



Foto: Andrés Berger

# OPTIFERT-N: Nueva herramienta para optimizar la fertilización nitrogenada en trigo

Ing. Agr. MSc. PhD Andrés G. Berger<sup>1</sup>,  
Ing. Agr. Nicolás Baráibar<sup>2</sup>,  
Ing. Agr. Dr. Nicolás Maltese<sup>1</sup>,  
Ing. Agr. PhD Fernando Lattanzi<sup>3</sup>,  
Ing. Agr. PhD Agustín Núñez<sup>4</sup>,  
Ing. Agr. PhD Valentina Rubio<sup>1</sup>,  
Ing. Agr. Dr. Sebastián R. Mazzilli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sistema Agrícola-Ganadero

<sup>2</sup>Técnico Sectorial - INIA La Estanzuela

<sup>3</sup>Área de Pasturas y Forrajes

<sup>4</sup>Área de Recursos Naturales, Producción y Ambiente

Optifert-N es una innovadora herramienta desarrollada por INIA para optimizar el ajuste de la fertilización nitrogenada en cultivos de trigo durante la encañazón (Z30-Z50), que complementa modelos ya existentes para siembra y macollaje basados en muestreos de suelo. A partir del diagnóstico del estado nutricional del cultivo, basado en muestreos de planta, la herramienta estima la necesidad final de nitrógeno del cultivo en función de la deficiencia de N actual, la proyección de crecimiento dado el estado actual del cultivo y el aporte esperado de N del suelo. De esta manera, se logra un uso más eficiente del nutriente aplicado en diversas secuencias agrícolas, sugiriendo dosis de N más elevadas en zonas con mayor deficiencia o potencial de rendimiento, y reduciendo la dosis recomendada en zonas con menor deficiencia o con su potencial de rendimiento comprometido.

## INTRODUCCIÓN

Para los cereales de invierno (trigo y cebada) la disponibilidad de nitrógeno (N) suele ser uno de los principales determinantes del rendimiento.

Esto es así ya que el nivel de rendimiento depende mayormente del número de granos que logra concretar el cultivo, y esto depende a su vez de que el cultivo tenga altas tasas de crecimiento durante la encañazón, para lo cual se requiere absorber una alta cantidad de N.

A medida que el cultivo crece durante el período de encañado, si no hay un aporte suficiente de N del suelo o de la fertilización, su disponibilidad se va agotando gradualmente y el cultivo reduce su tasa de crecimiento. Si la deficiencia se mantiene en el tiempo, además, se empiezan a observar síntomas visuales de deficiencia de N (amarillamiento foliar y senescencia prematura de hojas basales).

Empíricamente se ha obtenido, y está ampliamente aceptada, una curva de referencia de contenido crítico de N en planta (Justes, 1994) (Figura 2, línea roja). Esta curva define el contenido mínimo de N que el cultivo debe tener para maximizar su tasa de crecimiento. A partir de la curva de N crítico también se puede estimar un índice de nutrición nitrogenada (INN), que permite, en un único indicador, evaluar el nivel de deficiencia actual de N del cultivo. Valores mayores a 1 indican suficiencia e inferiores a 1 deficiencia. Esta curva además permite proyectar cuál debe ser la cantidad de N absorbido a medida que el cultivo crece y acumula biomasa para mantener un INN = 1. Por lo tanto, es posible utilizar la curva crítica de N absorbido para determinar la demanda de N del cultivo y estimar las necesidades de fertilización (Lemaire *et al.*, 2019; Lemaire *et al.*, 2021).

En Uruguay existe una larga historia de trabajo e investigación sobre las necesidades de fertilización con N en estos cultivos que han derivado en guías y recomendaciones de fertilización propuestas mayormente desde FAGRO-Udelar e INIA. Las dos líneas más recientes de trabajo han hecho énfasis, por un lado, en estimar las necesidades a partir de análisis de suelo y, por otro lado, a partir de análisis a nivel de planta. Los trabajos liderados por FAGRO-Udelar que se iniciaron en los años 90 (García *et al.*, 1994; Perdomo *et al.*, 1999; Perdomo y Bordolli, 1999; Hoffman *et al.*, 2001) calibraron el análisis de suelo (0-20 cm) de nitratos a siembra y dos macollos (Z22).

Asimismo, los trabajos liderados por INIA (Baethgen, 1992), calibraron un modelo de recomendación basado en el análisis del contenido de N en planta a inicios de encañazón (Z30) y una estimación de rendimiento esperado (banda en el gráfico de Baethgen, 1992).

Todos estos trabajos se resumen muy bien en un modelo integrado que considera muestreos de suelo a siembra y Z22 y muestreos de planta a Z30 (Hoffman *et al.*, 2010). Este modelo es la propuesta actual de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización nitrogenada y ha sido validado en múltiples trabajos posteriores, mostrando buenos ajustes en los primeros trabajos, aunque esto ha cambiado en los trabajos más recientes, y su uso a nivel productivo es limitado.

El cambio gradual en el sistema productivo, desde un sistema con rotaciones pasturas-cultivos a un sistema de cultivo continuo en siembra directa, así como un aumento en la disponibilidad de cultivares con mayor potencial de rendimiento, ha llevado a que este esquema de recomendación diagnostique dosis de N que usualmente resultan inferiores a lo que requiere el cultivo, perdiendo rendimiento o concretando niveles de proteína más bajos que lo requerido por la industria.

Ante esta necesidad de reajuste de los modelos de recomendación han surgido nuevos trabajos de diagnóstico del estado nutricional del cultivo en estadios posteriores a inicio de encañazón (Fassana *et al.*, 2022). Sin embargo, es necesario generar modelos que no sólo contemplen el estado nutricional actual, sino también las expectativas de crecimiento futuro para generar recomendaciones dinámicas que reflejen mejor las necesidades del cultivo.

En este artículo se presenta una innovadora herramienta de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización nitrogenada entre Z30 y Z50 (Optifert-N), para complementar los esquemas existentes para siembra y macollaje. Esta herramienta, integra un balance dinámico de N (Figura 1) con el diagnóstico cuantitativo del nivel de deficiencia y la necesidad futura del cultivo en función de una curva de referencia de absorción crítica de N.

Tiene como ventaja que permite obtener resultados confiables en cualquier momento del período mencionado (Z30-Z50), incluso bajo situaciones de aplicaciones divididas en más de una oportunidad, permitiendo volver a utilizar la herramienta en forma repetida en más de un momento de muestreo dentro de este período. El uso de una trayectoria crítica de absorción de N en un sistema real de apoyo a la decisión de fertilización es una innovación que se alinea con estrategias de manejo propuestas en la literatura internacional (Lemaire *et al.*, 2021) para asegurar un uso eficiente del nutriente minimizando pérdidas sin comprometer la sostenibilidad ambiental y económica del sistema.

Optifert-N tiene como ventaja que permite obtener resultados confiables en cualquier momento del período Z30-Z50.





Figura 1 - Cálculo de estimación de necesidades de refertilización.

### FUNDAMENTOS DEL CÁLCULO Y APLICABILIDAD

Optifert-N está diseñada para utilizarse a partir de Z30 y hasta Z50 inclusive, es decir, durante todo el período de encañado y ser utilizada para realizar la última corrección de las necesidades de N del cultivo. Previo a este momento (siembra y macollaje), las necesidades de fertilización con N del cultivo deben estimarse con herramientas que ya existen basadas en análisis de suelo (que no vamos a comentar aquí).

Esta herramienta estima la necesidad de fertilización adicional como la diferencia entre la corrección de la deficiencia actual, la demanda futura y el aporte previsto desde las dos fuentes de N más importantes que tendrá el cultivo: N residual presente en el suelo al momento del diagnóstico (fertilizante + suelo) y aportes de N por mineralización de la materia orgánica del suelo (Figura 1).

Se entiende que la principal determinante de la necesidad de fertilización está dada por la demanda futura de N del cultivo. Optifert-N utiliza una metodología novedosa para su estimación, basada en la curva de referencia de absorción crítica de N, como se muestra en la Figura 2.

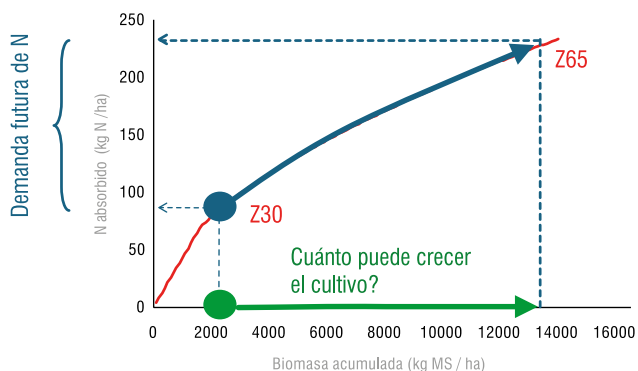


Figura 2 - Diagrama conceptual de estimación de la demanda de N del cultivo. La línea roja es la curva de referencia (N crítico), la línea azul es la trayectoria de acumulación de N que debería seguir el cultivo a medida que acumula biomasa, y la línea verde representa cuánto puede crecer el cultivo.

El uso de esta curva resulta en un novedoso abordaje que tiene como principal ventaja que la demanda de N se estima a través de proyectar la acumulación de biomasa esperada del cultivo desde el momento de muestreo hasta floración (Z65). Estimar la acumulación de biomasa es más simple y más preciso que estimar directamente la necesidad de N. Para esto Optifert-N requiere como entradas, datos de fecha de siembra y cultivar (para estimar la fenología) e incorpora algoritmos que permiten considerar variaciones en la estimación de acumulación de biomasa dadas por cambios en el estado actual del cultivo y manejo.

### ENTRADAS Y SALIDAS: ¿QUÉ DATOS SE REQUIEREN PARA UTILIZARLO?

Para utilizar Optifert-N es requisito fundamental un muestreo de planta al momento de generar la recomendación (e.g. Z30) (Figura 3). Esto permitirá estimar el estado nutricional actual del cultivo (cantidad de biomasa acumulada, cantidad de N absorbido e INN). También permitirá proyectar el crecimiento futuro, y las necesidades de refertilización. Por esta razón el muestreo debe hacerse con la mayor precisión posible (ver sección siguiente). Además, se requieren otros datos (Cuadro 1), que permiten estimar todos los componentes del balance. Como contrapartida, el modelo estima como resultado la dosis de N a agregar (kg de N /ha) para el momento de diagnóstico.

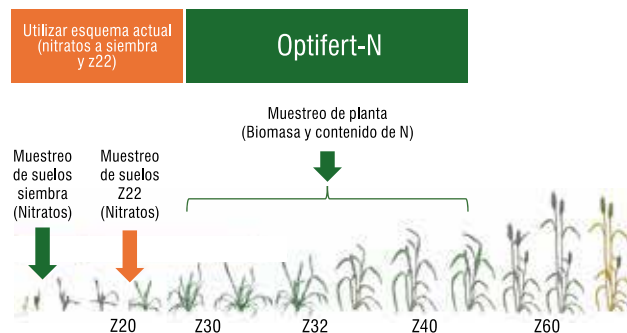


Figura 3 - Esquema de muestreos Optifert-N. Las flechas verdes indican los muestreos requeridos por Optifert-N.

**Cuadro 1** - Entradas y salidas de Optifert-N.

| Entradas  | Unidades  |
|---|---|
| <b>Datos de la chacra</b>                             |   |
| Cultivar  |   |
| Fecha de emergencia                                   |   |
| Localidad   | (ej. LE, YO, TT, TB)  |
| Capacidad de mineralización                           | (Muy baja- Baja-Media-Alta-Muy alta)  |
| Nitratos en suelo a la siembra (0-20cm)               | ppm N-NO <sub>3</sub>   |
| Dosis de N aplicada a la siembra (si la hay)          | Kg de N/ha  |
| Dosis de N aplicada en macollaje (si la hay)          | Kg de N/ha  |
| Dosis de N aplicada en encañazón temprana (si la hay) | Kg de N/ha  |
| <b>Muestreo de planta para utilizar el modelo</b>     |   |
| Fecha de muestreo                                     |   |
| Biomasa en momento de muestreo                        | Kg de MS/ha   |
| Contenido de N  | %N  |
| Salidas   | Unidades  |
| Dosis de N a aplicar en este momento                  | Kg de N /ha   |
| Fecha de floración estimada                           |   |
| N absorbido hasta fecha de muestreo (actual)          | Kg de N/ha  |
| Índice de nutrición nitrogenada (INN) actual          | Valores menores a 1 indican deficiencia, valores mayores a 1 indican consumo de lujo (exceso) |
| N absorbido estimado hasta floración (Z65)            | Kg de N /ha   |
| Crecimiento esperado hasta floración (Z65)            | Kg de MS/ha   |

### ¿CÓMO REALIZAR EL MUESTREO DE PLANTA?

El muestreo de planta se debe hacer colectando toda la biomasa acumulada en la parte aérea, incluyendo hojas secas. Se recomienda cortar sobre la línea del suelo, al ras del rastrojo (dejando una altura de tallos menor a 1 cm), pero sin incorporar raíces ni suelo (Figura 4).

Todo el material (macollos, tallos y hojas verdes y secas) debe formar parte de la muestra. Se necesita cortar un área conocida, por lo que se sugiere cortar 1 metro lineal de surco, eligiendo un surco representativo del lote, de la zona de muestreo, o del ambiente de manejo para el cual se desea obtener un resultado (e.g. 1 m de surco con siembra a 0,19 m de distancia entre surcos = 0,19 m<sup>2</sup>).

**Figura 4** - Corte de biomasa de cultivo en Z30.



Para evitar errores de submuestreo y contenido de materia seca, sugerimos solicitar al laboratorio el peso seco de toda la muestra enviada, correspondiente al área de corte conocida (e.g. biomasa acumulada en kg MS /ha = 10 \* peso seco de muestra en g / 0,19 m<sup>2</sup>).

## DISPONIBILIDAD Y PERSPECTIVAS A FUTURO DE OPTIFERT-N

La primera versión de OptiFert-N está disponible para trigo desde junio de 2024. Esta herramienta es producto de una larga trayectoria de investigación con más de 10 años de datos generados en al menos 40 ensayos experimentales. El equipo de INIA está trabajando activamente en seguir ajustando y calibrando la herramienta para incorporar nuevas mejoras en la estimación de las necesidades de fertilización de los cultivos. En particular, se están desarrollando varios proyectos para mejorar la capacidad de predecir el N que aportan los suelos y extender el uso de la herramienta a nuevos cultivos (cebada y maíz). En próximos artículos presentaremos resultados de ajuste y validación para trigo, así como resultados de análisis de sensibilidad sobre parámetros del modelo.

Acceda a Optifert-N

Acceda **AQUÍ**

## REFERENCIAS

Baethgen W. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Serie Técnica N° 24. Colonia: INIA La Estanzuela. 1992. 59p. García Lamothe, A. 2004. Manejo de la fertilización con nitrógeno en trigo y su interacción con otras prácticas agronómicas. INIA Serie Técnica N° 144.

Hoffman E, Perdomo C, Ernst O, Bordolli M, Pastorini M, Pons C, Borghi E. 2001. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. In: Seminario Nacional de discusión técnica. Junio del 2001. Paysandú-Uruguay. EEMAC-FAGRO-UdelaR.

Esta herramienta es producto de una trayectoria de investigación con más de 10 años de datos generados en al menos 40 ensayos experimentales.

Hoffman, E.; Perdomo, C.; Ernst, O.; Bordoli, M.; Pastorini, M.; Pons, C.; Borghi, E. 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno de Uruguay. *Informaciones Agronómicas*, IPNI, 46:13-18.

Fassana, César Nicolás, Esteban Martín Hoffman, Andrés Berger, y Oswaldo Ernst. Nitrogen Nutrition Index at GS 3.3 Is an Effective Tool to Adjust Nitrogen Required to Reach Attainable Wheat Yield. *Agrociencia Uruguay* 26, n.o 2 (30 de agosto de 2022): e924. <https://doi.org/10.31285/AGRO.26.924>.

Justes, E., B. Mary, J. M. Meynard, J. M. Machet, and L. Thelier-Huche. "Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops." *Annals of Botany* 74, no. 4 (1994): 397–407. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133>.

Lemaire, G., Sinclair, T., Sadras, V., & Bélanger, G. (2019). Allometric approach to crop nutrition and implications for crop diagnosis and phenotyping. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0570-6>

Lemaire, G., Tang, L., Bélanger, G., Zhu, Y., & Jeuffroy, M. H. (2021). Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 125 (January). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126248>

Perdomo C, Hoffman E, Pons C., Pastorini M. 1999. Soil nitrate critical levels and nitrogen requirements for malting barley in Uruguay; ASA, CSSA, SSSA Annual Meetings; Salt Lake City, Utah, USA

Perdomo, C.H.; Bordoli, J. M. 1999. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo y su relación con el contenido de proteína en grano. Resúmenes de la primer jornada sobre rendimiento y calidad de trigo, Mercedes, Uruguay, p41-48



Foto: Andrés Berger

**Figura 5** - Experimentos de trigo en La Estanzuela.