

C3P41. N Y S EN CEBADA CERVECERA: EFICIENCIAS DE UTILIZACIÓN Y SUS COMPONENTES

Gómez, Federico M.^{1,2}; Boero, José J.^{1,2}; Prystupa, P.^{1,2}; Ferraris, Gustavo³ y Gutiérrez Boem, Flavio H.^{1,2}

¹ Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453. CABA. Argentina. ² INBA – CONICET. ³ EEA Pergamino, INTA. fgomez@agro.uba.ar

RESUMEN

La eficiencia de utilización de un nutriente es la relación entre el rendimiento logrado y la cantidad del nutriente absorbido. El requerimiento de un nutriente (i.e. cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento) es la inversa de la eficiencia de utilización y puede ser entendido como el producto entre la concentración del nutriente en el grano y la inversa del índice de cosecha del nutriente. El objetivo de este trabajo fue determinar la relación entre la concentración de N y S en el grano, el ICN, ICS y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. Se realizaron 31 experimentos durante 2 años en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires sobre lotes en producción. Los tratamientos fueron: 1 – Control (sin agregado de fertilizante adicional al realizado por el productor), 2 – Sin limitaciones de N (aplicación de 150 kg N ha⁻¹), 3 – Sin limitaciones de S (aplicación de 15 kg S ha⁻¹). Tanto la fertilización N como S produjeron un incremento en la cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento, respectivamente. A diferencia de la concentración de N en grano (proteína), que presentó una relación positiva con la abundancia de este nutriente en el cultivo, la concentración de S en grano presentó un plateau ante pequeños aumentos en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento. Esto se debió principalmente a una fuerte caída en el ICS frente al aumento en la cantidad de S absorbida por unidad de rendimiento. El ICN, por el contrario, disminuyó menos al aumentar la cantidad de N absorbida. Por tanto, la relación N:S en grano presentó una mayor asociación con la abundancia de N en el cultivo que con la de S.

Palabras claves: Cebada, Nitrógeno, Azufre

INTRODUCCIÓN

En Argentina, el destino tradicional del cultivo de cebada es la industria maltero-cervecera. La industria maltera y cervecera es altamente exigente en términos de contenido proteico: se requieren valores de entre 10 y 12%. En experimentos llevados a cabo en la región pampeana se ha observado que el contenido proteico de los granos se asoció positivamente con la disponibilidad de N y negativamente con el rendimiento (Prystupa et al., 2016). Para alcanzar un contenido proteico entre el 10 y el 12% se debe contar en el suelo con 22 y 40 kg ha⁻¹ de N disponible por tonelada de rendimiento en grano (Prystupa et al., 2008). Hay poca información para cebada y cultivos afines (i.e. trigo) respecto de la relación entre disponibilidad o absorción de S por el cultivo y la concentración de S en el grano.

La pendiente de la relación entre rendimiento y nutriente absorbido se conoce como eficiencia de utilización (EU = R/NUabs, R: rendimiento, NUabs: nutriente absorbido). La EU puede ser afectada por el nivel de rendimiento alcanzado. Esta se asume lineal y constante cuando el rendimiento no está cerca del potencial del sitio y cae por encima del 70-80% del rendimiento máximo (Dobermann y Cassman, 2002). La EU también puede caer con alta disponibilidad del nutriente en el suelo, que lleva a un aumento en la absorción sin un aumento proporcional en el rendimiento (i.e. consumo de lujo), o por estreses ambientales (van Keulen y van Heermst, 1982). La inversa de la EU es el requerimiento (NUabs R⁻¹). Este cociente se puede descomponer en dos componentes con sentido agronómico: la concentración del nutriente en el grano (NUgrano R⁻¹), y la inversa del índice de cosecha (IC) del nutriente (NUabs NUgrano⁻¹):

$$\left(\frac{NUabs}{R}\right) = \left(\frac{NUgrano}{R}\right) * \left(\frac{NUabs}{NUgrano}\right)$$

Esta relación implica que un aumento de la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento llevaría a tener una mayor concentración del nutriente en el grano, siempre y cuando el IC del nutriente se mantuviera constante.

En un experimento de fertilización de cebada con N y S se observó que, a diferencia del N, la concentración de S en el grano fue poco sensible a cambios en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento, debido a grandes cambios en el ICS (Gutiérrez Boem et al., 2014). Esto pudo deberse a la distinta abundancia relativa de los dos nutrientes en ese experimento (i.e. el rendimiento del cultivo respondió a la aplicación de N y no a la de S), o a que la relación entre la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento y la concentración del nutriente en el grano es distinta para



N y S. Si la concentración de S en el grano fuera poco sensible a cambios en la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento, sería muy difícil intentar cambiar la concentración de S (y la relación N:S) del grano vía fertilización azufrada. El objetivo de este trabajo fue determinar la relación entre la concentración de N y S en el grano, el ICN, ICS y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron 31 experimentos durante 2 años en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires sobre lotes en producción. Los tratamientos fueron: 1 – Control (sin agregado de fertilizante adicional al realizado por el productor), 2 – Sin limitaciones de N (aplicación de una dosis de 150 kg N ha⁻¹ a la siembra), 3 – Sin limitaciones de S (aplicación de una dosis de 15 kg S ha⁻¹ a la siembra). Los tratamientos se dispusieron en bloques completos aleatorios. La fuente de N utilizada fue urea y la de S fue yeso. En madurez del cultivo se cosecharon 4 metros lineales (~ 0.84 m²) del cultivo por parcela, se secaron a 70°C y se trillaron. Se determinó biomasa aérea, rendimiento en grano, y el número y peso individual de los granos. La concentración de N y S en los granos y rastrojo se determinó mediante una digestión húmeda y una posterior colorimetría (N) o turbidimetría (S). El rendimiento se expresó con 13% de humedad, mientras que la concentración de nutrientes se expresó en base seca.

Los resultados se analizaron mediante análisis de varianza con modelos mixtos. El efecto de N y S se evaluó con contrastes en un modelo mixto donde se consideró los tratamientos como factores fijos, mientras que los sitios y los bloques anidados dentro de los sitios como efectos aleatorios (R Core Team, 2017, Bates et al., 2015). La relación entre el rendimiento y la cantidad de nutriente absorbida fue ajustada a través de un modelo esférico condicional y un modelo lineal, en el caso de N y S, respectivamente. La función esférica condicional puede describirse a través de:

$$y = \begin{cases} b * \left(\left(\frac{3}{2} \right) * \left(\frac{x}{c} \right) - \left(\frac{1}{2} \right) * \left(\frac{x}{c} \right)^3 \right), & \text{si } x \leq c \\ b, & \text{si } x > c \end{cases}$$

donde y es el rendimiento (kg ha⁻¹), x es la cantidad de nutriente absorbido (kg nutriente ha⁻¹), b es el rendimiento potencial (Mg ha⁻¹) y c es la mínima cantidad de nutriente absorbido (kg nutriente ha⁻¹) en la cual se alcanza el rendimiento potencial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos variaron entre 1735 y 9111 kg ha⁻¹, lo que reflejó a variabilidad de los ambientes explorados (Tabla 1). El agregado de N (N150) provocó un aumento del rendimiento del 17 % respecto del control (promedio de todos los sitios), aunque este efecto fue variable entre sitios (interacción sitio x tratamiento significativa). Se observó una respuesta al agregado de N en 13 de los 31 sitios, con una respuesta media de 1669 kg ha⁻¹ en esos sitios. El agregado de S no tuvo un efecto generalizado en toda la red (i.e. se observó efecto del agregado de S en un sólo sitio). Respecto a las concentraciones de N y S en grano, el rango explorado fue algo mayor para N que para S, entendido como la relación entre la concentración máxima y mínima observada (1.75 y 2.34 para S y N, respectivamente). La concentración de N en grano aumentó un 25% frente al agregado de este nutriente, mientras que la concentración de S en grano aumentó por el agregado de S un 9%, y tuvo una tendencia a aumentar con el agregado de N (Tabla 1). Los rangos observados de nutriente absorbido por el cultivo fueron similares para N y S (Max/Min: 7.9 y 7.0 para N y S, respectivamente). La fertilización nitrogenada produjo la reducción del ICN y el incremento del ICS. El requerimiento de ambos nutrientes (nutriente absorbido por tonelada de rendimiento) aumentó frente al agregado de los respectivos nutrientes (i.e. 42% y 12%, respectivamente).



Tabla 1. Medidas de resumen de variables medidas y ANOVA.

Variable	Estadístico	Control	N150	S15	ANOVA y contrastes *	
Rendimiento (kg ha ⁻¹ , 13% humedad)	Mínimo	1779	2554	1735	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	3676	4332	3885	Sitio	$p < 0,01$
	Media	4892	5735	4889	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	5991	7095	5951	N150 vs Control	$p < 0,01$ (+ 829)
	Máximo	8359	8556	9111	S15 vs Control	$p = 0,68$
N en grano (mg N g ⁻¹)	Mínimo	10,6	11,4	10,0	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	12,0	15,1	11,9	Sitio	$p < 0,01$
	Media	13,3	16,7	13,4	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	14,2	18,6	14,4	N150 vs Control	$p < 0,01$ (+ 3,4)
	Máximo	17,1	23,4	17,9	S15 vs Control	$p = 0,71$
S en grano (mg S g ⁻¹)	Mínimo	0,8	0,8	1,0	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	1,0	1,1	1,1	Sitio	$p < 0,01$
	Media	1,1	1,1	1,2	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	1,2	1,2	1,2	N150 vs Control	$p = 0,08$
	Máximo	1,3	1,4	1,4	S15 vs Control	$p = 0,01$ (+ 0,05)
N absorbido (kg ha ⁻¹)	Mínimo	21,4	66,3	22,4	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	55,1	108,0	51,9	Sitio	$p < 0,01$
	Media	74,6	118,8	74,2	Trat x Sitio	$p = 0,14$
	3er cuartil	94,7	136,3	94,7	N150 vs Control	$p < 0,01$ (+ 44)
	Máximo	134,1	169,5	145,4	S15 vs Control	$p = 0,95$
S absorbido (kg ha ⁻¹)	Mínimo	2,2	3,7	3,0	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	6,3	7,1	7,1	Sitio	$p < 0,01$
	Media	7,7	9,2	8,7	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	8,9	11,6	10,2	N150 vs Control	$p < 0,01$ (+ 1,5)
	Máximo	12,8	14,6	15,5	S15 vs Control	$p < 0,01$ (+ 1,1)
IC de biomasa	Mínimo	0,42	0,37	0,41	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	0,46	0,42	0,45	Sitio	$p < 0,01$
	Media	0,48	0,45	0,47	Trat x Sitio	$p = 0,03$
	3er cuartil	0,50	0,48	0,49	N150 vs Control	$p < 0,01$ (- 0,03)
	Máximo	0,54	0,53	0,56	S15 vs Control	$p = 0,12$
ICN	Mínimo	0,64	0,59	0,65	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	0,74	0,66	0,74	Sitio	$p < 0,01$
	Media	0,76	0,71	0,77	Trat x Sitio	$p = 0,05$
	3er cuartil	0,79	0,77	0,80	N150 vs Control	$p < 0,01$ (- 0,05)
	Máximo	0,84	0,82	0,84	S15 vs Control	$p = 0,46$
ICS	Mínimo	0,49	0,52	0,42	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	0,54	0,57	0,51	Sitio	$p < 0,01$
	Media	0,61	0,63	0,56	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	0,67	0,70	0,62	N150 vs Control	$p = 0,01$ (+ 0,02)
	Máximo	0,75	0,74	0,67	S15 vs Control	$p < 0,01$ (- 0,05)
N absorbido R ⁻¹ (kg N Mg ⁻¹)	Mínimo	11,8	12,3	11,1	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	12,9	17,0	13,2	Sitio	$p < 0,01$
	Media	15,2	21,6	15,4	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	16,6	24,2	16,6	N150 vs Control	$p < 0,01$ (+ 6,2)
	Máximo	23,2	35,5	23,7	S15 vs Control	$p = 0,74$
S absorbido R ⁻¹ (kg S Mg ⁻¹)	Mínimo	1,0	1,1	1,4	Tratamiento	$p < 0,01$
	1er cuartil	1,5	1,4	1,7	Sitio	$p < 0,01$
	Media	1,6	1,6	1,8	Trat x Sitio	$p < 0,01$
	3er cuartil	1,7	1,9	2,1	N150 vs Control	$p = 0,79$
	Máximo	2,2	2,0	2,4	S15 vs Control	$p < 0,01$ (+ 0,25)



* Si el contraste es significativo ($p < 0.05$), se informa la magnitud del efecto entre paréntesis.

Las funciones de borde superior $-l(q90)$ y $c(q90)$ - corresponden a las situaciones de máximos rendimientos para la distintas cantidades de n y s absorbido por el cultivo (figura 1a y 1b). Estas funciones se pueden interpretar como las situaciones de máxima dilución de un nutriente determinado y a condiciones de deficiencia del nutriente en cuestión, donde se maximiza la eficiencia de utilización de un nutriente en la fase lineal. Las funciones de borde inferior $-l(q05)$ y $c(q05)$ - corresponden a las situaciones de mínimos rendimientos para las distintas cantidades de nutriente absorbido y se puede interpretar como de mínima eficiencia de utilización (figura 1), asociadas a condiciones donde el rendimiento del cultivo estuvo limitado por otro factor además del nutriente que se está evaluando, o bien, a situaciones de “consumo de lujo” del nutriente en cuestión (Setiyono et al., 2010). La EU de N máxima estimada fue de 78.5 kg grano kg N absorbido-1 hasta que se alcanza el plateau. El requerimiento de N mínimo estimado fue de 12.7 kg n mg-1 (figura 1.a). La EU de N mínima estimada fue de 30.9 kg grano kg n absorbido-1, lo cual se correspondió con un requerimiento de N máximo estimado de 32.3 kg N mg⁻¹. Cuando se ajustó una función a cada tratamiento, se observó que no hubo diferencias entre los tratamientos control y s15 (línea roja en la fig 1a). El tratamiento n150 mostró una relación con pendientes más bajas que la del control, lo que refleja una disminución en la EU del N (línea verde en la fig. 1.a). A diferencia de N, en el caso de S la relación entre el rendimiento y la cantidad de S absorbido por el cultivo presentó una forma lineal (i.e. no se observó un plateau bien definido) (figura 1b). Las EU de S máxima y mínima fueron de 733 y 450 kg kg S absorbido-1, respectivamente. Los requerimientos mínimo y máximo fueron de 1.36 y 2.22 kg S mg-1, respectivamente. No se observó efecto del agregado de N ni de S sobre esta relación. La EU de S media fue de 608 kg kg S absorbido-1 y los requerimientos medios fueron de 1.64 kg S absorbido mg-1 (figura 1b). El rendimiento potencial estimado cuando el cultivo absorbe por encima de 147,6 kg de N ha-1 fue de 8579 kg ha-1.

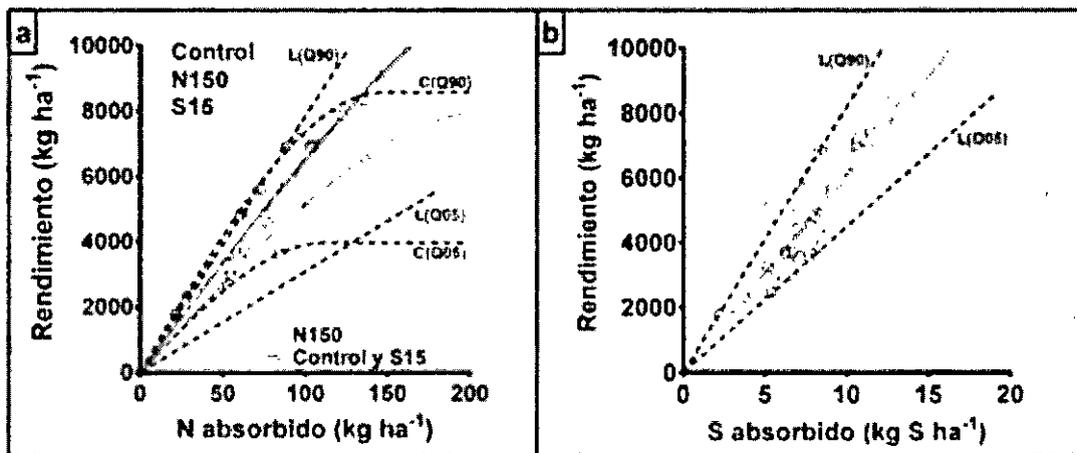


Figura 6. Relación entre el rendimiento y la cantidad de nutriente absorbido. L(Q90) y L(Q05) corresponden a las líneas de borde del cuantil 90 y 5%, respectivamente. C(Q90) y C(Q05) corresponden a las curvas del cuantil 90 y 5%, respectivamente. a) N. La curva roja corresponde a la función esférica ajustada para los tratamientos control y S15 conjuntamente. La curva verde corresponde a la función esférica ajustada al tratamiento N150. b) S. La recta naranja corresponde a la función lineal ajustada a todos los tratamientos en conjunto.

Se observó una relación curvilínea entre la concentración de N en grano y la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento (Figura 2a). A diferencia de lo observado por Prystupa et al. (2016), la relación entre estas variables fue más estrecha, esto último asociado a que, al determinar la cantidad de N absorbido, no se tienen en cuenta las pérdidas del fertilizante aplicado. Para obtener granos con contenido proteico de 11% (17.6 mg N g⁻¹) es necesario que el cultivo absorba 22 kg N Mg rendimiento⁻¹ (Figura 2a). La relación entre la concentración de S en grano y la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento presentó mucha mayor variabilidad que la de N (Figura 2). Por otro lado, el incremento de la concentración de S en el grano (Figura 2b), debido a que se alcanzó un plateau en la concentración de S en el grano para valores altos de S absorbido por unidad de rendimiento.

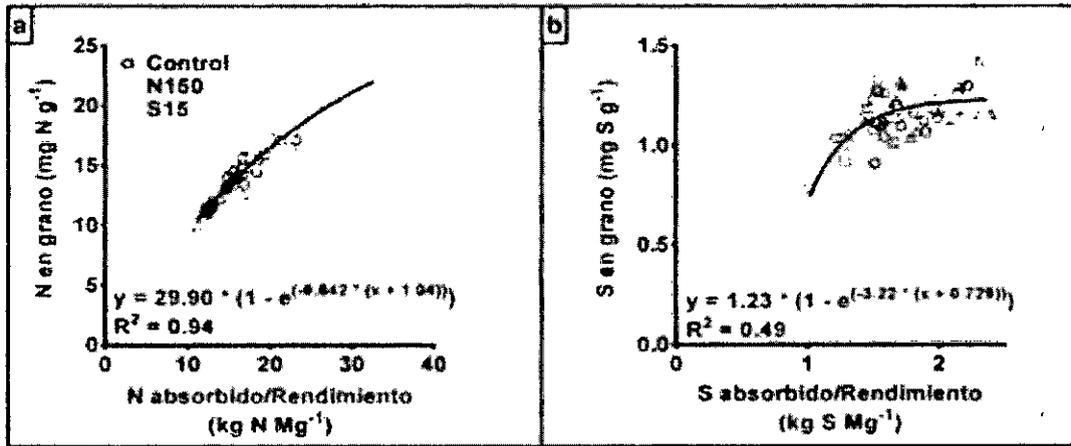


Figura 2. Relación entre la concentración de nutriente en grano y el requerimiento de nutriente del cultivo. a) N. b) S.

Si bien la relación entre el IC de ambos nutrientes y la abundancia de estos en el cultivo fue negativa, la tasa de disminución fue muy contrastante (Figura 3.a y 3.b). En términos relativos, un incremento del 100% en la cantidad de nutriente absorbido por tonelada de rendimiento produjo la disminución del 13 y 27% en el ICN e ICS, respectivamente.

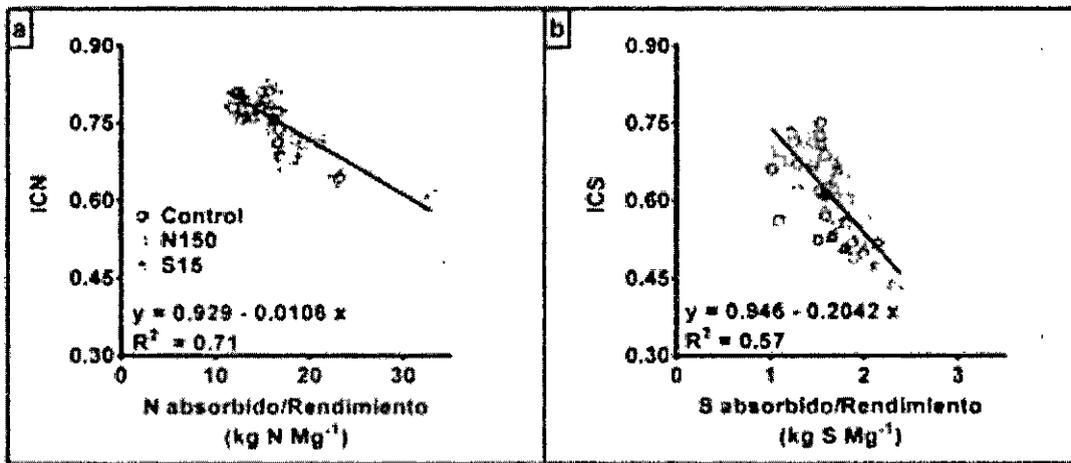


Figura 3. Relación entre el índice de cosecha de nutriente y el requerimiento de nutriente del cultivo. a) Nitrógeno. b) Azufre.

La asociación entre la relación N:S en grano y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento fue lineal y positiva en el caso de N, mientras que se presentó de manera inversa y curvilínea hasta alcanzar un plateau en el caso de S (Figura 4).

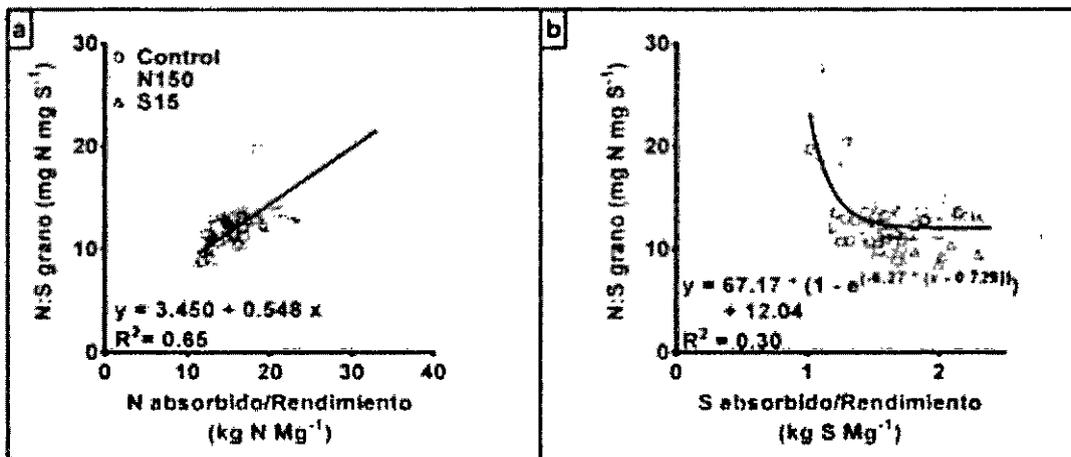


Figura 4. Relación entre el ratio de concentraciones N:S en grano y el requerimiento de nutriente del cultivo. a) Nitrógeno. b) Azufre.



CONCLUSIONES

Tanto la fertilización N como S produjeron un incremento en la abundancia de los respectivos nutrientes en el cultivo (i.e. N y S absorbido por unidad de rendimiento). El aumento en el N absorbido por unidad de rendimiento se asoció de manera positiva con la concentración de N en grano, mientras que en el caso de S, pequeñas variaciones en la abundancia de este nutriente conllevaron a alcanzar un plateau en la concentración de S en grano. Por lo tanto, la concentración de S en grano fue menos sensible que la de N a cambios en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. Esto se debió en gran medida a una gran disminución del ICS frente al aumento de la abundancia de S en el cultivo, a diferencia de lo observado en el caso de N. Por tanto, la relación N:S en grano resultó estar asociada en mayor medida a la abundancia de N en el cultivo, que a la de S. Frente a pequeñas aumentos en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento, la relación N:S rápidamente alcanzó un plateau.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración de los productores y asesores: Alejandro Alegre, Carlos Gutiérrez, Emilio Secreto, Gustavo Franco, Jorge Álvarez, Nicolás Casella, Sebastián Arias, Ricardo Falconi, Gustavo Herrá. Esta investigación fue financiada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT-2013-1846) y la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020130100746BA).

BIBLIOGRAFÍA

- Abeledo LG; DF Calderini & GA Slafer. 2008. Nitrogen economy in old and modern malting barleys. *Field Crops Res.* 106: 171-178.
- Bates, D; M Maechler; B Bolker & S Walker. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *J Stat Softw.* 67: 1-48.
- Cossani CM; GA Slafer & R Savin. 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Res.* 112: 205-213.
- Dobermann A & KG Cassman. 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant Soil.* 247: 153-175.
- Gutiérrez Boem FH; F Gomez; C Caputo & P Prystupa. 2014. Fertilización de cebada: I. eficiencia de utilización y concentración de N-P-S en grano. XXIV CACS, Bahía Blanca, mayo.
- Ministerio de Agroindustria. 2017. Coordinación de Servicios de Información, Estimaciones Agrícolas.
- Prystupa P; R Bergh; G Ferraris; T Loewy; L Ventimiglia; FH Gutierrez Boem & L Couretot. 2008. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervecera cv. Scarlett. *IA del Cono Sur* 38: 5-11.
- Prystupa, P; G Ferraris; L Ventimiglia; T Loewy; L Couretot; R Bergh & FH Gutiérrez Boem. 2016. 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. *IA de Hispanoamérica* 21: 7-14.
- R Core Team. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Setiyono T; D Walters; K Cassman; C Witt & A Dobermann, A. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Res.* 118: 158-168.
- van Keulen, H & HDJ van Heermst. 1982. Crop response to the supply of macronutrients. *Agric. Res. Rep.* 916, C. Agric. Publ. Doc., Wageningen, 45 p.