La fertilización nitrogenada racional del cultivo de maíz

En este artículo se presentan los resultados del tercer año de un ensayo de maíz en el que se comparan, en las condiciones de Castilla-La Mancha, dosis optimizadas de N con las convencionales. Se presenta la parte de resultados relativa a materia seca de los distintos órganos, rendimientos y extracciones de nitrógeno (N), para en un posterior artículo presentar las eficiencias en el uso del N y las curvas de respuesta del cultivo.

Horacio López Córcoles[1], José Arturo de Juan Valero[2], José Fernando Ortega Álvarez[2], José María Tarjuelo Martín-Benito[2].

[1] Instituto Técnico Agronómico de Albacete (ITAP).

[2] Centro Regional de Estudios del Agua. Albacete (CREA). Universidad de Castilla-La Mancha.



De los resultados expuestos se desprende la necesidad de optimizar las dosis de nitrógeno en este cultivo.

La contaminación difusa derivada de la agricultura es hoy en día uno de los grandes problemas medioambientales en muchos países de Europa. En particular, existe una gran preocupación por el aumento de la concentración de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas, debido a su efecto en la salud cuando es agua para consumo humano y al deterioro que se produce en el ecosistema acuático al favorecer la eutrofización de las aguas.

La importante superficie de cereales en Europa, y especialmente en España, hace que el manejo de la fertilización nitrogenada sea cada vez más importante para que, manteniendo los rendimientos, se obtenga un producto con una adecuada calidad. Por otro lado, los sistemas de riego por aspersión, en creciente aumento en las zonas semiáridas, han facilitado y generalizado la práctica de la fertirrigación. Todo ello hacen necesarios la revisión de las dosis y el momento de la fertilización nitrogenada a recomendar para estos cultivos, abordando en este caso el cultivo del maíz.

Material y métodos

El ensayo se realizó en un suelo de 0,60 m de profundidad (Calcixerollic-Xerochrepts) durante tres años, 1999 a 2001, en la finca experimental de Las Tiesas (30S 5784322) (Albacete). El suelo presentaba una textura franco-arcillo-arenosa, con un pH de 8,5 (1:2,5 en agua). El cultivo precedente fue adormidera (*Papaver somniferum nigrum L.*). Se realizaron tres tratamientos (testigo sin fertilizar (T; 0 kg·ha^{-1}), dosis optimizada (No; 175 kg·ha^{-1}, año 1999; 150 kg·ha^{-1}, año 2000; y 130 kg·ha^{-1}, año 2001 y tratamiento convencional (Nc; 300 kg·ha^{-1}) en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. En esta publicación se presentan los datos relativos a la campaña 2001.

La aplicación del fertilizante N de cobertera para No se hizo en V6 (5/7/01) en una sola aplicación. El suministro del fertilizante N de cobertera para Nc se hizo en tres momentos: V6 (5/7/01), V8 (13/7/01) y V10 (18/7/01). El campo de ensayo fue fertilizado en presiembra con fósforo y potasio de acuerdo a las recomenda-

ciones consecuentes de un análisis de suelo. El híbrido fue sembrado a una densidad de 8,7 plantas m^{-2} en la tercera semana de mayo. La parcela elemental (81,9 m^2) era de 13,0 m de largo y consistía en nueve filas separadas 0,7 m.

Las muestras de suelo se tomaron a dos profundidades (0–25 y 25–50 cm) usando un tomamuestras manual (cada una estaba compuesta de cinco submuestras) a finales de abril (muestra de presiembra) y a finales de noviembre (muestra de postcosecha). Las muestras fueron rápidamente extractadas con 1 N KCl y $CaSO_4$ $2H_2O$ para la determinación del N mineral (NH_4^+ y NO_3^-, respectivamente). Las concentraciones fueron medidas mediante el espectrofotómetro.

La evapotranspiración del cultivo (ET) se obtuvo siguiendo la metodología utilizada por el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SARA). La programación del riego, con el objetivo de máxima producción, se realizó mediante un balance hídrico atendiendo a la metodología propuesta por Doorenbos y Kassam (1986). El sistema de riego empleado fue una cobertura de aspersión total enterrada, en un marco de 15 x 15 m, a una presión de trabajo de 0,32 MPa y una pluviosidad media de 7 mm h^{-1}. La lámina de riego total aplicada fue de 6.895 m^3 ha^{-1}.

No existieron problemas de plagas y enfermedades y se hizo control de malas hierbas. Se realizaron los tratamientos herbicidas e insecticidas normales en la zona, manteniendo el ensayo libre de malas hierbas y de plagas.

La materia seca aérea fue medida en cuatro momentos: seis hojas (V6) (Ritchie and Hanway, 1993); emisión de penacho (VT); cinco semanas después de antesis (R2-R3) y en cosecha (R6). Cada muestra seleccionada al azar, compuesta por cinco plantas consecutivas de cada parcela, fue separada en hojas, tallos, brácteas, zuro y grano, los cuales fueron secados a 70 °C, durante tres o cuatro días hasta obtener peso constante. Posteriormente, fueron tamizados por una criba de 1 mm de luz y se determinó la concentración de N total mediante el método Kjeldahl. En cosecha, el rendimiento en grano se determinó en una superficie de 6,0 m^2 y referido a la humedad base de 140 g kg^{-1}.

Rendimiento en grano e índice de cosecha

Materia seca aérea

Los valores de materia seca total (MST) obtenidos en el estado R6 (121 DDE(días desde emergencia)) (**figura 1**) para el tratamiento Nc (2.643 g m^{-2}) son elevados y están próximos a los máximos encontrados en la bibliografía (Flannery, 1986; Overman et al., 1994; Aguilar, 1994). Esto pone de manifiesto que en la zona de estudio se producen elevadas cantidades de materia seca (MS) por las óptimas condiciones de cultivo (condiciones climáticas, manejo de cultivo y, principalmente, lo referido a la gestión del riego), siendo de las más altas las referidas en la bibliografía.

En el estado V6 el análisis de varianza indica que no existen diferencias significativas de la MST, correspondiendo el mayor valor al tratamiento Nc (88 g m^{-2}). Ya en floración masculina (VT, 74 DDE), los mayores valores corresponden a los tratamientos No y Nc, sin diferencias significativas entre ellos, aunque sí respecto al T, al que sobrepasan en algo más del 30% (**foto 1**).

A partir del estado R2R3 (104 DDE), las diferencias son más patentes, de forma que los tratamientos No y Nc presentan diferencias significativas con respecto al tratamiento T, superando el primer grupo los 1500 g m^{-2} de MST. En la madurez fisiológica

CUADRO I.

RESUMEN DE LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO PARA EL CULTIVO DE MAÍZ (CAMPAÑA 2001).

Etapa	Periodo de tiempo	Días de ciclo	ETc		Volumen de agua aplicada	
			Valor acumulado (mm)	% sobre total	Valor acumulado (mm)	% sobre total
1	30/5 - 23/6	25	60.3	10%	133.0	19%

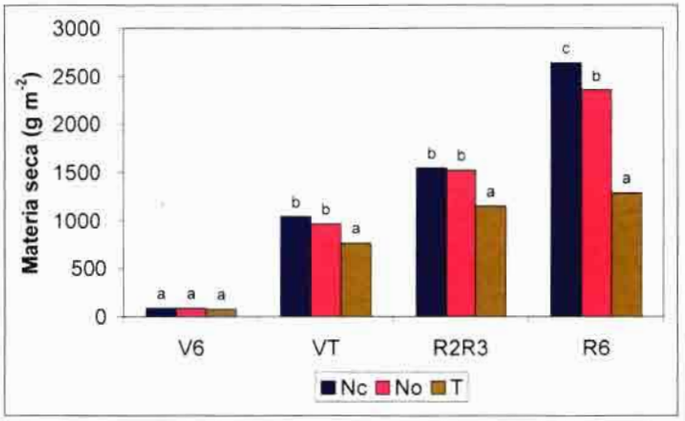
CUADRO II.

FECHAS DE MUESTREO DURANTE LA CAMPAÑA DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS DE CRECIMIENTO.

Número de muestreo	Estado de desarrollo	Fecha	DDS
M1	V6	6-julio	38
M2	VT	13-agosto	76
M3	R2R3	4-septiembre	98

FIGURA 1.

Materia seca total aérea (MST) en los distintos estados fenológicos estudiados.



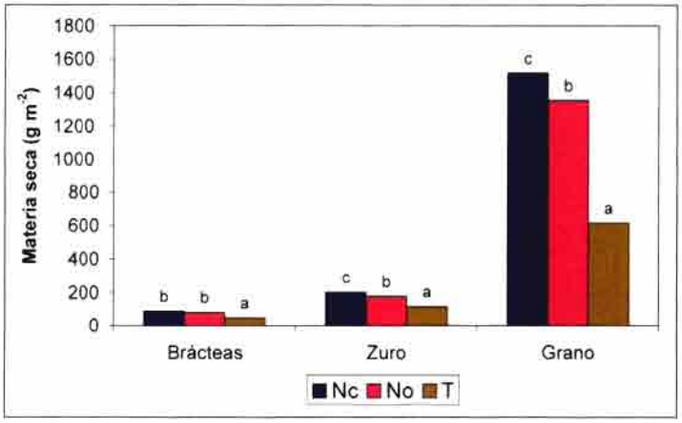
Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha = 0,05$)



Foto 1. Tratamiento T (a la izquierda) y tratamiento Nc (a la derecha) en estado V9.

FIGURA 2.

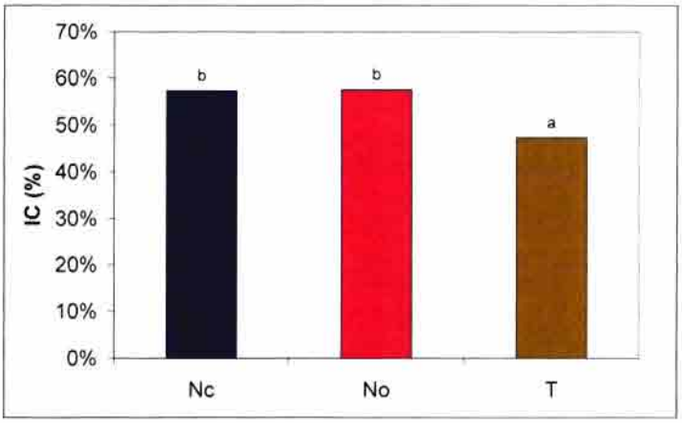
Materia seca de las brácteas, zuro y grano en el estado fenológico R6.



Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha = 0,05$)

FIGURA 3.

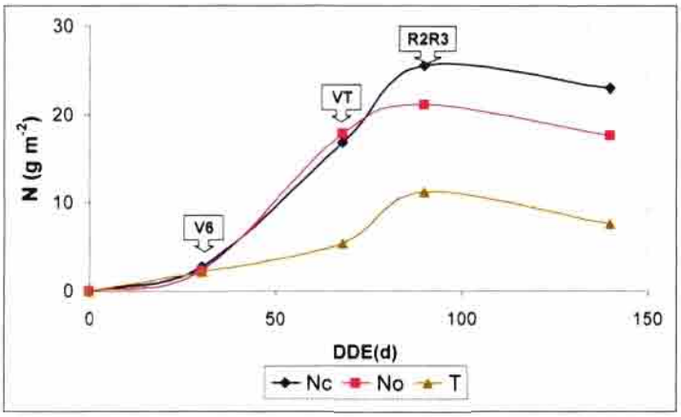
Índice de cosecha (IC) para los tratamientos de fertilización nitrogenada.



Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha = 0,05$)

FIGURA 4.

Nitrógeno absorbido por el sistema aéreo (N_t) de las plantas de maíz, en función de los días desde emergencia (DDE).



Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo.

(R6) el comportamiento es el mismo que en R2R3: los tratamientos No y Nc (sin diferencias significativas entre ellos) se desmarcan claramente del tratamiento T, hasta en un 193%.

Brácteas, zuro y grano

En el estadio de madurez fisiológica (R6; 121 DDE), se ha desglosado la MS de la mazorca en sus diferentes componentes: brácteas, zuro y grano (**figura 2**).

En el análisis de varianza se observan diferencias significativas para los tres órganos sometidos a estudio. Las brácteas y el zuro tienen una participación porcentual pequeña en el conjunto de la mazorca (5% y 11%, respectivamente) cuando el cultivo no ha sufrido un déficit nitrogenado, y aumentan al 6% y 15%, respectivamente, cuando se presentan carencias nitrogenadas.

En la MS del grano, existieron diferencias significativas entre el tratamiento Nc (1.517 g m^{-2}), el tratamiento No (1.356 g m^{-2}) y el tratamiento T (616 g m^{-2}).

Los resultados de la campaña 2001 hay que considerarlos en el marco de monocultivo, con dos años de maíz como cultivo precedente. En una alternativa de cultivos distinta, los resultados podrían ser diferentes.

Índice de cosecha

El índice de cosecha (IC), definido como la relación entre el peso seco del grano y el peso seco total de la planta en maduración es utilizado para evaluar la eficiencia de un cultivo (**figura 3**).

El mayor valor de IC se encontró en el tratamiento Nc (57,4%), mientras que el menor IC se encontró en el T (47,4%), con diferencias significativas.

Repartición de N entre los distintos órganos aéreos

Analizando la absorción de N por el conjunto de órganos aéreos en los diferentes estadios, en el V6 (835 grados calor días (GCD)) no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (**figura 4**) oscilando los valores entre 2,1 y 2,8 g m^{-2}. Estas cantidades suponen un 11% (para los tratamientos fertilizados) y un 19% (tratamiento T) de la máxima cantidad medida de N absorbido (estadio R2R3, 1442 GCD).

El nitrógeno absorbido por el sistema aéreo (Nt) se incrementa drásticamente en el período desde V6 a VT. En el estadio VT (835 GCD) ya se observan diferencias significativas (superiores a 11 g m^{-2}) entre los tratamientos que reciben aportes de N mediante fertilizante (Nc y No) y el tratamiento T. En VT se observa que las diferencias resultantes entre el tratamiento T y el No (**figura 4**) se mantienen a lo largo del período de cultivo, mientras que las diferencias entre el Nc y el resto aumentan en el estadio R2R3 y se mantienen en el estadio R6.

Evolución del N absorbido por el sistema aéreo

Según Andrade et al. (1996), el N es acumulado en las partes vegetativas hasta los diez o quince días posteriores a la floración para luego ser removilizado hacia los granos en crecimiento en función de la relación fuente/sumidero (source/sink), lo que coincide plenamente con los resultados obtenidos en este experimento. En el estadio R2R3, la planta de maíz presenta su máximo de absorción de N (**figura 4**), que para el tratamiento Nc resultó ser de 25,5 g m^{-2}, seguido del tratamiento No con 21,2 g m^{-2}, sin diferencias significativas entre ellos. La menor absorción de N en este estadio la presentó el tratamiento T (11,3 g m^{-2}), siendo esta cifra significativamente diferente a las anteriores. Esto coincide con otros cultivos anuales, en los que la absorción de N por

los distintos órganos aéreos alcanza un máximo antes de la madurez fisiológica, seguido por una progresiva disminución (Wetslaar y Farquhar, 1980). Estas pérdidas de N en planta ocurren, normalmente, después de antesis y son generalmente mayores cuanto más elevados son los contenidos de N edáficos. En el estadio R6, se observa que se ha producido la mencionada disminución del N absorbido, que oscila entre los 3,6 g m^{-2} del tratamiento T y los 2,5 g m^{-2} del tratamiento Nc, si bien estas diferencias no son estadísticamente significativas, representan entre el 10% (tratamiento Nc) y el 51% (tratamiento T) del total del N acumulado por el sistema aéreo en R6. Aunque no fueron medidas directamente, las pérdidas de NH_3 por volatilización podrían ser la principal causa de pérdidas del fertilizante aplicado (Francis et al., 1993).

Absorción en el estadio R6 y su influencia en el rendimiento

La absorción de N por el conjunto de órganos aéreos en el estadio R6 es significativamente diferente en los distintos tratamientos. El máximo de acumulación de N lo presenta el tratamiento Nc (23,0 g m^{-2}), significativamente diferente del tratamiento No (17,7 g m^{-2}) y éste, a su vez, significativamente diferente del tratamiento T (7,7 g m^{-2}) (**figura 4**). Se encontró una relación lineal entre el N acumulado en la MS aérea total en el estado R6 en relación al rendimiento grano (Rend Gr) (**figura 5**).

En el estadio fenológico R6, el efecto de los distintos tratamientos fue estadísticamente significativo sobre las extracciones de N por la biomasa aérea vegetativa y reproductiva (**figura 6**). Las extracciones de N por la biomasa aérea vegetativa del tratamiento Nc (6,2 g m^{-2}; 27% sobre el total extraído) fueron significativamente superiores a las del tratamiento No (4,8 g m^{-2}; 27%) y éstas, a su vez, significativamente superiores a las del tratamiento T (2,5 g m^{-2}; 33%). Una respuesta similar ocurre con las extracciones de N por la biomasa aérea reproductiva; el tratamiento Nc extrajo una cantidad de N (16,8 g m^{-2}; 73%) significativamente superior a la del tratamiento No (12,9 g m^{-2}; 73%) mientras que el tratamiento T extrajo una cantidad significativamente inferior a la del resto de tratamientos (5,2 g m^{-2}; 67%).

Acumulación de N en los distintos órganos aéreos

La acumulación del N absorbido por los principales órganos aéreos y la removilización aparente puede ser observada en la **figura 7**. Hasta la floración masculina, (VT, 68 DDE) se produce la acumulación del N en los órganos vegetativos, superior para el tratamiento Nc y menor en el caso del T. En período desde VT hasta R2R3 (90 DDE) se produce un comportamiento diferente para los distintos tratamientos: el Nc sigue acumulando N en el conjunto de tallo y hojas, principalmente en el tallo, y los otros dos tratamientos (No y T) mantienen estos valores. En ese mismo período la mazorca ha acumulado N de forma gradual para cada tratamiento. En el período entre R2R3 y R6 (140 DDE), la mazorca sigue absorbiendo N en el caso de los tratamientos No y Nc, aunque en mayor medida en el tratamiento Nc, produciéndose una removilización aparente desde el tallo y las hojas. En el caso del tratamiento T, la mazorca incrementa el contenido en N en una mínima proporción, acusando el déficit nitrogenado.

Acumulación de N en el grano

Los valores de acumulación de N en grano son menores (**figura 8b**) que en otras experiencias (Maturano, 2002), debido principalmente a la menor concentración de N en este órgano (figura 8a) puesto que los rendimientos son similares. En efecto, la concentración de N en grano de los tratamientos fertilizados es inferior a los valores difundidos por otros autores: 16,0 g kg^{-1} (Hagin y Tucker, 1982), 15,5 ±2,0 g kg^{-1} (Meisinger y Randall, 1991). Sin embargo, Cerrato y Blacmer (1990) encontraron valores más dispersos: entre 10 y 16 g kg^{-1} en tratamientos que habían obtenido el rendimiento máximo.

En todos los tratamientos, la concentración de N en grano fue inferior a 12,0 g kg^{-1}, el valor crítico de respuesta dado por Ferrer (1999). La concentración de N en grano tiende a incrementar cuando se aumentan los aportes de N; hay una tendencia de la concentración de N en grano a alcanzar una meseta, pero frecuentemente la relación es en forma de C (Cerrato y Blacmer, 1990). Estos últimos investigadores cuestionan, bajo las condiciones de su estudio, la concentración de N en grano como indicador de la suficiencia de N en el maíz. En la campaña 2001 se encontró una buena correlación entre el contenido de Ngr y el Rend Gr (**figura 9**) apreciando como valor crítico 10,0 g kg^{-1}, a partir del cual no habría respuesta en el rendimiento. Los menores contenidos de N en grano fueron obtenidos con el tratamiento sin fertilización nitrogenada, estando relacionados con los menores valores de rendi-

FIGURA 5.

Nitrógeno acumulado en la MS aérea total (Nt, g m^{-2}) en el estado R6 en relación al rendimiento en grano (Rend Gr, Mg ha^{-1})

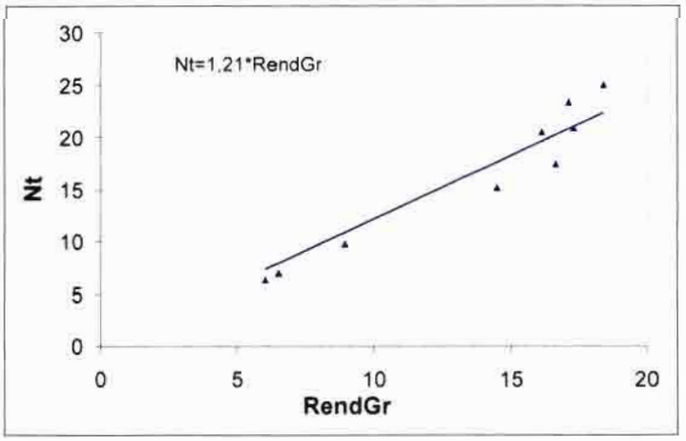
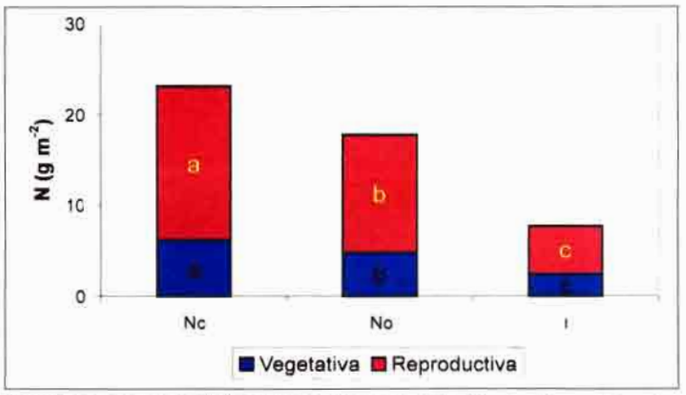


FIGURA 6.

Evolución del N absorbido por la parte aérea vegetativa y reproductiva de las plantas de maíz, en el estado fenológico R6.



Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, $\alpha = 0,05$)

miento en grano. La ecuación cuadrático-meseta proporcionó un buen ajuste de la relación (probabilidad asociada: 0,44%).

Brouder et al. (2000), mediante un ajuste lineal-meseta entre el contenido de Ngr y rendimiento, encontraron que la concentración crítica que separaba entre observaciones con deficiencia y con suficiencia, era de 13,1 g·kg^{-1}. Concluyeron que, como criterio de diagnóstico, este método podía ser adecuado, especialmente cuando las aplicaciones nitrogenadas se adecuaban a las buenas prácticas de gestión, y que presentaba ventajas de manejo frente a otros sistemas alternativos como la concentración de N-NO_3 en la base del tallo, en el estado de capa negra.

Conclusiones

La MST en la madurez fisiológica (R6) de los tratamientos No (130 kg·ha^{-1}) y Nc (300 kg·ha^{-1}) no presentó diferencias significativas entre ellos y fue un 193% superior a la del tratamiento T (0 kg·ha^{-1}), en la campaña 2001.

Con respecto al Rend Gr, el tratamiento Nc obtuvo un rendimiento de 17,6 t·ha^{-1} (140 kg·t^{-1} de humedad) significativamente superior al obtenido por el tratamiento No (15,8 t·ha^{-1}), indicando que dicha dosis estaba por debajo del óptimo técnico. Este último, a su vez, fue significativamente superior al tratamiento T (7,2 t·ha^{-1}). Se puede concluir que la dosis de 130 kg ha^{-1} de N fue inferior a la necesaria para obtener los máximos rendimientos, si bien dosis mucho mayores, como la del tratamiento Nc (300 kg·ha^{-1}), propiciarán un consumo de lujo que no se traducirá en un incremento en el Rend Gr del cultivo y que serán potencialmente contaminantes.

La acumulación de N en la parte aérea de la planta, en el estado R6, fue significativamente mayor para el tratamiento Nc (23,0 g·m^{-2}) que la del tratamiento No (17,7 g·m^{-2}) y ésta, a su vez, significativamente mayor que la del tratamiento T (7,7 g·m^{-2}).

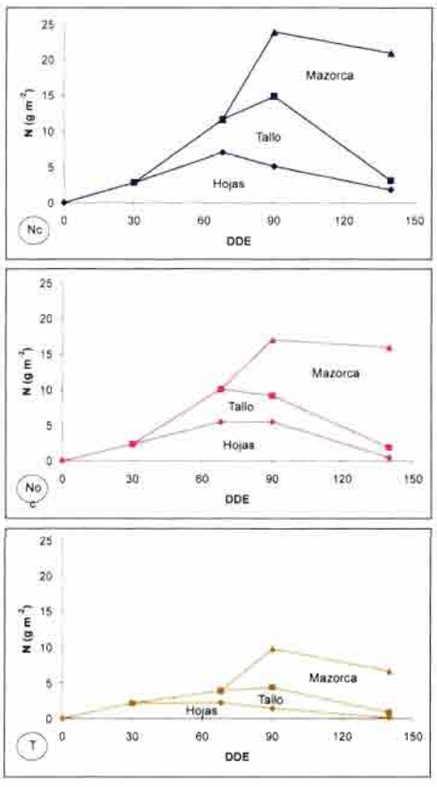
La absorción de N por el grano, en el estado R6, fue significativamente mayor en el tratamiento Nc (16,8 g·m^{-2}) que en el tratamiento No (12,9 g·m^{-2}), y a su vez, mayor que en el tratamiento T (5,2 g·m^{-2}). En todos los tratamientos, la concentración de N en grano fue inferior a 12,0 g·kg^{-1}, considerado como valor crítico de respuesta. Se encontró una relación cuadrático meseta entre el Rend Gr y en Ngr.

De los resultados expuestos se desprende la necesidad de optimizar las dosis de N en el cultivo de maíz. Las investigaciones de la respuesta de un cultivo al N deben terminar en su empleo por parte de los usuarios finales.

Tanto el ITAP como el CREA están incorporando los resultados de estos trabajos a un sistema de soporte a la decisión (SSD) que permita a los técnicos de los servicios de transferencia y a los agricultores manejar las decisiones asociadas a la planificación de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz.

FIGURA 7.

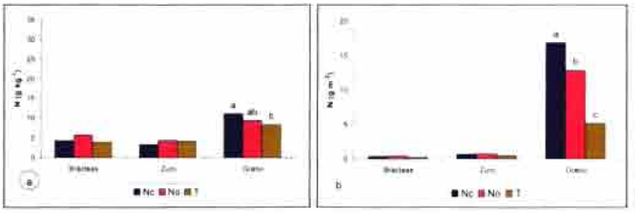
Acumulación del N absorbido por los principales órganos aéreos en función de los días desde emergencia (DDE).



Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo.

FIGURA 8.

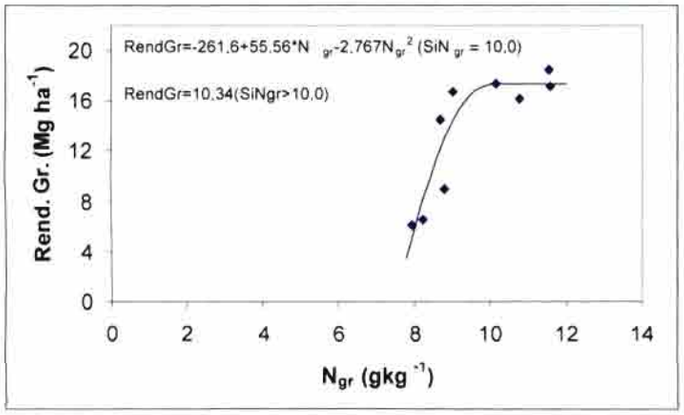
Concentración de N (g kg-1) (a) absorbido (g m-2) (b) por las brácteas, el zuro y el grano de las plantas de maíz, en el estadio R6.



Nc: nitrógeno convencional; No: nitrógeno optimizado; T: testigo. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (Duncan, α = 0,05)

FIGURA 9.

Relación entre el contendido de N en grano (N_{gr}) y el rendimiento en grano (Rend Gr).



Bibliografía

Aguilar Portero, M. 1994. Respuesta Fisiológica del Maíz a distintas poblaciones de plantas en Andalucía. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.

Andrade, F.H.; Cirilo, A.; Uhart, S.A.; Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce. Dekalb Press. CRBAS/FAC.UN Mar de Plata. Argentina.

Brouder, S.M.; Mengel, D.B.; Hofmann, B.S. 2000. Diagnostic Efficiency of the Blacklayer Stalk Nitrate and Grain Nitrogen Tests for Corn. 92: 1236–1247.

Cerrato, M.E.; Blackmer, A.M. 1990. Relationships between Grain Nitrogen Concentrations and the Nitrogen Status of Corn. Agron. J. 82: 138-143.

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. 1974. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO, Serie Riegos y Drenajes, revista nº 24. Roma. Italia.

Ferrer, F. 1999. Diagnóstico del N disponible en el suelo y contribución de técnicas de simulación para la mejora de las recomendaciones de la fertilización nitrogenada en cultivo de maíz en regadío. Ph.D. thesis. Univ. of Lleida, Catalonia, Spain.

Flanery, R.L. 1996. Plant food uptake in a maximum yield corn study. Better Crops Plant Food 70: 4-5.

Francis, D.D.; Schepers, J.S.; Vigil, M.F. 1993. Post-anthesis nitrogen loss from corn. Agron. J. 85: 659-663.

Hagin, J.; Tucker, B. 1982. Fertilization of dryland and irrigated soils. Springer Verlag, New York.

Maturano, M. 2002. Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras Castellano-Manchega y Argentina. Tesis Doctoral. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Universidad de Castilla-La Mancha.

Meisinger, J.J.; Randall, G.W. 1991. Estimating nitrogen budgets for soil–crop systems. In Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability. SSSA, Madison, WI.

Overman, A.R.; Wilson, D.M.; Kamprath, E.J. 1994. Estimation of yield and nitrogen removal by corn. Agron. J. 86, 1012-1016.

Ritchie, S.W.; Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report nº 48.