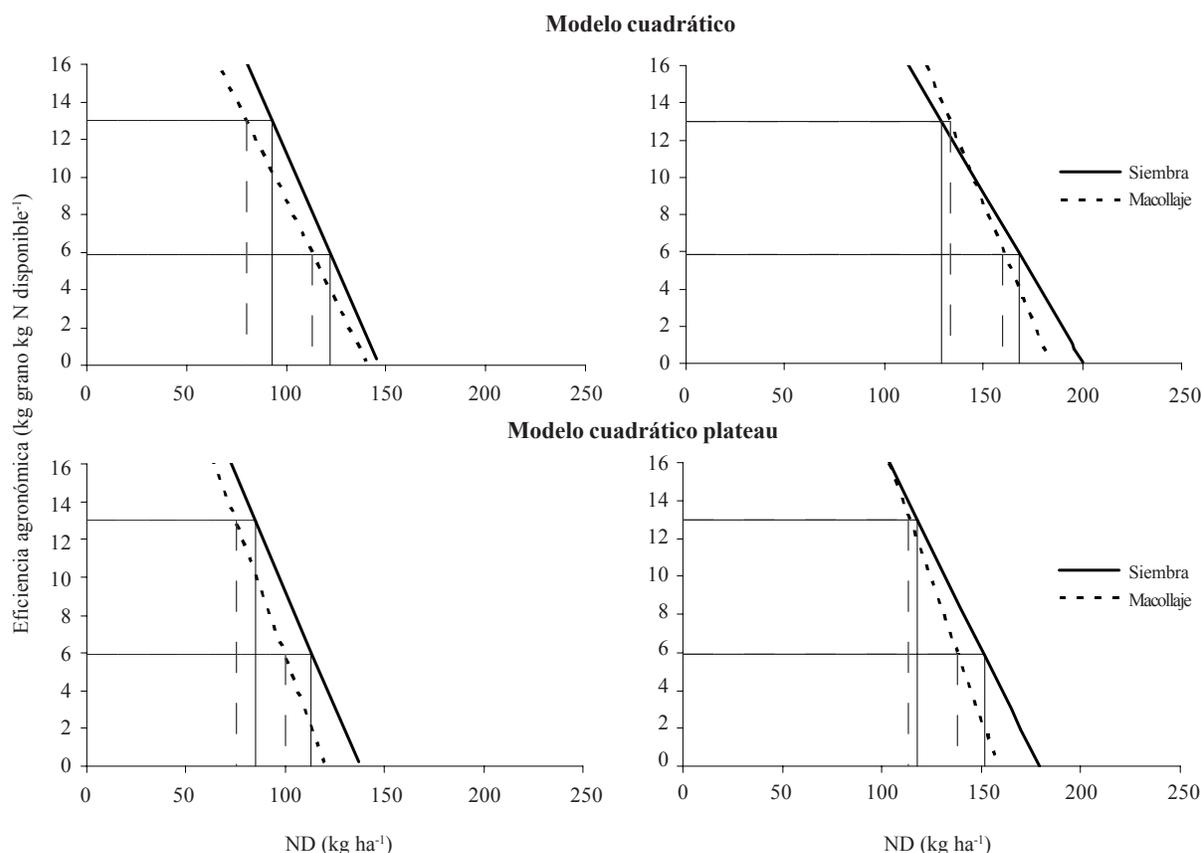


Figura 6. Funciones derivadas para el modelo cuadrático y cuadrático-plateau de las relaciones entre el rendimiento bajo (izquierda) y alto (derecha) de las variedades francesas y el nivel de N disponible (ND) a la siembra y al macollaje en el SE Bonaerense.

Figure 6. Derivative functions for the quadratic and the quadratic-plateau model of the relationships between grain yield and available N level (ND) at sowing and tillering in the SE of Buenos Aires Province.

levemente más bajos para la fertilización al macollaje respecto de la fertilización a la siembra (100 y 113 kg ND ha⁻¹), mientras que para la relación de 13:1 estos valores fueron de 75 y 85 kg ND ha⁻¹ (Fig. 6). Para la relación de 5,9:1 pero para altos rendimientos, el ND óptimo económico fue de 138 y 152 kg ha⁻¹ para la fertilización y muestreo al macollaje y a la siembra, respectivamente, mientras que para la relación de 13:1 el ND óptimo económico fue de 113 y 118 kg ha⁻¹ para la fertilización al macollaje y a la siembra, respectivamente (Fig. 6). Por lo tanto, estos resultados indican que el potencial de rendimiento afectó en mucha mayor medida el ND óptimo económico (37-38 kg ha⁻¹, promedio de relaciones de precios y momentos de fertilización) que el momento de fertilización (9,5-11,5 kg ha⁻¹, promedio de relaciones de precios y años).

Por otra parte, para las variedades francesas, el aumento de la relación de precio de 5,9:1 a 13:1 disminuyó el ND óptimo económico de 126 a 98 kg ha⁻¹ (promedio de años y momentos de fertilización). Por lo tanto, el duplicar el costo de los fertilizantes provocó una disminución algo menor en el ND óptimo que el cambio debido al potencial de rendimiento (Fig. 6). Estos resultados enfatizan la importancia de identificar con precisión el rendimiento objetivo del cultivo puesto que el mismo tendría un impacto mayor que los cambios en las relaciones de precios grano de trigo-N a la hora de definir la DOE. Estos resultados son similares a los informados para el cultivo de maíz por Pagani *et al.* (2008).

Para los años de altos rendimientos y para ambas variedades los resultados de esta experiencia indican que en

años con relaciones de precios de 5,9:1 los umbrales de ND óptimo económicos oscilaron de 134 a 170 kg ha⁻¹, mientras que para relaciones de precios N-grano de 13:1 los niveles de ND óptimos económicos fueron de 108-125 kg ha⁻¹. Los niveles de ND óptimos económicos para bajas relaciones N-grano son similares a los umbrales físicos de ND en suelo determinados a partir de balances de N simplificados reportados para el sudeste bonaerense (García *et al.*, 1998; Calviño *et al.*, 2002; Barbieri *et al.*, 2008). Sin embargo, estos resultados ponen de manifiesto la inconveniencia de llevar el suelo a un umbral fijo de N cuando las relaciones de precios N-grano son elevadas, lo que coincide con lo reportado por Álvarez (2008).

CONCLUSIONES

Los resultados de esta experiencia permiten concluir que el modelo cuadrático-plateau-produjo los resultados más racionales desde el punto de vista agronómico. Para ambas variedades, la fertilización en el estadio de macollaje permitió determinar DOE menores que la aplicación al momento de la siembra. Sin embargo, para altas y bajas relaciones de precios la diferencia en la DOE entre momentos de fertilización fue menor para las variedades francesas que para las tradicionales, lo que sería explicado por una mayor EUN de las primeras. Por último, para las variedades francesas la potencialidad del año condicionó la DOE en mayor medida que la relación de precios N-grano de trigo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Proyecto Específico INTA 5656, el AGR 261/08 de la UNMP y del Convenio INTA-PROFERTIL SA.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, R. 2008. Análisis de la conveniencia económica de utilizar umbrales fijos para recomendar la fertilización nitrogenada y fosforada de trigo. VII Congreso Nacional de trigo, Santa Rosa, La Pampa, 2-4 julio. Conferencia en CD.
- Anderson, WK. 1992. Increasing grain yield and water use of wheat in a rainfed Mediterranean type environment. *Aust. J. Agric. Res.* 43: 1-17.
- Asseng, S; NC Turner & BA Keating. 2001. Analysis of water- and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant and Soil* 233: 127-143.
- Barbieri, PA; HR Sainz Rozas & HE Echeverría. 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Canadian Journal of Plant Science* 88: 849-857.
- Barbieri, PA; HR Sainz Rozas & HE Echeverría. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Ciencia del suelo* 27(1): 41-47.
- Barbieri, PA; HR Sainz Rozas & HE Echeverría. 2007. Nitrógeno ¿aplicación a la siembra o al macollaje? Disponible en <http://www.inta.gov.ar/balcarce/noticias/2007/jorntrigo.htm>
- Baethgen, WE & MM Alley. 1989. Optimizing soil and fertilizer nitrogen use by intensively managed winter wheat. I. Crop nitrogen uptake. *Agron. J.* 81: 116-120.
- Barreto, HJ & Westerman RL. 1987. YIEDFIT: A computer program for determining economic fertilization rates. *J. Agron. Educ.* 16: 11-14.
- Black, CA. 1993. Soil fertility evaluation and control. Black CA (ed.). Lewis Publisher, USA. 721 pp.
- Blackmer, AM & JJ Meisinger. 1990. RE-examination of the methodology used for selecting nitrogen inputs into crop production. *J. Contam. Hydrol.* 78: 571-575.
- 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.
- Bullock, DG & DS Bullock. 1994. Quadratic and Quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison. *Agron. J.* 86: 191-195.
- Calviño, PA; HE Echeverría & M Redolatti. 2002. Diagnóstico de nitrógeno en trigo con antecesor soja bajo siembra directa en el sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo* 20: 36-42.
- Calviño, PA & VO Sadras 2002. On-farm assesment of constrints to wheat in relation to different previous crops. *J. Agric. Sci. Cambridge* 118: 157-163.
- Calviño, PA & M Redolatti. 2004. Resultados de dividir la dosis de nitrógeno en trigos de alto rendimiento en el Sudeste Bonaerense. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, II Simposio Nacional de Suelos Vertisólicos. Paraná, Entre Ríos, 22-25 junio de 2004. *Actas* en CD 7 pp.
- Carcova, J; G Abeledo & M Lopez Pereira. 2004. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Satorre, H; Vence, RL; Slafer, GA; de la Fuente, EB; Miralles, DJ; Otegui, ME & Savin, R (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.
- Echeverría, HE & H Sainz Rosas 2005. Nitrógeno. Pp. 69-95. En: HE, Echeverría & FO, García (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Falotico, JL; GA Studdert & HE Echeverría. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional en condiciones de agricultura continua. *Ciencia del Suelo* 17: 15-27.

- Fischer, RA; GN Howe & ZM Ibrahim. 1993 Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. I. Grain yield and protein content. *Field Crops Res.* 33: 37-56.
- Fowler, DB. 2003. Crop Nitrogen Demand and Grain Protein Concentration of Spring and Winter Wheat. *Agron. J.* 95: 260-265.
- García, F; K Fabrizi; A Berardo & F Justel. 1998. Fertilización de trigo en el Sudeste Bonaerense: respuesta, fuentes y momentos de aplicación. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 109-110.
- González Montaner, JL; GA Maddoni & MR Di Napoli. 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research* 51: 241-252.
- Melaj, MA; HE Echeverría; SC López; G Studdert; FH Andrade & NO Bárbaro. 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agron. J.* 95: 1525-1531.
- Nelson, LA; RD Voss & JT Pesek. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. p. 53-90. *In: OP Engelstad (ed.) Fertilizer technology and use, 3rd ed.* ASA, Madison.
- Pagani, A; HE Echeverría; HR Sainz Rozas & PA Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo (en prensa)*.
- Reussi Calvo, N & HE Echeverría 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Ciencia del Suelo* 24: 115-122.
- SAS. Institute Inc. 1985. User's guide. Statistics. Version 5. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Sainz Rozas, HR & HE Echeverría. 2008. Relevamiento del contenido de material orgánica y pH en suelos agrícolas de la región Pampeana y extrapampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes San Luis, 13-16 mayo. *Actas en CD* 6 p.
- Steinbach, HS. 2005. Capítulo II: Funciones de producción. *En: Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana.* Coordinador Roberto Álvarez. *Editorial Facultad de Agronomía* Pp: 13-25.