

Fertilización nitrogenada y azufrada de cebada cervecera cv. Scarlett en la provincia de Buenos Aires

I. Efectos sobre el rendimiento y el contenido proteico de los granos

P. Prystupa^{1*}, G. Ferraris², L. Ventimiglia³, T. Loewy⁴, L. Couretot², R. Bergh⁵ y F.H. Gutiérrez-Boem¹

Introducción

En la última década, la cebada cervecera ha tomado una importancia creciente en las rotaciones agrícolas de la región pampeana argentina. Las variedades utilizadas, entre las que aún hoy predomina el cultivar Scarlett, se caracterizan por su alto rendimiento y su tendencia a presentar bajos contenidos proteicos de los granos (CPG). Para ser utilizada por las malterías, la cebada debe tener un CPG intermedio, ni excesivamente alto ni muy bajo (Savín y Aguinaga, 2011). Por lo tanto, el manejo de la fertilización nitrogenada es fundamental para alcanzar altos rendimientos y adecuada calidad industrial. Las investigaciones realizadas en la provincia de Buenos Aires han permitido establecer que las variedades actualmente cultivadas de cebada pueden tener una alta respuesta a la fertilización nitrogenada evaluada tanto en términos de rendimiento como de CPG (Daverede et al., 2013; Ferraris et al., 2014; Ross et al., 2011; Ross et al., 2013). Sin embargo, no se ha logrado aún predecir o, al menos, explicar esta respuesta.

Una alternativa para aumentar el CPG consiste en complementar las fertilizaciones nitrogenadas realizadas entre siembra y macollaje, con aplicaciones foliares durante espigazón. En Argentina, se ha observado que las aplicaciones durante esta etapa suelen producir aumentos del CPG sin efectos sobre el rendimiento (Daverede et al., 2013; Ross et al., 2011). Esta aplicación se realiza cuando ya ha transcurrido una parte del ciclo del cultivo, razón por la cual se podría diagnosticar la necesidad de fertilización con mayor precisión. El diagnóstico en este estadio fenológico puede realizarse evaluando ciertas características de las plantas. En nuestro país, se ha logrado predecir satisfactoriamente la respuesta a la fertilización nitrogenada durante antesis en trigo, mediante el índice de verdor en hoja utilizando el clorofilómetro (Bergh et al., 2000).

En la región pampeana, las deficiencias de azufre (S) constituyen una de las tres principales limitantes nutricionales para la productividad de los cultivos. Se han observado respuestas a la fertilización azufrada por ejemplo, en trigo (Salvagiotti et al., 2009). En un ensayo realizado en el partido de Bragado empleando cebada cv. Scarlett, Michiels y Degenhart (2004) detectaron una importante respuesta a la fertilización azufrada en el norte de la provincia de Buenos Aires. Sin embargo, Ross et al. (2011) no comprobaron efectos generalizados de la fertilización azufrada en el sur de la provincia.

En esta serie de artículos presentamos los resultados finales de una red de experimentos iniciada en el marco del convenio INTA-Fertilizar. Incluimos información que ya ha sido presentada parcialmente en esta revista (Prystupa et al., 2008) y en diversos congresos. Los objetivos del presente trabajo son: i) evaluar los efectos de la fertilización nitrogenada y azufrada entre siembra y macollaje y de la fertilización nitrogenada en espigazón, sobre el rendimiento, y CPG de los granos, y ii) explicar las variaciones del rendimiento y del CPG ocurridas por efecto de la fertilización nitrogenada y azufrada en las zonas productoras de cebada de la provincia de Buenos Aires, utilizando variables del suelo, de manejo y climáticas simples de medir.

Materiales y métodos

Entre los años 2005 y 2008 se realizaron 25 experimentos distribuidos en el área de cultivo de cebada de la provincia de Buenos Aires (**Tabla 1**). Se empleó la variedad Scarlett y se realizaron las prácticas culturales habituales para cada región. Todos los tratamientos fueron fertilizados con 20 kg de P ha⁻¹ durante la siembra.

El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones, excepto en los sitios de Junín y Baigorrita, donde se realizaron cuatro repeticiones. Los tratamientos evaluados correspondieron a la combinación de distintos niveles de fertilización nitrogenada y azufrada a la siembra, y fertilización nitrogenada en espigazón (**Tabla 2**). Los diferentes niveles de N inicial se establecieron como la suma del N de nitrato presente en el suelo antes de la siembra (0-60 cm de profundidad), y el N aplicado con el fertilizante nitrogenado. Los tratamientos fertilizados con S recibieron 10 kg S ha⁻¹, en una fuente soluble junto con la fertilización nitrogenada inicial. La fertilización nitrogenada se realizó durante macollaje en los ensayos realizados en el sur de la provincia (ensayos 1 a 10), e inmediatamente después de la siembra, en los realizados en el norte de la provincia (ensayos 10 a 25). Para ello, se aplicó urea en todos los experimentos, excepto en los ensayos 5 a 10 donde se empleó UAN. La fertilización nitrogenada foliar en espigazón se realizó aplicando urea en solución con bajo contenido de biuret sobre el canopeo.

Previo a la fertilización foliar en espigazón, se determinó el índice de verdor mediante un clorofilómetro (Minolta SPAD 502). En el cultivo de trigo esta medición se realiza usualmente en la hoja bandera; pero dado que la hoja bandera en cebada es muy pequeña, la medición se

¹ Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (FAUBA)

² EEA INTA Pergamino

³ UEEA INTA 9 de Julio

⁴ EEA INTA Bordenave

⁵ EEA INTA-MAA Chacra Experimental Integrada de Barrow

* Autor de contacto. Correo electrónico: prystupa@agro.uba.ar

Tabla 1. Algunas características de los ensayos realizados.

Nº	Año	Localidad	Partido	Lab.	Años Agricultura	Suelo	Cul. Ant.	Pp. mm
1	2005	San Francisco Belloq	Tres Arroyos	L.C.	> 20	H.t.	G	280
2	2006	San Francisco Belloq	Tres Arroyos	L.C.	> 20	H.t.	S	294
3	2005	Micaela Cascallares	Tres Arroyos	S.D.	> 10	A.t.	T	257
4	2006	Micaela Cascallares	Tres Arroyos	S.D.	> 10	H.t.	T	328
5	2005	Púan	Púan	L.C.	6	Hs.t.	A	211
6	2006	Púan	Púan	L.C.	5	Hs.t.	G	154
7	2005	Coronel Suárez	Coronel Suárez	L.C.	> 10	A.t.	T	211
8	2006	Coronel Suárez	Coronel Suárez	S.D.	12	A.t.	T	297
9	2007	Coronel Suárez	Coronel Suárez	L.C.	10	A.t.	T	273
10	2007	Coronel Suárez	Coronel Suárez	L.C.	10	A.t.	T	273
11	2005	Dennehy	9 de Julio	L.C.	7	H.e.	S	382
12	2006	Anderson	Bragado	S.D.	5	H.e.	S	435
13	2006	Anderson	Bragado	S.D.	5	H.e.	S	435
14	2005	Baigorrita	General Viamonte	L.C.	> 10	H.t.	S	274
15	2006	Baigorrita	General Viamonte	L.C.	> 10	H.t.	S	423
16	2008	Baigorrita	General Viamonte	L.C.	> 10	H.t.	S	339
17	2005	Junín	Junín	S.D.	> 20	H.e.	S	335
18	2006	Junín	Junín	S.D.	> 10	H.e.	S	422
19	2008	Junín	Junín	S.D.	> 20	H.e.	S	350
20	2005	Arribeños	General Arenales	S.D.	> 20	H.t.	S	324
21	2006	Arribeños	General Arenales	S.D.	> 10	H.t.	S	447
22	2007	Arribeños	General Arenales	S.D.	> 10	H.t.	S	215
23	2008	Arribeños	General Arenales	S.D.	> 10	H.t.	S	307
24	2005	La Trinidad	General Arenales	S.D.	> 20	A.t.	S	297
25	2006	La Trinidad	General Arenales	S.D.	> 10	A.t.	S	336

Lab: sistema de labranza; Años Agricultura: años desde la última pastura; Cult. Ant.: cultivo antecesor; S.D.: siembra directa; L.C.: labranza convencional; A.t.: Arjudol típico, H.t.: Hapludol típico, Hs.t. Haplustol típico, H.e.: Hapludol éntico, T: trigo, G: girasol, A: avena, S: soja. Pp: precipitaciones entre los meses de junio y noviembre

realizó en la anteúltima hoja, en 20 plantas por parcela. La cosecha se efectuó en forma manual y se trilló en trilladora estacionaria. Sobre las muestras obtenidas se determinó el CPG del grano. El CPG se determinó mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR), calibrado con mediciones realizadas mediante el método de Kjeldhal. A partir del rendimiento y el contenido de N de los granos (que se calculó dividiendo el CPG por un factor igual a 6.25), se estimó el N en grano por unidad de superficie.

Los resultados se analizaron por análisis de varianza. Cuando el efecto de los tratamientos fue significativo, se realizaron contrastes específicos entre medias previamente planeados utilizando la diferencia mínima significativa según lo detallado en la **Tabla 3**. Para determinar el efecto simple del N inicial (Ni), las interacciones entre este y el S, y la interacción entre

el N inicial y el N en espigazón (Ne), se combinaron contrastes. Las relaciones entre las variables fueron analizadas mediante regresiones simples y múltiples. Las variables independientes en las regresiones múltiples fueron seleccionadas mediante el método de "stepwise". Se consideraron los efectos lineales, cuadráticos y las interacciones entre las variables, y se utilizó la restricción de que ninguna variable independiente posea un "variance inflation factor" mayor a 2.

Resultados

Rendimiento

La amplia distribución geográfica y la variación interanual de las condiciones meteorológicas determinaron una gran variación de los rendimientos obtenidos: desde 1500 hasta casi 7000 kg ha⁻¹. Se observaron respuestas significativas a la fertilización nitrogenada inicial en 10 de

Tabla 2. Tratamientos realizados en los ensayos evaluados.

Tratamiento	N inicial	Cantidad de nutriente aplicada	
	N-NO ₃ en el suelo + N del fertilizante kg N ha ⁻¹	S en siembra	N en espigazón
N0	Testigo	0	0
N1	70 (ó 100)	0	0
N2	100 (ó 130)	0	0
N3	130 (ó 160)	0	0
N1S	70 (ó 100)	10	0
N2S	100 (ó 130)	10	0
N3S	130 (ó 160)	10	0
N1SNe	70 (ó 100)	10	20
N2SNe	100 (ó 130)	10	20
N3SNe	130 (ó 160)	10	20

Nota: El N inicial indicado entre paréntesis indica los niveles de disponibilidad de N empleados en los experimentos 7, 8, 13, 20, 21 y 24. Ne representa N aplicado en espigazón del cultivo.

Tabla 3. Contrastes de interés entre tratamientos empleados en el análisis estadístico.

Contraste Nº	Tratamientos	Efecto
1	N0 vs (N1, N2 y N3)	
2	N1 vs (N2 y N3)	N inicial
3	N2 vs N3	
4	(N1, N2 y N3) vs (N1S, N2S y N3S)	S
5	(N1, N2S y N3S) vs (N1S, N2 y N3)	N inicial * S
6	(N2 y N3S) vs (N3 y N2S)	
7	(N1S, N2S y N3S) vs (N1SNe, N2SNe y N3SNe)	N espigazón
8	(N1S, N2SNe y N3SNe) vs (N1SNe, N2S y N3S)	N inicial * N espigazón
9	(N2S y N3SNe) vs (N1SNe y N3S)	

los 25 ensayos (**Tabla 4**). El rendimiento aumentó entre el 24% y el 45%, lo que representó incrementos superiores a una tonelada en 6 ensayos.

Los ambientes con bajo potencial productivo (evaluado mediante el rendimiento máximo alcanzado), no presentaron respuesta a la fertilización nitrogenada. Las mayores respuestas a la fertilización se observaron siempre en ambientes con alto nivel productivo, aunque también se observaron sitios con baja respuesta en estos ambientes (**Figura 1**).

Los rendimientos no se relacionaron significativamente con la oferta de N, evaluada como la suma del N de nitrato hasta 60 cm de profundidad a la siembra (N suelo) más el N de los fertilizantes (regresión no significativa) (**Figura 2a**). El N del suelo tampoco se asoció con el rendimiento de las parcelas sin fertilizar ni con la respuesta de los cultivos a la fertilización. Cuando se consideraron otras variables ambientales (materia orgánica y pH en el horizonte superficial, precipitaciones mensuales, etc.),

se pudo establecer que el rendimiento se relacionó significativamente en forma positiva con el producto del N disponible por las precipitaciones de septiembre y con las precipitaciones de junio, agosto y octubre (**Tabla 5**). Esto coincide con las simulaciones realizadas por Abeledo et al. (2011) mediante el modelo CERES Barley y con lo que observado Ross et al. (2011) en experimentos realizados en el sur de la provincia de Buenos Aires.

La fertilización azufrada incrementó significativamente los rendimientos en un sólo experimento (Experimento 25) y lo disminuyó en otro (Experimento 24) (**Tabla 4**). La respuesta promedio en todos los ensayos fue de 97 kg ha⁻¹. Esta información sugiere que las deficiencias de este elemento en los cultivos de cebada de la región pampeana no son generalizadas.

Contenido proteico de los granos

En general, los CPG observados en esta red son bajos, de hasta 6.1%. En sólo 7 ensayos se observaron valores superiores a 12.5% que es considerado excesivo de acuerdo

Tabla 4. Respuesta del rendimiento al nitrógeno inicial (Ni), al azufre (S) y al nitrógeno en espigazón (Ne) y análisis de varianza en cada sitio. La respuesta al Ni se calculó como la diferencia entre el tratamiento N0 y el máximo de los tratamientos N1, N2 y N3. La respuesta al S se calculó como la diferencia entre los promedios de los tratamientos (N1, N2 y N3) y (N1S, N2S y N3S). La respuesta a Ne se calculó como la diferencia entre los promedios de los tratamientos (N1S, N2S y N3S) y (N1SNe, N2SNe y N3SNe). En el análisis de varianza, NS indica $p > 0.05$ y el número indica la probabilidad cuando $p < 0.05$.

Sitio	----- Respuesta, kg ha ⁻¹ -----			----- Análisis de varianza, valor p -----				
	Ni	S	Ne	Ni	S	Ni * S	Ne	Ni * Ne
1	493	572	-586	NS	NS	NS	NS	NS
2	124	-14	309	NS	NS	NS	NS	NS
3	1644	-181	-71	0.021	NS	NS	NS	NS
4	680	510	-1064	NS	NS	NS	0.015	NS
5	254	-163	20	NS	NS	NS	NS	NS
6	353	83	-78	NS	NS	NS	NS	NS
7	1805	-7	-279	0.001	NS	NS	NS	NS
8	1278	261	457	0.001	NS	NS	0.032	NS
9	742	71	-93	0.031	NS	NS	NS	NS
10	1164	29	-130	0.001	NS	NS	NS	0.026
11	1526	141	251	0.043	NS	NS	NS	NS
12	794	-35	105	NS	NS	NS	NS	NS
13	785	133	127	NS	NS	NS	NS	NS
14	662	-101	117	NS	NS	NS	NS	NS
15	241	-200	355	NS	NS	NS	NS	NS
16	323	98	-124	NS	NS	NS	NS	NS
17	709	179	-116	0.015	NS	NS	NS	NS
18	881	-56	239	0.002	NS	NS	NS	NS
19	299	112	121	NS	NS	NS	NS	NS
20	82	343	43	NS	NS	NS	NS	NS
21	1307	301	147	0.010	NS	NS	NS	NS
22	254	-231	330	NS	NS	NS	NS	0.042
23	412	125	54	NS	NS	NS	NS	NS
24	952	-323	517	0.001	0.013	NS	0.001	NS
25	960	886	-125	NS	0.010	NS	NS	NS

Tabla 5. Modelos explicativos de rendimiento y proteínas. JUN, JUL, AGO, SEP y OCT son las precipitaciones (mm) durante los meses respectivos y Ndisp es el N en el fertilizante más N como NO₃⁻ de 0 a 60 cm de profundidad en pre-siembra (kg ha⁻¹).

Variable independiente	Modelo	R ²	R ² Ajustado	RSME	p
Rendimiento	$y = -746.480 + 38.0728 \text{ JUN} + 48.5071 \text{ AGO} + 39.8162 \text{ OCT} - 0.10081 \text{ OCT}^2 + 0.10013 \text{ Ndisp} \times \text{SEP}$	0.426	0.394	1 369 105	< 0.01
Proteínas	$= 13.5096 + 0.02173 \text{ Ndisp} - 9.479 \cdot 10^{-5} \text{ JUL}^2 - 0.06181 \text{ AGO} - 0.05294 \text{ OCT} + 1.272 \cdot 10^{-4} \text{ OCT}^2$	0.423	0.391	2.75530	< 0.01

Nota: RSME indica la raíz cuadrada del cuadrado medio del error, por sus siglas en inglés (Root Square Mean Error)

a las condiciones comerciales utilizadas en Argentina. Pero es conveniente destacar que las limitantes genéticas al CPG no son tan bajos: en un experimento se superó el 18% de proteínas en grano. La fertilización nitrogenada

inicial incrementó significativamente el CPG en 18 de los 25 experimentos analizados (**Tabla 6**). La respuesta promedio (calculada como la diferencia entre T0 y el mayor valor de T1, T2 y T3) fue de 2.02% de proteínas.

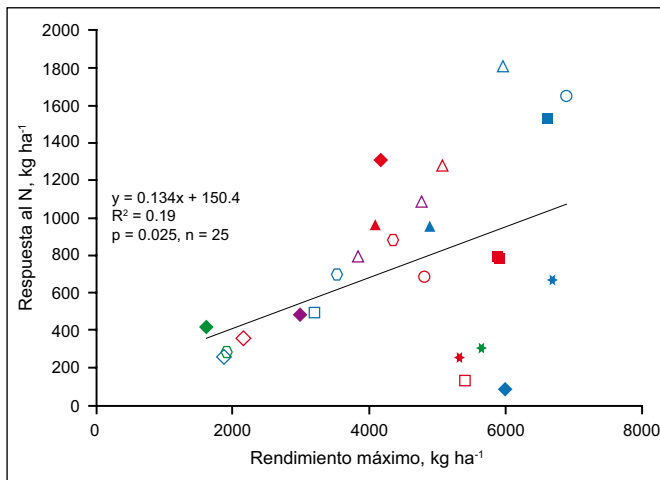


Figura 1. Respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada (rendimiento máximo de los tratamientos fertilizados con N inicial menos rendimiento del testigo) en función del rendimiento máximo alcanzado en cada experimento. Distintas formas de marcadores indican distintas localidades, distintos colores indican distintos años (rojo indica 2005, azul 2006, violeta 2007 y verde 2008). La línea indica la regresión lineal.

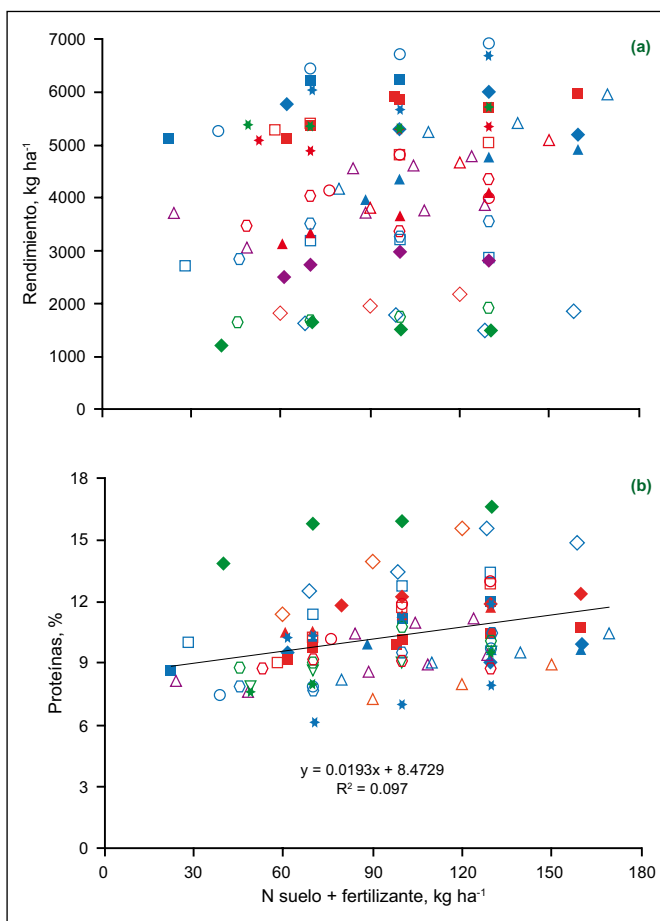


Figura 2. (a) Rendimiento y (b) CPG en función de la disponibilidad de N (N en el fertilizante + N en NO_3^- de 0 a 60 cm de profundidad en pre-siembra) en los tratamientos N0, N1, N2 y N3 (sin fertilización azufrada ni nitrogenada en espigazón). Cada punto indica la media de las 3 ó 4 (de acuerdo al experimento) repeticiones. Los símbolos son iguales que en la Figura 1. En (b) se indica la función ajustada ($p = 0.002$). El número de observaciones es de 96.

En promedio, por cada kilogramo de N aplicado con la menor dosis de fertilizante, el CPG aumentó 0.028%.

El CPG se relacionó muy débilmente a la suma del N disponible en el suelo y el agregado con el fertilizante mediante una función lineal (**Figura 2b**). Considerando otras variables ambientales, en cambio, se pudo establecer que el CPG se relacionó positivamente con el N disponible y negativamente con las precipitaciones de julio, agosto y octubre (**Tabla 5**). Por otra parte, la fertilización azufrada disminuyó significativamente el CPG en tres ensayos (Experimentos 6, 11 y 21) y lo aumentó en uno (Experimento 7). No se observó interacción significativa entre la fertilización azufrada y la nitrogenada inicial en ningún experimento.

La fertilización nitrogenada durante espigazón aumentó significativamente el CPG en diez ensayos (**Tabla 6**). De la misma manera, en los ensayos en que los efectos no fueron significativos la fertilización nitrogenada durante espigazón también tendió a aumentar las proteínas (excepto en los Experimentos 3 y 15). Promediando todos los ensayos, la fertilización durante espigazón incrementó el CPG un 0.776% (en términos absolutos). Por cada kilogramo de N aplicado en este momento el CPG aumentó 0.039% (en términos absolutos), si se promedian todos los niveles de N inicial y 0.040% si sólo se comparan los tratamientos N1S y N1SNe. Por lo tanto, las aplicaciones en espigazón fueron un 33% más efectivas (en términos relativos) en incrementar el CPG que las realizadas en las etapas iniciales, aunque cabe señalar que las aplicaciones iniciales también aumentaron el rendimiento. La interacción entre las fertilizaciones nitrogenada inicial y en espigazón fue significativa sólo en el experimento 10, donde la fertilización en espigazón aumentó el CPG en N1 y N2 pero lo disminuyó en N3.

La respuesta del CPG a la fertilización nitrogenada en espigazón no se asoció en forma significativa con el índice de verdor. Para considerar las posibles variaciones entre sitios, se calculó un índice de verdor relativo dividiendo la observación obtenida en cada tratamiento por la medición obtenida con el máximo nivel de N inicial donde puede suponerse que no hubo limitantes en la disponibilidad de N, o al menos que fueron mínimas. Sin embargo, el índice de verdor relativo tampoco se asoció significativamente con la respuesta en términos de CPG a la fertilización nitrogenada en espigazón. Por lo tanto, las mediciones de índice de verdor no nos resultaron útiles para predecir la respuesta a la fertilización nitrogenada en espigazón en esta especie. En forma similar, Ross et al. (2013) observaron que la relación entre índice de verdor y CPG varía entre años, fechas de siembra o variedades. Es probable que el pequeño tamaño de las hojas terminales de la cebada (comparadas con las hojas del cultivo de trigo), haya incrementado el error de la determinación disminuyendo el valor predictivo de la medición.

El CPG se relacionó negativamente con el rendimiento (**Figura 3**). La relación no fue lineal: cuando el rendimiento aumentó de 2000 a 4000 kg ha^{-1} , el CPG disminuyó el 2.2% mientras que aumentos de los rendimientos por encima de 4000 kg ha^{-1} prácticamente no afectaron el CPG. Los aumentos de rendimientos estuvieron acompañados de

Tabla 6. Respuesta del contenido proteico de los granos al nitrógeno inicial (Ni), al azufre (S) y al nitrógeno en espigazón (Ne) y análisis de varianza en cada sitio. Las respuestas se calcularon de la misma manera que en la Tabla 4.

Sitio	----- Respuesta, % -----			----- Análisis de varianza, valor p -----				
	Ni	S	Ne	Ni	S	Ni * S	Ne	Ni * Ne
1	3.4	-0.7	1.8	0.003	NS	NS	0.001	NS
2	3.8	-0.1	0.6	0.001	NS	NS	NS	NS
3	2.3	-0.2	0.7	0.001	NS	NS	0.001	NS
4	2.8	-1.1	1.4	0.017	NS	NS	0.012	NS
5	3.1	0.5	-0.1	0.001	NS	NS	NS	NS
6	4.2	-1.5	1.3	0.001	0.029	NS	NS	NS
7	2.2	0.5	0.2	0.001	0.024	NS	NS	NS
8	1.6	-0.1	0.8	0.001	NS	NS	0.001	NS
9	1.8	0.4	0.3	0.024	NS	NS	NS	NS
10	3.1	0.1	1.9	0.001	NS	NS	0.001	0.009
11	3.3	-0.9	0.9	0.001	0.011	NS	0.008	NS
12	1.3	-0.1	0.8	0.022	NS	NS	0.002	NS
13	1.6	-0.1	0.7	0.009	NS	NS	0.012	NS
14	1.9	0.5	0.3	0.037	NS	NS	NS	NS
15	0.4	0.6	0.0	NS	NS	NS	NS	NS
16	1.9	0.0	0.7	NS	NS	NS	NS	NS
17	2.6	-0.4	1.2	0.001	NS	NS	0.003	NS
18	1.7	-0.8	1.5	NS	NS	NS	0.001	NS
19	2.0	-0.4	1.5	NS	NS	NS	NS	NS
20	0.4	-0.2	0.5	NS	NS	NS	NS	NS
21	0.5	-0.7	-0.3	NS	0.037	NS	NS	NS
22	1.7	0.0	0.1	0.001	NS	NS	NS	NS
23	2.7	0.4	0.6	0.047	NS	NS	NS	NS
24	-0.3	0.1	0.5	NS	NS	NS	NS	NS
25	1.2	0.0	0.5	NS	NS	NS	NS	NS

incrementos en la cantidad de N en grano por unidad de superficie, incluso cuando el CPG disminuyó. Las variaciones en el CPG y en el rendimiento fueron determinadas por: i) cambios en la disponibilidad de N dentro de cada experimento; y ii) por las distintas condiciones climáticas, edáficas, bióticas y de manejo que tuvieron lugar en los distintos experimentos. Estas variaciones dentro de cada experimento no estuvieron asociadas a las variaciones del rendimiento (**Figura 4a**). En cambio, cuando se comparó entre experimentos, los cambios en el CPG estuvieron asociados negativamente con el rendimiento (**Figura 4b**).

Dentro de cada experimento el CPG tendió a aumentar con el nivel de la fertilización nitrogenada y, comparando entre experimentos, tendió a disminuir cuando aumentaba el rendimiento. Esto sugiere que el CPG es una consecuencia de la relación entre la oferta de N y el rendimiento. Para cuantificar esta relación se elaboró un índice dividiendo la disponibilidad de N por el rendimiento (Nd/R). La disponibilidad de N se calculó

sumando el N presente como nitrato del suelo hasta 60 cm de profundidad más el N aportado por los fertilizantes. Se consideró el fertilizante nitrogenado inicial (Ni), el aplicado en espigazón (Ne), y el fertilizante nitrofosforado como parte de Ni (e.g. en los ensayos en que se aplicó fosfato monoamónico de base). El Nd/R representa los kilogramos de N disponibles (suelo + fertilizante) por tonelada de grano. El CPG se asoció significativamente a este cociente (**Figura 5**). Es interesante destacar que tanto los tratamientos con y sin S como los con y sin fertilización nitrogenada en espigazón, se distribuyeron uniformemente a ambos lados de la curva de regresión, indicando que la fertilización azufrada no alteró marcadamente esta relación.

La función obtenida permite estimar la cantidad de N por tonelada de grano necesaria para alcanzar un determinado CPG. Para alcanzar un CPG entre el 10% y el 12% se debe disponer entre 23.0 y 42.9 kg N t⁻¹ grano. En la **Tabla 7** se indican los niveles de N disponible necesarios para alcanzar diversos valores de proteína.

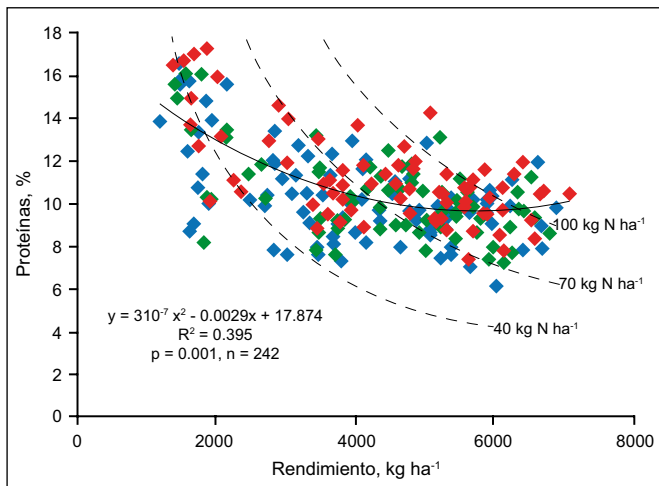


Figura 3. Relación entre el contenido proteico de los granos y el rendimiento. La línea llena indica la regresión ajustada, las líneas punteadas unen puntos de igual cantidad de N en grano por hectárea. Se indica la ecuación de la regresión ajustada. Las referencias son iguales a la Figura 1. Cada punto indica la media de las 3 ó 4 (de acuerdo al experimento) repeticiones.

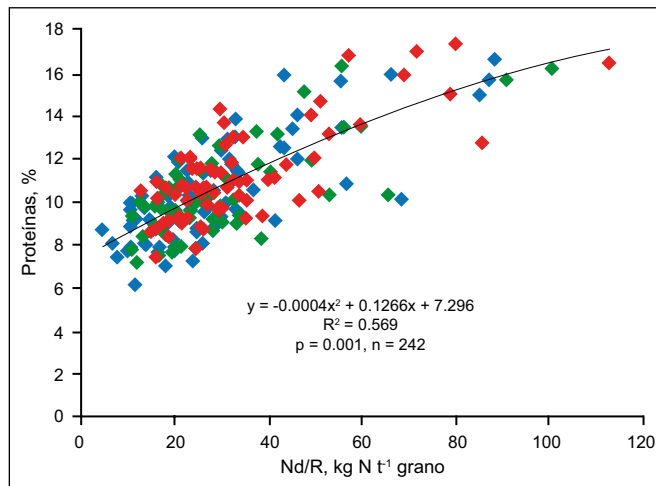


Figura 5. Relación entre el contenido proteico de los granos y el cociente entre la disponibilidad inicial de N en el suelo más el aportado por el fertilizante y el rendimiento obtenido (Nd/R). Se indica la ecuación ajustada. Las referencias son iguales a la Figura 1. Cada punto indica la media de las 3 ó 4 (de acuerdo al experimento) repeticiones.

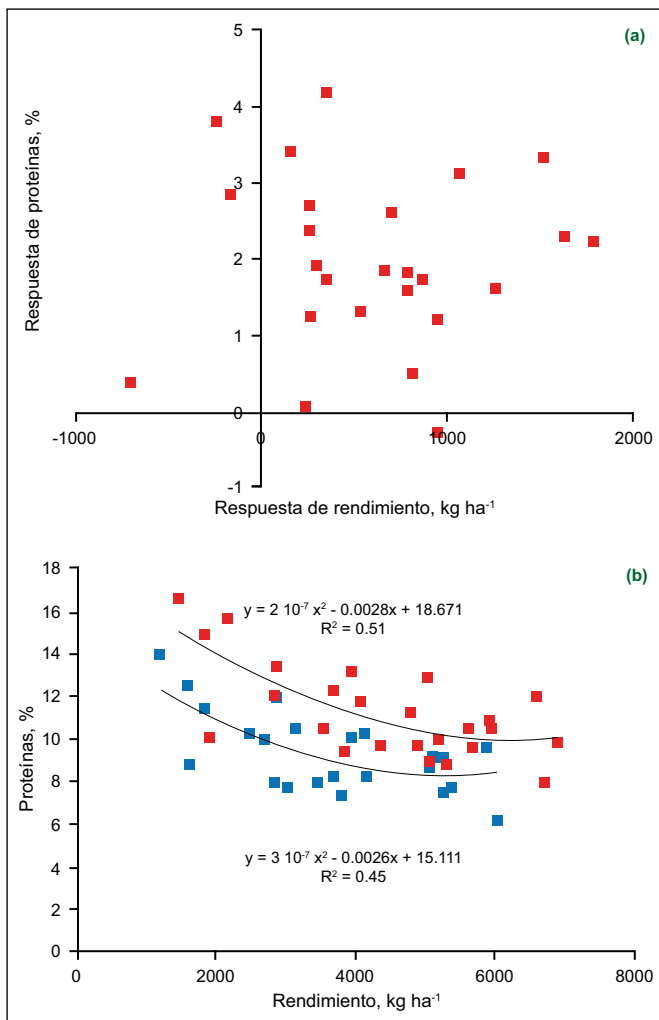


Figura 4. (a) Relación entre la respuesta del contenido proteico de los granos (CPG) calculada como la diferencia entre el CPG del tratamiento N0 y el mayor valor de N1, N2 y N3 en cada experimento y la respuesta del rendimiento calculada de la misma manera y (b) relación entre el CPG y el rendimiento en el tratamiento N0 (cuadrados celestes) y en el N4 (cuadrados rojos). Se indica la ecuación ajustada para tratamiento.

Tabla 7. Requerimiento de N disponible (Nd/R) por tonelada de grano para alcanzar un determinado contenido proteico, calculado como la suma del N como nitrato en el suelo hasta 60 cm de profundidad más el N en el fertilizante.

Contenido proteico, %	Nd/R, kg N t ⁻¹ grano
10.0	23.0
10.5	27.7
11.0	32.5
11.5	37.6
12.0	42.9

Conclusiones

- La fertilización nitrogenada en las primeras etapas del cultivo resulta una herramienta muy útil para incrementar el rendimiento y el CPG. Por el contrario, lo observado en esta red sugiere que las deficiencias de S no son de ninguna manera generalizadas en los cultivos de cebada de la región pampeana.
- La respuesta del rendimiento a la fertilización nitrogenada está condicionada por la disponibilidad hídrica: el modelo explicativo del rendimiento incluye el producto del N disponible y las precipitaciones de septiembre.
- La disponibilidad hídrica tuvo también una gran importancia en la regulación del CPG. El modelo obtenidos incluye a las precipitaciones entre julio y octubre, mes en el que tuvo lugar el periodo crítico de determinación del número de granos. Pero es interesante destacar que las precipitaciones no aparecen multiplicando la disponibilidad de N, indicando que los efectos de la fertilización N sobre esta característica ocurren tanto en años húmedos como en años secos.
- Las fertilizaciones nitrogenadas en espigazón fueron más eficaces en aumentar el CPG que las realizadas

Anexo: Utilización del modelo para calcular la dosis de fertilizante nitrogenado (Tomado de Prystupa et al., 2008)

Antes de realizar la fertilización es posible estimar qué rendimiento se espera obtener en un lote. Esto usualmente se realiza promediando los rendimientos obtenidos en el lote en los últimos años, o a través de una evaluación basada en la experiencia del técnico que recomienda la fertilización.

El modelo presentado en la **Figura 5** incluye como variable dependiente al rendimiento. Si se reemplaza en las ecuaciones el rendimiento observado por un rendimiento estimado previo a la fertilización, el modelo se transforman en predictivo: permite estimar los requerimientos de N para alcanzar un CPG determinado. Es importante aclarar que las predicciones tienen un nivel de confiabilidad inferior a la que sugiere el R^2 del modelo porque la estimación del rendimiento está sujeta a un error que puede ser muy importante.

Para calcular los requerimientos de fertilizante nitrogenado utilizando el modelo que emplea la relación Nd/R se debe:

- Estimar, antes de fertilizar, un rendimiento esperado en el lote.
- Establecer que CPG quiero obtener. A partir de ello se calcula el índice Nd/R empleando la **Tabla 7** o la **Figura 5**.
- Determinar el nitrato en el suelo hasta 60 cm de profundidad a la siembra.

Considerando que:

$$\text{Nd/R (kg N t}^{-1} \text{ grano)} = \text{Nd (kg N ha}^{-1}) / \text{Rendimiento (t grano ha}^{-1}) \text{ - Ecuación A.}$$

$$\text{Nd (kg N ha}^{-1}) = \text{Nd/R (kg N t}^{-1} \text{ grano)} * \text{Rendimiento (t grano ha}^{-1}) \text{ - Ecuación B.}$$

Donde: Nd = N como nitrato hasta 60 cm en siembra más N en el fertilizante, y R = rendimiento esperado.

La ecuación B permite calcular el N en el suelo más el fertilizante que debemos alcanzar para obtener un determinado CPG. Si le descontamos el N presente en el suelo a la siembra y el que aporta el fertilizante nitro-fosforado podemos calcular la dosis de fertilizante nitrogenado.

en las primeras etapas del cultivo. La fertilizaciones iniciales aumentaron los rendimientos en la mayoría de los ensayos, mientras que las realizadas en espigazón no los afectaron.

- La eficiencia con que se utilizó el fertilizante nitrogenado dependió principalmente de la dosis de aplicación y, una vez superada una cierta disponibilidad inicial, no varió marcadamente entre las primeras etapas del cultivo y espigazón. Esto sugiere que, si se aplica una dosis moderada de fertilizante nitrogenado a principio del cultivo, la postergación del resto de la dosis hasta espigazón es una opción tecnológicamente viable, ya que no habría reducciones importantes en la eficiencia del uso del nutriente.
- Las mediciones con el clorofilómetro SPAD no resultaron útiles para predecir la respuesta del CPG a la fertilización en espigazón.
- Los ambientes (es decir la combinación de año y localidad) en los que los rendimientos son altos, tienden a producir bajos CPG.
- Independientemente del momento en que se fertiliza, es posible estimar los requerimientos de N para obtener un determinado CPG si se estima un rendimiento esperado.

Agradecimientos

A Fertilizar Asociación Civil por el apoyo económico recibido durante los dos primeros años de ensayos y a Maltería Pampa S.A., en particular al Ing. Agr. Daniel Desmery del Laboratorio de la Planta Tres Arroyos, por los análisis de calidad de las muestras de cebada.

Bibliografía

Abeledo, L.G., D.F. Calderini, y G.A. Slafer. 2011. Modelling yield response of a traditional and a modern barley cultivar to different water and nitrogen levels in two contrasting soil types. *Crop Pasture Sci.* 62:289-298.

Bergh, R., A. Baez, A. Quattrocchio, y M. Zamora. 2000. Fertilización nitrogenada para calidad en trigo candeal. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 7:13-16.

Daverede, I., F. Miguez, R. Frigerio y J. Scanlan. 2013. Respuesta de la cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) a la fertilización y aplicación de fungicida. IV Congreso Latinoamericano de Cebada. Bahía Blanca. Actas en CD.

Ferraris, G.N., F. Mousegne, M. Barraco, J. Cavo, L. Couretot, R. Falconi, E. Lemos, M. López de Sabando, G. Magnone, A. Martín, P. Melilli, O. Ferraris, A. Paganini, G. Pérez, R. Pontoni, J. Zanettini, C. Scianca, R. Solá, M.G. Tellería, y L. Ventimiglia. 2014. Rendimiento y respuesta comparada a fósforo y nitrógeno en trigo y cebada cervecera (2009, 2010, 2011, 2012 y 2013). XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Actas en Pen Drive.

Michiels, C., y S. Degenhart. 2004. Ensayo de fertilización de cebada cervecera, var. Scarlett. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 22:18-20.

Prystupa, P., R. Bergh, G. Ferraris, T. Loewy, L. Ventimiglia, F.H. Gutierrez Boem, y L. Couretot. 2008. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervecera cv. Scarlett. *Informaciones Agronómicas* 38:5-11.

Ross, F., J. Massigoge, y M. Zamora. 2011. Fertilización de cebada cervecera en ambientes con tosca en el sur de Buenos Aires, Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 3:9-13.

Ross, F., M.L. Seghezze, y L. Wehrhahne. 2013. Manejo de la calidad comercial del cultivo de cebada cervecera en suelos someros. IV Congreso Latinoamericano de Cebada. Bahía Blanca. Actas en CD.

Salvagiotti, F., J.M. Castellarán, D.J. Miralles, y H.M. Pedrol. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research* 113:170-177.

Savín, R., y A. Aguinaga. 2011. Los requerimientos de la industria: calidad comercial e industrial y sus determinantes. En: Cebada cervecera. D.J. Miralles, R.L. Benech Arnold y L.G. Abeledo (Eds.). Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires. pp. 207-238.