

Validación a campo de los modelos de nutrición nitrogenada para trigo y cebada

Divito, G.A.¹; Sainz Rozas H.R.²; Torres, A.¹; Berg, G.³; Piloni, L.⁴; Kitroser J.⁵ Therisod G.⁵

AAPRESID, ¹Regional Necochea, ³Juan Manuel Fangio, ⁴Tres Arroyos y ⁵Tandilia.

²Unidad Integrada Balcarce INTA-Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP
guillermomodivito@gmail.com

La nutrición de trigo y cebada es fundamental para el logro de elevados rendimientos y la obtención de granos de buena calidad según el destino comercial. El presente trabajo tiene como objetivo describir las metodologías de diagnóstico y fertilización nitrogenada más empleadas y mostrar los resultados que se observan en lotes de producción de las Regionales AAPRESID del sudeste bonaerense.

La información de campo surge de 311 lotes de cebada (199 de la Regional Necochea, 63 de J.M. Fangio, 20 de Tres Arroyos y 29 de Azul-Tandil) y 448 lotes de trigo (89 de Necochea, 277 de J.M. Fangio, 49 de Tres Arroyos y 33 de Azul-Tandil) de las campañas 2015/16, 2016/17 y 2017/18. Los mismos provienen de zonas representativas de las cuatro Regionales: desde Gral. Madariaga (al este) hacia Azul (al oeste) y hasta Tres Arroyos (hacia el sur). Puede consultarse más información en Therisod et al. (2017) y Divito et al. (2018).

El ambiente

Las condiciones ambientales del sudeste bonaerense son muy favorables para el crecimiento y desarrollo de los cereales de invierno (Abbate, 2017). En general, existe baja probabilidad de ocurrencia de déficit hídrico previo al período crítico para la definición del rendimiento, que ocurre entre mediados de octubre y mitad de noviembre. Por el contrario, son frecuentes los excesos de agua entre la siembra y comienzos de encañazón, que reducen la eficiencia de uso del nitrógeno (N) aplicado en estadios tempranos (Reussi Calvo y Echeverría, 2006). Por otra parte, los registros moderados de temperatura alrededor de floración definen valores de cociente fototermal (relación entre la radiación solar media y la temperatura media) muy favorables para el cultivo (Abbate, 2017).

En este contexto, es fundamental definir estrategias de fertilización nitrogenada adecuadas, a fin de lograr altos rendimientos, obtener granos con elevado contenido de proteína y procurar la mayor eficiencia en el uso del nutriente.

Métodos de diagnóstico

Modelos empíricos "tradicionales"

Los "modelos empíricos" son la metodología más usual para definir la fertilización de los cultivos en la zona y en la Región Pampeana en general. Los mismos se basan en el análisis de información experimental sobre la respuesta del rendimiento de los cultivos ante un gradiente de disponibilidad de N en el suelo en forma de nitrato (N-NO_3^-) sumado al N aportado por el fertilizante (Figura 1). Estos modelos son popularmente conocidos como "tanto - X" (Ej. 120-X). Así, la recomendación de la cantidad de N a aplicar como fertilizante (**Nf**) se realiza según la diferencia entre el umbral crítico (**Uc**) y la disponibilidad de N-NO_3^- (kg ha^{-1}) en el suelo ("**X**"), generalmente medida en el estrato 0-60 cm de profundidad: $\text{Nf} = \text{Uc} - \text{X}$.

Para el sudeste bonaerense, esos modelos comúnmente oscilan alrededor de 120-X para la zona de Tres Arroyos, 150-X para la zona "continental" de Necochea y serrana somera y 200-X en ambientes de alto potencial de rendimiento (zona costera de Necochea hacia Gral. Madariaga). De manera general, los distintos Uc que se establecen entre regiones obedecen a diferencias en: *rendimiento objetivo* (a mayor rendimiento, aumentan los requerimientos de N), el *ambiente general* (las características del suelo y clima definen tanto la demanda de N del cultivo como la dinámica del nutriente en el suelo), *cultivares* (según potencial de rendimiento y eficiencia de uso de N) y el manejo agronómico del cultivo y fertilización (definen la eficiencia de uso del fertilizante).

Como se indicó, estos modelos son los más empleados, aunque presentan como desventajas que: i) no contemplan la oferta de N por mineralización durante el ciclo del cultivo, ii) no consideran el contenido de proteína en grano, ni iii) el diagnóstico en estadios avanzados del cultivo.

Inclusión de estimadores del potencial de mineralización

La materia orgánica (MO) del suelo constituye una de las principales fuentes de N para los cultivos. Existe una amplia variación en el contenido de MO entre suelos de distintas zonas y, mismo, entre suelos de una misma región, lo que genera diferencias en el potencial de mineralización del nutriente. En los últimos años se ha avanzado en el estudio de estimadores sencillos de dicho potencial, siendo el *N anaeróbico (Nan)* uno de los métodos que mejor performance ha mostrado (Reussi Calvo et al., 2013). Así, su incorporación a los modelos empíricos tradicionales nos permite un mejor ajuste de la fertilización. A modo de ejemplo, la inclusión del Nan evitaría la subestimación de la dosis de N en situaciones de bajo potencial de mineralización (ej. lotes con prolongada historia agrícola) o la sobrestimación en ambientes de alto potencial (ej. lotes que han tenido pasturas recientemente).

Trabajos recientes indican que por cada 1 mg kg⁻¹ que varía el Nan, el N proveniente de la mineralización absorbido por la planta se modifica 1,37 kg ha⁻¹ (Reussi Calvo et al., 2018) (Figura 2). Así, empleando este valor promedio, y considerando un 60-70% de eficiencia de uso del N mineralizado, surge que es necesario corregir en ≈2-2,3 kg ha⁻¹ los modelos empíricos tradicionales en la medida en que el Nan se aparta 1 mg kg⁻¹ de los valores medios de la zona (Figura 2). Estos modelos de recomendación solo deben considerarse como una primera aproximación y, por ende, es necesario el monitoreo dinámico del cultivo.

Modelos que incorporan "proteína objetivo"

Los modelos empíricos tradicionales, o aun los que consideran el Nan, definen el *Uc* en el punto donde se maximiza el rendimiento (o se obtiene un alto porcentaje del máximo), pero no consideran el contenido de proteína en grano. En este sentido, Prystupa et al. (2018) propusieron un modelo superador para cebada que permite definir la oferta de N (N-NO₃⁻ en 0-60 cm + fertilizante) por tonelada de rendimiento objetivo según el contenido de proteína que se pretenda alcanzar. Para el sudeste bonaerense, trabajos en curso muestran que son necesarios alrededor de

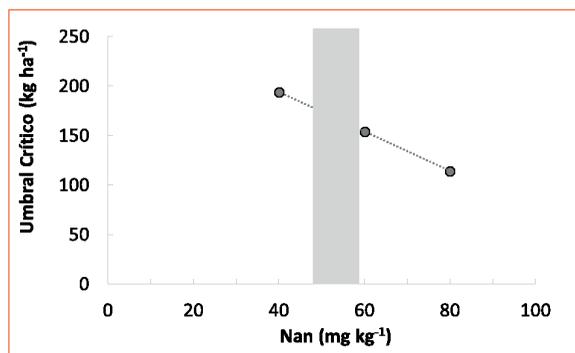


Figura 2. Umbral crítico (kg N ha⁻¹) para el modelo empírico en función del N incubado en anaerobiosis (Nan, mg kg⁻¹) para el sudeste bonaerense. Umbral calculado para rendimiento de trigo de 5500 kg ha⁻¹ y asumiendo que el contenido de proteína se mantiene constante. Elaborado en base al modelo propuesto por Reussi Calvo et al. (2018). La franja gris indica valores medios de Nan para el sudeste bonaerense (Reussi Calvo et al., 2014).

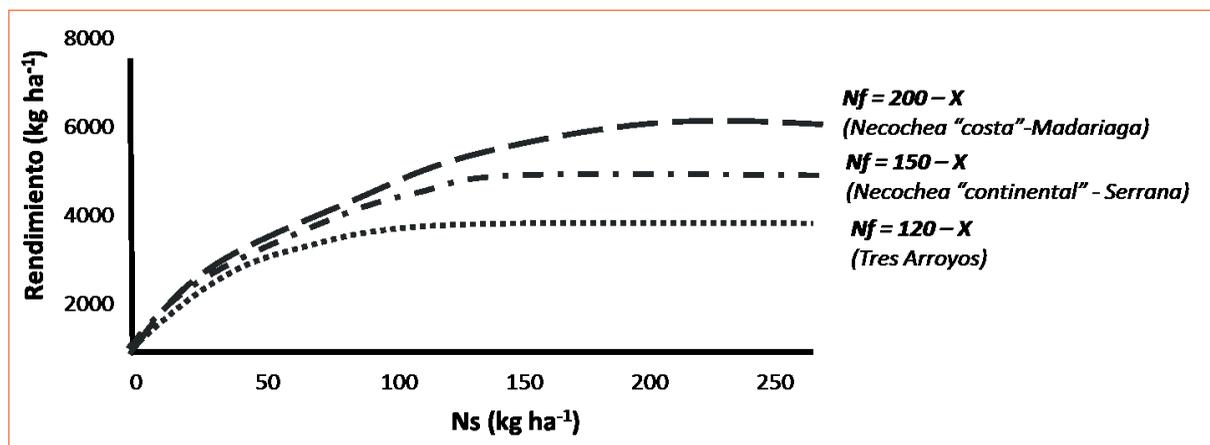


Figura 1. Representación teórica del rendimiento del trigo o cebada en función de la disponibilidad de N (N-NO₃⁻ en 0-60 cm + N del fertilizante, kg ha⁻¹) para distintas zonas del sudeste de Buenos Aires.

32 kg N tonelada de grano para lograr 10% de proteína (Queirolo l., com. pers.). Sin embargo, como se desprende de la sección anterior, este valor puede variar en función del potencial de mineralización del suelo, entre otros.

Modelos dinámicos: uso de sensores ópticos en estadios avanzados

La aplicación de N "de base" generalmente se hace fraccionando la dosis, entre los estadios Z12 y Z31, a fin de lograr una mayor eficiencia de uso del nutriente (Velasco et al., 2012; Orcellet et al., 2015). En este punto, existe diferencia respecto a lo usual para el oeste de Buenos Aires o sur de Córdoba o Santa Fe, donde las precipitaciones son menos abundantes. La proporción del fertilizante a aplicar en cada oportunidad se decide según la disponibilidad de N determinada con el análisis del suelo. Así, si la disponibilidad es baja (50 kg N ha⁻¹, o menos), se aplica un 60-70% de la dosis en la primera fertilización y un 30-40% en la segunda. Si la disponibilidad es mayor se fracciona la dosis en mitades. Asegurar una buena provisión de N durante el macollaje es particularmente importante en cebada, donde el número de macollos o espigas condicionan fuertemente el rendimiento debido a la menor plasticidad reproductiva en comparación con el trigo.

Una vez realizada la aplicación "de base" es necesario continuar con el monitoreo del status nitrogenado del cultivo. Para tal fin, existe una amplia gama de sensores de transmitancia y refractancia que permiten evaluaciones rápidas

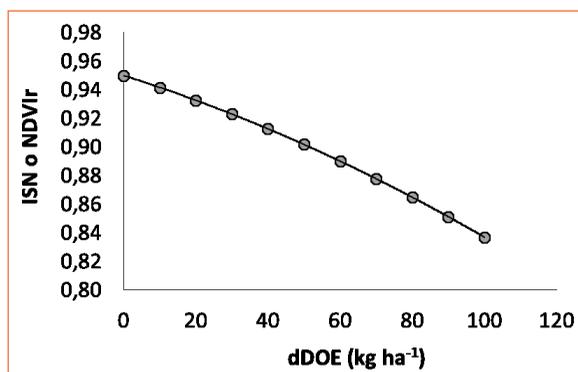


Figura 3. Índice de suficiencia de N (ISN) e índice normalizado de diferencias de vegetación relativo (NDVIr) en función de la diferencia de N disponible con respecto a la dosis óptima económica (dDOE). Modelo propuesto por Queirolo et al. (2018) para evaluaciones entre los estadios Z31 y Z39 de cebada.

y no destructivas. Uno de los instrumentos más difundidos es el medidor de clorofila Minolta SPAD® 502, que determina la intensidad del color verde de la hoja (índice de verdor, IV). También existen *sensores remotos* capaces medir la reflectancia espectral del cultivo. Entre ellos, los más utilizados son los que permiten calcular el índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI, según sus siglas en inglés), que depende de la capacidad del cultivo de interceptar (de acuerdo al área foliar) y absorber (según la concentración de clorofila) la radiación. Tanto el IV como el NDVI están afectados por varios factores como la variedad y estado de desarrollo del cultivo, la incidencia de plagas, enfermedades etc. Por ello, es necesario establecer en el lote a monitorear áreas o "franjas" de referencia con **suficiencia de N** a fin de relativizar las mediciones según:

$$ISN = IV_{\text{lote}} / IV_{\text{ref}} \quad \text{ó}$$

$$NDVI_r = NDVI_{\text{lote}} / NDVI_{\text{ref}}$$

donde: **ISN** es el índice de suficiencia de N, **NDVI_r** es el NDVI relativo, **IV_{lote}** y **NDVI_{lote}** son el IV y NDVI del lote problema, respectivamente e **IV_{ref}** y **NDVI_{ref}** representan el IV y NDVI de las franjas con suficiencia de N, respectivamente.

A partir de dichos indicadores Queirolo et al. (2018) propusieron modelos que permiten estimar la dosis de N a aplicar en cebada en el sudeste bonaerense. La **Figura 3** muestra que en la medida que el ISN o el NDVI_r del lote es menor, mayor será la cantidad de N a aplicar para alcanzar la

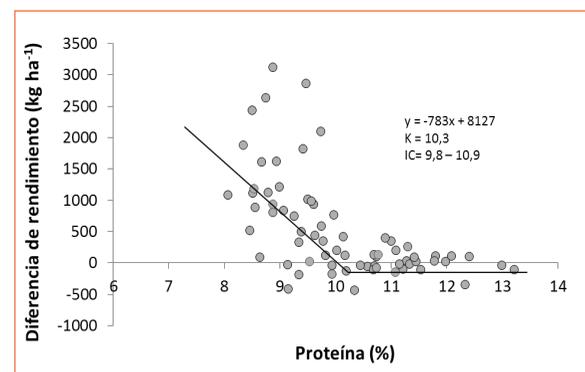


Figura 4. Diferencia en rendimiento entre tratamientos con dosis crecientes de nitrógeno y aquellos fertilizados con dosis de suficiencia (kg ha⁻¹) en función de la concentración de proteína en grano. Datos de Reussi Calvo et al. (2013) y Divito y Torres (inédito). K es el valor de proteína umbral e IC es el intervalo de confianza del umbral.

dosis óptima económica (dDOE) para rendimiento. Similares relaciones han sido determinadas en trigo por Reussi Calvo et al. (2015) para la misma región. Es importante destacar que la fertilización con N en estadios avanzados del cultivo (Z31 a Z39) debe plantearse como complemento a las aplicaciones “de base” y con el fin de realizar ajustes menores en las dosis del nutriente.

Diagnóstico final: proteína en grano

La concentración de un nutriente en grano es un indicador robusto de la disponibilidad del mismo que tuvo un cultivo (Salvagiotti et al., 2012; Divito et al., 2015). De este modo, el contenido de proteína en granos de trigo y cebada puede emplearse como indicador del grado de deficiencia de N. Del análisis de datos de ensayos realizados en trigo (Divito y Torres, inédito y Reussi Calvo et al., 2013) surge que cuando el contenido de proteína fue menor a 10,3%, los tratamientos manifestaron mermas en el rendimiento con respecto a aquellos que recibieron dosis de suficiencia del nutriente (Figura 4).

Datos de campo: validación de modelos y desafíos

Rendimiento

Los rendimientos medios de trigo y cebada fueron altos en las últimas tres campañas. El promedio para trigo de las Regionales JM Fangio, Necochea y Azul Tandil fue 5070 kg ha⁻¹, mientras que hacia Tres Arroyos los rendimientos medios fueron menores (3707 kg ha⁻¹) (Figura 5). Para cebada las tendencias fueron similares, aunque se destaca el mayor rendimiento medio para todas las Regionales y campañas respecto al trigo (664 kg ha⁻¹, en promedio). También se observó menor variabilidad en el rendimiento y menor diferencia entre Regionales respecto a trigo (Figura 5). Esto estaría explicado principalmente por las características del cultivo de: (i) menor susceptibilidad al estrés debido a deficiencias hídricas y (ii) mayor tolerancia a heladas (Frederiks, et al., 2015) (que provocó pérdidas de rendimiento en la zona en el ciclo 2016/17).

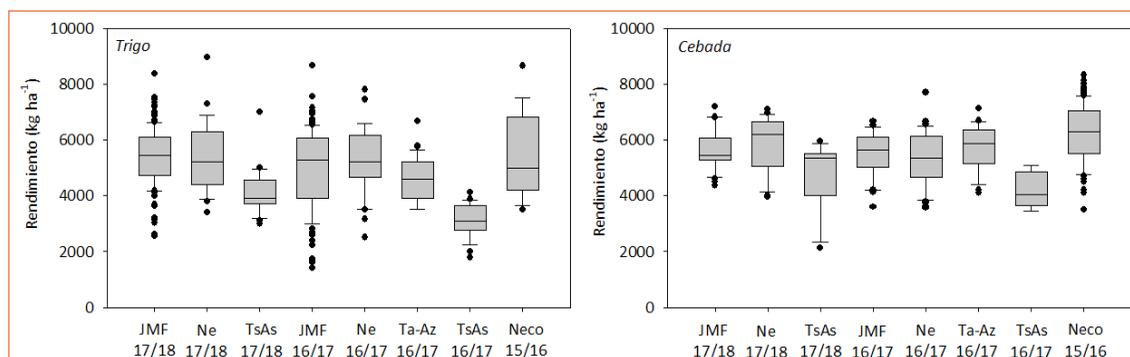


Figura 5. Rendimiento de trigo y cebada en lotes de las Regionales JM Fangio (JMF), Necochea (Ne), Tres Arroyos (TsAs) y Tandil-Azul (Ta-Az) para las campañas 17/18, 16/17 y 15/16.

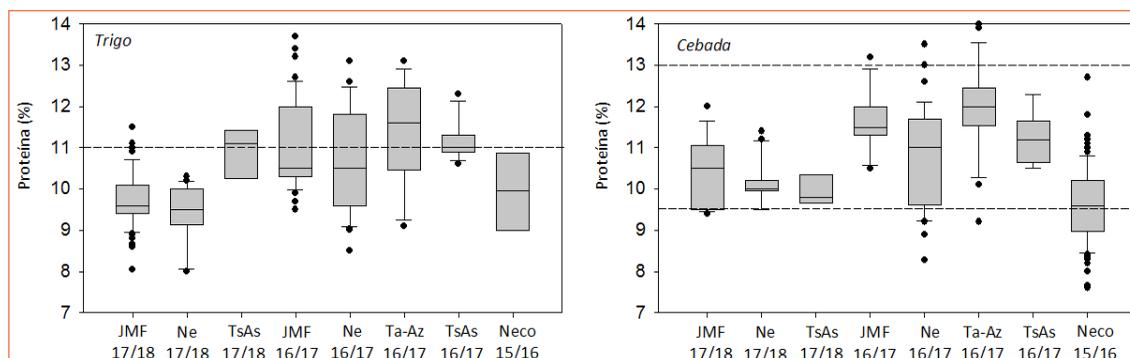


Figura 6. Proteína en grano de trigo y cebada en lotes de las Regionales JM Fangio (JMF), Necochea (Ne), Tres Arroyos (TsAs) y Tandil-Azul (Ta-Az) para las campañas 2017/18, 2016/17 y 2015/16. Líneas punteadas marcan el límite establecido para bonificaciones o rebajas en la Norma de Calidad para la Comercialización de Trigo Pan o el límite máximo y mínimo establecido en la Norma de Calidad para la Comercialización de Cebada.

Se destaca que en el 27% de los lotes de trigo y el 48% de los de cebada de las Regionales JM Fangio, Necochea y Tandil-Azul se lograron rendimientos superiores a los 6000 kg ha⁻¹. Estos rendimientos imponen un desafío para el manejo de la nutrición, en especial si se pretende obtener granos con altos valores de proteína.

Proteína

En trigo, y para la campaña 2017/18, el contenido de proteína promedio de Necochea y JM Fangio fue 9,7%, mientras que en Tres Arroyos fue 10,6%. En 2016/17, el valor medio fue 11,1%, siendo este levemente menor en Necochea. Por su parte, en 2015/16 la concentración promedio de Necochea fue 10,1% (Figura 6). En cebada la tendencia general fue similar, observándose mayores contenidos de proteína en la campaña 2016/17 para todas las Regionales (Figura 6).

En las Regionales J.M. Fangio y Necochea la concentración de proteína en granos de trigo en las campañas 2017/18 y 2015/16 fue, en casi la totalidad de los lotes, menor al límite inferior que marca la Norma de Comercialización para la aplicación de descuentos (11%). Estos resultados concuerdan con el manejo nutricional de los cultivos más frecuente en estas Regionales, donde el destino de la exportación no ofrece suficientes estímulos comerciales para el logro de elevados valores de proteína. Sin embargo, se destaca que, para las tres campañas analizadas, el 65% de los lotes de dichas Regionales presentaron valores de proteína menores a 10,3%, umbral por debajo del cual se observaron diferencias en el rendimiento con respecto a cultivos sin deficiencia de N (Figura 5). Esto indica que,

aunque el destino comercial no ofrezca ventajas que ameriten planteos intensivos en el uso de N, resulta importante realizar un correcto diagnóstico y fertilización porque la deficiencia puede restringir el rendimiento. Por otra parte, en Tres Arroyos y Azul-Tandil, los molinos harineros representan un destino importante de la producción, por lo que la elección de cultivares y estrategias de fertilización permiten obtener valores elevados de proteína (Figura 6).

En cebada se observó que el 89% de los lotes presentó valores de proteína dentro del rango establecido en la Norma de Calidad para la Comercialización de Cebada Cervecera. En este caso, el sobreprecio percibido por el productor respecto a la comercialización como forrajera (hasta U\$S 30 por tonelada), incentiva al uso de métodos de diagnóstico y buenas prácticas de fertilización.

Para ambos cultivos, se determinó asociación negativa entre rendimiento y proteína ($P < 0,01$). Como se observa al contrastar las relaciones entre variables para los dos cultivos con las isolíneas de rendimiento de N (Figura 7), la caída en los valores de proteína fue mucho más atenuada que la dilución de N, lo que indica que la oferta de N aumentó conforme lo hizo el rendimiento del ambiente. Sin embargo, la asociación negativa confirma lo mencionado anteriormente: mantener altos valores de proteína constituye un desafío en ambientes de alto potencial de rendimiento.

Modelos para "proteína objetivo"

Para lotes de cebada provenientes de las cuatro Regionales y tres ciclos de cultivo, existió asociación entre el contenido de proteína en

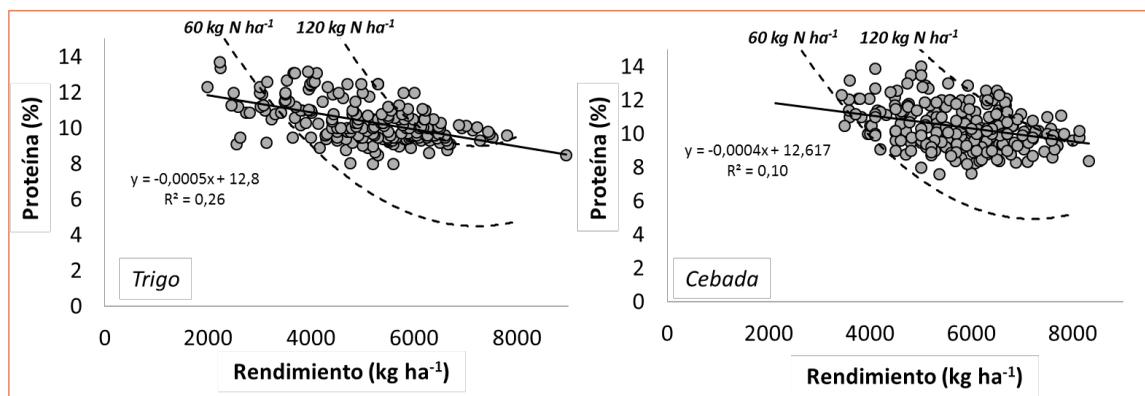


Figura 7. Relación entre proteína en grano y rendimiento para trigo y cebada. Las líneas punteadas conectan puntos con igual rendimiento de nitrógeno en grano (kg N ha⁻¹).

grano y el cociente entre la oferta de N ($N-NO_3^-$ en 0-60 cm + N del fertilizante) por tonelada de grano (Figura 8). El umbral establecido para obtener 10% de proteína fue 30,2 kg N tonelada⁻¹, similar al obtenido por Queirolo (com. pers.) en ensayos realizados en la zona. No obstante, se observa una importante variación alrededor de la recta de ajuste. Entre otras causas, esto puede obedecer a variaciones en el potencial de mineralización de los lotes. En trigo, también puede haber diferencias entre variedades que pertenecen a distinto grupo de calidad. Fraschina (2017) determinó que variedades del Grupo 1 alcanzan un mayor contenido de proteína en grano ante igual disponibilidad de N por tonelada de grano. Se destaca que la validación con datos de campo de los modelos y umbrales surgidos en ámbitos académicos reafirma su utilidad.

Es importante destacar que para lograr que el cultivo tenga una determinada disponibilidad de N por tonelada de rendimiento, a fin de lograr el contenido de proteína propuesto, es necesario tener una proyección acertada de dicho rendimiento. Para ello, productores y asesores deben poner énfasis en definir la distribución de probabilidades de rendimiento de cada lote y/o ambiente dentro de un lote. En estos casos, el análisis de información de campañas previas y el uso de modelos de simulación resulta de utilidad. Como se indicó, es fundamental el empleo de modelos dinámicos de diagnóstico (con sensores ópticos, etc.) que permitan realizar correcciones según variaciones en el rendimiento proyectado.

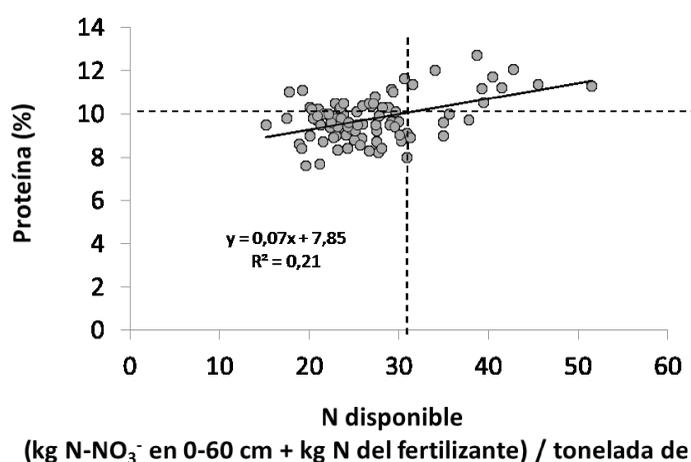


Figura 8. Relación entre proteína en grano y el cociente entre la disponibilidad de N ($N-NO_3^-$ en 0-60 cm + N del fertilizante) y el rendimiento en grano para cebada. Datos de lotes de producción.

Consideraciones finales

Las condiciones ambientales del sudeste bonaerense permiten obtener rendimientos elevados en trigo y cebada. Por ello, la obtención de granos con alta proteína constituye un desafío.

Los modelos de diagnóstico que contemplan el potencial de mineralización de N del suelo, el contenido de proteína de los granos y que permiten el monitoreo en estadios avanzados del cultivo constituyen alternativas superadoras a los modelos empíricos tradicionales.

Los datos surgidos de lotes de producción validan los modelos surgidos en ámbitos académicos, lo que representa un estímulo para su empleo.

Bibliografía

- Abbate, P.E.A. 2017. Ecofisiología y manejo del cultivo de trigo. En: Divito G.A. y García F.O. Manual del cultivo de trigo. International Plant Nutrition Institute. Pp 33-52.
- Divito, G.A., Echeverría, H.E., Andrade, F.H., Sadras, V.O. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. Field Crops Res. Field Crops Res. 180, 167-175.
- Divito, G.A.; Torres, A.; Bergh, G.; Piloni, L. Martínez. 2017. Lo que la fina nos dejó. Red de Innovadores. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID). 162: 22-27.
- Fraschina J. 2017. ¿Por qué es importante la calidad del trigo? En: Divito G.A. y García F.O.

- Manual del cultivo de trigo. International Plant Nutrition Institute. Pp 57-66.
- Frederiks, T. M., Christopher, J. T., Sutherland, M. W., & Borrell, A. K.** 2015. Post-head-emergence frost in wheat and barley: defining the problem, assessing the damage, and identifying resistance. *Journal of experimental botany*, 66(12), 3487-3498.
- Orcellet, JM.; NI Reussi Calvo; HE Echeverría; HR Sainz Rozas; N Diovisalvi & A Berardo.** 2015. Eficiencia de uso de nitrógeno en cebada en el sudeste bonaerense: efecto de aplicaciones divididas. *Ciencia Suelo* 33 (1): 97-105.
- Prystupa, P. Ferraris, G. Ventimiglia, L. Loewy, T. Couretot, L. Bergh, R. Gómez, F. Gutiérrez Boem, F.** 2018. Environmental control of malting barley response to nitrogen in the Pampas, Argentina. *Int. J. Plant Prod.* 12: 127.
- Queirolo, I.M., Reussi Calvo N., Sainz Rosas H.R., Prystupa P., Divito G.** 2018. Uso de sensores de canopeo para calcular la dosis óptima económica de nitrógeno en cebada. En: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán. (on-line).
- Reussi Calvo, N. & H. Echeverría.** 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Cien. Suelo.* 24 (2):115-122.
- Reussi Calvo, N.I., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, A. Berardo.** 2013. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agron. J.* 105:321-328
- Reussi Calvo, N.; H. Sainz Rozas; H. Echeverría; N. Diovisalvi.** 2015. Using canopy indices to quantify the economic optimum nitrogen rate in spring wheat. *Agronomy Journal*, 107 (2): 459-465.
- Reussi Calvo, N.I., Wyngaard, N., Orcellet, J., Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E.** 2018. Predicting Field-Apparent Nitrogen Mineralization from Anaerobically Incubated Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 82(2), 502-508.
- Salvagiotti, F., Ferraris, G., Quiroga, A., Barraco, M., Vivas, H., Prystupa, P., Echeverría, H., Gutiérrez Boem, F.H.,** 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Res.* 135, 107-115.
- Therisod G.; Bergh, G.; Divito, G.A.; Torres, A.; Piloni, L.** 2017. ¿Qué nos dejó la fina 2016/17 en el sudeste bonaerense? *Revista Técnica. Cultivos Invernales 2017.* Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), 4-12.
- Velasco, JL; H Sainz Rozas; H Echeverría & P Barbieri.** 2012. Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions: Effect of split application. *Can. J. Plant Sci.* 92:1-10 ◀

