

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

Pablo A. Barbieri, Hernán E. Echeverría y Hernán R. Sainz Rozas
Unidad Integrada (UIB) EEA INTA Balcarce – Facultad de Ciencias Agrarias (UNMP)
CC. 276, (7620), Balcarce, Argentina.
pbarbieri@balcarce.inta.gov.ar

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 et al., 2008). Por lo tanto, es frecuente encontrar una respuesta generalizada al agregado de nitrógeno (N) (Calviño et al., 2002), particularmente bajo siembra directa (SD) (Falotico et al., 1999).

En la actualidad, 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 de profundidad) al momento de la siembra (González Montaner et al., 1997; Calviño et al., 2002). Se han reportado distintos umbrales de nitrato (N-NO_3^-) a la siembra según la zona, el rendimiento objetivo del cultivo y el sistema de labranza. Estos umbrales varían entre 150 kg N ha^{-1} (N en el suelo de 0 a 60 cm + N del fertilizante) para variedades tradicionales con rendimientos de aproximadamente 5000 kg ha^{-1} y 170 kg N ha^{-1} para variedades francesas con rendimientos superiores a 6000 kg ha^{-1} , ambos con antecesor soja bajo SD (Calviño et al., 2002).

En el sudeste Bonaerense, existe una elevada probabilidad de ocurrencia de excesos hídricos al comienzo de la estación de crecimiento del trigo (Reussi Calvo y Echeverría, 2006). En este contexto, la aplicación de N de base a la siembra puede resultar en mayores pérdidas de N; reportándose menores rendimientos, 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 de la 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). Alvarez (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 solo en años con relaciones de precios favorables. Dado que en el último año se ha incrementado significativamente dicha relación, es necesario evaluar la incidencia de dichos cambios sobre la dosis óptima económica (DOE). La

fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo es una práctica habitual en el SE Bonaerense. Sin embargo, la información local para definir la dosis de N que responde al máximo beneficio económico es escasa. El objetivo de este trabajo fue determinar la DOE del fertilizante nitrogenado para el cultivo de trigo en función de la variedad (tradicional o francesa) y el momento de aplicación del N (siembra o macollaje).

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 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 en los 0-60 cm de profundidad para el momento de la siembra y del macollaje. La información utilizada provino de 19 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.

Para ambas variedades, se ajustó el modelo matemático de respuesta cuadrático-plateau dado que el mismo describe en forma adecuada el rendimiento de los cultivos en función del N, ya que aporta un ND óptimo aparentemente insesgado y agrónomicamente aceptable (Cerrato y Blackmer, 1990). Luego se realizó la derivada de dicho modelo y se graficó la eficiencia agronómica ($\text{kg grano kg N disponible}^{-1}$) 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:

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

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 éste) por haber usado crédito para adquirirlo. Se utilizó el valor neto del grano, 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

Los rendimientos del cultivo de trigo variaron según el nivel de disponibilidad de N; las variedades tradicionales (sitios 1 a 9) rindieron entre 3114 y 5092 kg ha⁻¹, mientras que las variedades francesas (sitios 10 a 19) rindieron entre 4370 y 6834 kg ha⁻¹. Los rendimientos obtenidos resultaron similares a los reportados por Calviño y Sadras (2002) para suelos de similares características y con elevada disponibilidad de N.

Para la totalidad de los ensayos, el rendimiento de las variedades tradicionales y francesas de trigo se relacionó con el ND (N mineral en suelo + fertilizante) al momento de la siembra y al macollaje (Fig. 1). Cuando no se discriminó por momento de fertilización, los coeficientes de determinación (r^2) de dicha relación fueron de 0.50 y 0.54, para las variedades tradicionales y francesas, respectivamente. Cuando el ajuste de las variedades se realizó para cada momento de fertilización (Fig. 2), se determinó que en ambas variedades el muestreo al momento del macollaje mostró mayor coeficiente de correlación, indicando una relación más estrecha respecto del muestreo a la siembra, y por consiguiente mayor confiabilidad (Barbieri et al., 2009). Por otra parte, el menor umbral de ND determinado para la aplicación de N al macollaje se explica en parte por la existencia de menores pérdidas de N, particularmente por lavado de nitratos (Barbieri et al., 2008), como consecuencia de la elevada probabilidad de excesos hídricos durante los estadios iniciales del ciclo del cultivo (Calviño y Sadras 2002; Reussi Calvo y Echeverría, 2006).

Las variedades tradicionales mostraron un umbral de ND superior al determinado para las variedades francesas (Fig. 2). El menor umbral de ND para las variedades francesas sería explicado por la mayor EUN (kg grano kg ND⁻¹) determinada para máximos rendimientos, la cual fue de 30 y 40 grano kg ND⁻¹ (promedio de los dos momentos 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.

Una vez obtenidas las ecuaciones de respuesta de rendimiento a la disponibilidad de N, momentos de muestreo-fertilización y variedades, se procedió a derivar la ecuación cuadrática 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 (Fig. 3). Esto permitió desarrollar tablas de recomendación de fertilización nitrogenada en trigo en función de la variedad tradicional (Tabla 2) o francesa (Tabla 3) y dentro de cada variedad, el momento de fertilización (siembra o macollaje). Así, previa selección de la tabla a utilizar, puede ingresarse a la misma con una relación de precios y disponibilidad de N determinada y de esta manera obtener la DOE para la condición seleccionada. Cuando se fertilice con fosfato diamónico o monoamónico con posterioridad a la determinación del contenido de N, se deberá descontar a la DOE los kg de N aportados por el fertilizante fosforado. Es válido mencionar que ante una elevada disponibilidad de N, generalmente no es rentable la aplicación de dosis menores a 30 kg N ha⁻¹. Por lo tanto, en estas situaciones no es recomendable la fertilización, si se incluye el costo de la aplicación. Debido a esto, es que no se consideran en las Tablas 2 y 3 valores de DOEs menores a 30 kg N ha⁻¹.

En la Figura 4 se presenta la evolución de la relación de precios N-grano de trigo durante 1990-2008. En dicho período el menor y mayor valor determinado para la 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. Para las variedades tradicionales, utilizando la relación 5.9:1, el modelo 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. 3). Este comportamiento es debido a que el umbral físico de respuesta a la fertilización fue menor para la fertilización y el muestreo al macollaje (Fig. 2). Un comportamiento similar fue observado en las variedades francesas en donde para la relación de 5.9:1 el ND óptimo económico fue de 138 y 152 kg ha⁻¹ para la fertilización y muestreo al macollaje y a la siembra, respectivamente. 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. 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 ambas variedades, los resultados de esta experiencia indican que en años con relaciones de precios de 5.9:1, los umbrales de ND óptimos económicos oscilaron entre 134 a 170 kg ha⁻¹, mientras que para relaciones de precios

N-grano de 13:1 los niveles de ND óptimos económicos se ubicaron entre 108 y 125 kg ha⁻¹. Los niveles de ND óptimos económicos para bajas relaciones de precio entre N-grano fueron 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 Alvarez (2008).

En síntesis, los resultados de esta experiencia permiten concluir que para ambas variedades, el estadio de macollaje permitió determinar DOE menores que 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.

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

Alvarez, 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.
 Barbieri, P.A., H.R. Sainz Rozas y H.E. 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, P.A., H.R. Sainz Rozas y H.E. 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 (enviado).
 Blackmer, A.M. y J.J. Meisinger. 1990. Re-examination of the methodology used for selecting nitrogen inputs into crop production. J. Contam. Hydrol. 78: 571-575.
 Calviño, P.A., H.E. Echeverría y 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, P.A. y V.O. Sadras. 2002. On-farm assesment of constraints to wheat in relation to different previous crops. J. Agric. Sci. Cambridge. 118: 157-163.
 Cerrato, M.E. y A.M. Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. Agron. J. 82:138-143.
 Falotico, J.L., G.A. Studdert y H.E. Echeverría. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional en condiciones de agricultura continua. Ciencia del Suelo 17: 15-27.
 Fowler, D.B. 2003. Crop Nitrogen Demand and Grain Protein Concentration of Spring and Winter Wheat. Agron. J. 95:260-265.
 García, F, K. Fabrizi, A. Berardo y 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 J.L., G.A. 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 Crop Research 51: 241-252.
 Melaj, M.A., H.E. Echeverría, S.C. López, G. Studdert, F.H. Andrade y N.O. Bárbaro. 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. Agron. J. 95: 1525-1531.
 Pagani, A., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo (en prensa).
 Reussi Calvo, N. y H.E. Echeverría. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. Ciencia del Suelo 24 (2): 115-122.
 Sainz Rozas, H.R. y H.E. Echeverría. 2008. Relevamiento del contenido de material orgánico 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. ■

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.

Sitio	Año	Localidad	Variedad	Antecesor	MO (%)	pH	P-Bray (mg kg ⁻¹)	N-NO ₃ ⁻		Precipitaciones jun-dic mm
								Siembra	Macollaje	
								kg ha ⁻¹		
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	Tandil	Tradicional	Maíz	5.8	6.0	25.9	45.4	28.8	302
6	2004	Balcarce	Tradicional	Soja	5.7	6.1	11.0	67.8	23.1	450
7	2004	Tandil	Tradicional	Maíz	6.1	6.2	12.0	63.6	42.2	288
8	2004	Mar del Plata	Tradicional	Maíz	5.6	5.9	13.0	92.5	26.6	452
9	2005	Balcarce	Tradicional	Girasol	5.3	6.0	8.2	52.2	27.7	397
10	2002	Otamendi	Francesa	Girasol	5.1	6.2	17.9	21.0	7.9	581
11	2002	Balcarce	Francesa	Soja	5.7	6.0	14.3	29.1	34.7	731
12	2002	Tandil	Francesa	Maíz	5.3	6.0	20.3	7.7	42.1	660
13	2003	Otamendi	Francesa	Girasol	5.1	6.2	19.7	24.3	69.7	666
14	2003	Balcarce	Francesa	Girasol	4.2	6.2	17.1	26.2	44.5	618
15	2003	Tandil	Francesa	Maíz	5.8	6.0	25.9	25.1	22.1	302
16	2005	Mar del Plata	Francesa	Soja	5.9	5.6	13.8	35.8	36.5	512
17	2006	Mar del Plata	Francesa	Trigo/Soja	5.2	6.2	17.2	123.8	122.3	471
18*	2007	Mar del Plata	Francesa	Soja	5.4	6.1	40.0	65.0	-	416
19§	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.

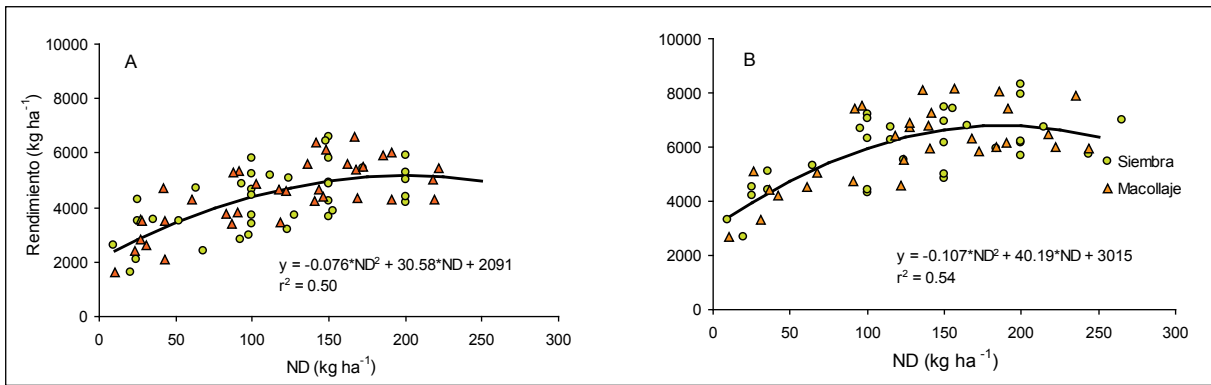


Figura 1. Relaciones entre el rendimiento de trigo de variedades tradicionales (A) y francesas (B) y el N disponible (ND) a la siembra y al macollaje en función de la variedad en el SE Bonaerense.

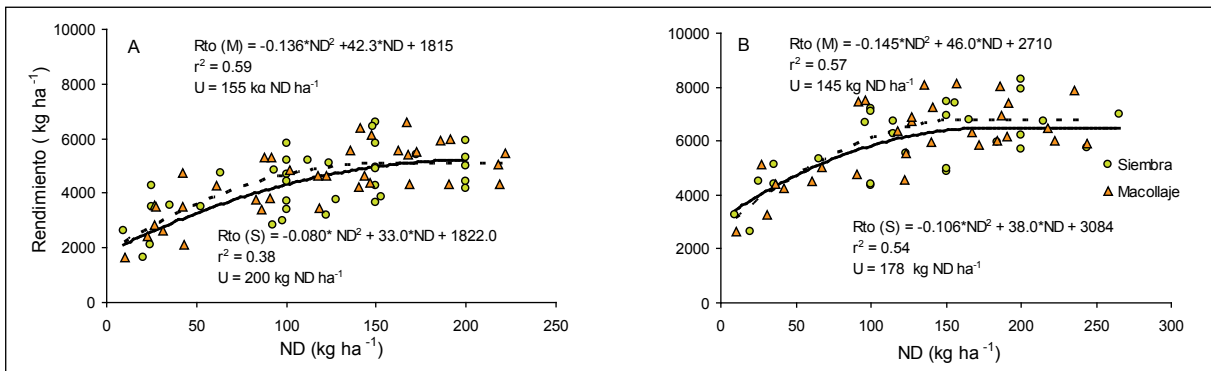


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento de las variedades de trigo tradicionales (A) y francesas (B) y el N disponible (ND) a la siembra (línea llena) y al macollaje (línea punteada) en el SE Bonaerense U= umbral.

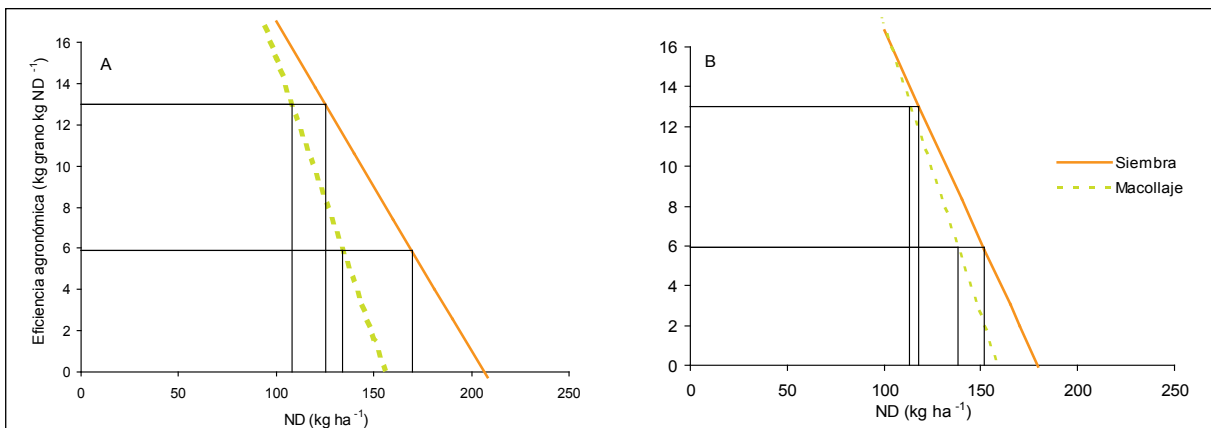


Figura 3. Relaciones entre el rendimiento de las variedades de trigo tradicionales (A) y francesas (B) y el N disponible (ND) a la siembra y al macollaje en el SE Bonaerense.

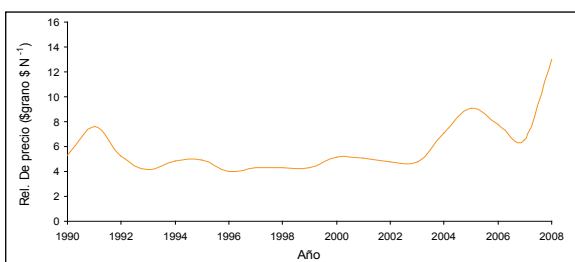


Figura 4. Relación de precios N-grano de trigo durante el período 1990-2008 en Argentina. Fuente: Series de precios AACREA.

Tabla 2. Dosis óptimas económicas (DOE) de fertilización nitrogenada favorables para las variedades tradicionales en función de la relación de precios kg de trigo/N fertilizante y el contenido de N mineral en el suelo (0-60 cm) para la fertilización al momento de la siembra o macollaje.

Fertilización Siembra	Relación de precios (kg grano kg N ⁻¹)										
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N suelo (kg ha ⁻¹)	kg N ha ⁻¹										
20	149	143	136	130	124	118	111	105	99	93	86
30	139	133	126	120	114	108	101	95	89	83	76
40	129	123	116	110	104	98	91	85	79	73	66
50	119	113	106	100	94	88	81	75	69	63	56
60	109	103	96	90	84	78	71	65	59	53	46
70	99	93	86	80	74	68	61	55	49	43	36
80	89	83	76	70	64	58	51	45	39	33	0
90	79	73	66	60	54	48	41	35	0	0	0
100	69	63	56	50	44	38	31	0	0	0	0
110	59	53	46	40	34	0	0	0	0	0	0
120	49	43	36	30	0	0	0	0	0	0	0
Fertilización Macollaje	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N suelo (kg ha ⁻¹)	kg N ha ⁻¹										
20	114	110	107	103	99	96	92	88	84	81	77
30	104	100	97	93	89	86	82	78	74	71	67
40	94	90	87	83	79	76	72	68	64	61	57
50	84	80	77	73	69	66	62	58	54	51	47
60	74	70	67	63	59	56	52	48	44	41	37
70	64	60	57	53	49	46	42	38	34	31	0
80	54	50	47	43	39	36	32	0	0	0	0
90	44	40	37	33	0	0	0	0	0	0	0
100	34	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3. Dosis óptimas económicas (DOE) de fertilización nitrogenada favorables para las variedades francesas en función de la relación de precios kg de trigo/N fertilizante y el contenido de N mineral en el suelo (0-60 cm) para la fertilización al momento de la siembra o macollaje.

Fertilización Siembra	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N suelo (kg ha ⁻¹)	kg N ha ⁻¹										
20	131	127	122	117	112	108	103	98	94	89	84
30	121	117	112	107	102	98	93	88	84	79	74
40	111	107	102	97	92	88	83	78	74	69	64
50	101	97	92	87	82	78	73	68	64	59	54
60	91	87	82	77	72	68	63	58	54	49	44
70	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34
80	71	67	62	57	52	48	43	38	34	0	0
90	61	57	52	47	42	38	33	0	0	0	0
100	51	47	42	37	32	0	0	0	0	0	0
110	41	37	32	0	0	0	0	0	0	0	0
120	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fertilización Macollaje	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N suelo (kg ha ⁻¹)	kg N ha ⁻¹										
20	118	115	111	108	104	101	97	94	91	87	84
30	108	105	101	98	94	91	87	84	81	77	74
40	98	95	91	88	84	81	77	74	71	67	64
50	88	85	81	78	74	71	67	64	61	57	54
60	78	75	71	68	64	61	57	54	51	47	44
70	68	65	61	58	54	51	47	44	41	37	34
80	58	55	51	48	44	41	37	34	31	0	0
90	48	45	41	38	34	31	0	0	0	0	0
100	38	35	31	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0