

Manual del Cultivo del Trigo



Instituto Internacional de Nutrición de Plantas
Programa Latinoamérica Cono Sur
<http://lacs.ipni.net>

Manual del cultivo de trigo / Bernardette Abadia ... [et al.]; compilado por
Guillermo A. Divito; Fernando Oscar García; editado por Guillermo A. Divito; Fernando Oscar García. -
1a ed. compendiada. - Acassuso: International Plant Nutrition Institute, 2017.
224 p.; 28 x 19 cm.

ISBN 978-987-46277-3-5

1. Agricultura. 2. Cultivo Agrícola. 3. Manuales. I. Abadia, Bernardette II. Divito, Guillermo A., comp. III.
García, Fernando Oscar, comp. IV. Divito, Guillermo A., ed. V. García, Fernando Oscar, ed.
CDD 633

Este libro no podrá ser reproducido, ni total ni parcialmente, sin el previo permiso de los editores.

1ra edición Octubre 2017

Impreso en Argentina

ISBN 978-987-46277-3-5



Presentación

La creciente demanda global de alimentos, forrajes, fibras, biocombustibles y biomateriales genera desafíos, oportunidades y amenazas para los sistemas de producción agrícola. Esta demanda requiere de sistemas que provean productos en cantidad y calidad mejorando la vida de las personas y preservando el ambiente. El crecimiento en producción y productividad registrado en los últimos 50 años ha generado costos y externalidades negativas a nivel económico, social y ambiental. Así, el desafío para la humanidad es reducir el impacto de estos costos y externalidades y evitar que los mismos se amplifiquen y/o que se sumen nuevos a los ya existentes.

En este marco, la expansión de la agricultura hacia áreas aún no explotadas a través de la deforestación e incorporación de ecosistemas más frágiles constituye una severa amenaza a la sostenibilidad de los sistemas, por lo que, entre las alternativas propuestas, impulsar el crecimiento de la productividad en las tierras actualmente en uso ha sido considerada prioritaria. En Argentina, se han estimado brechas entre los rendimientos actuales y los alcanzables en secano del orden del 32%, 41% y 41% para soja, maíz y trigo, respectivamente (ver Capítulo 1 de esta publicación).

El cultivo de trigo ha sido una de las principales producciones agrícolas en los países del Cono Sur de Latinoamérica y actualmente incluye aproximadamente 6 millones de ha en Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay y Uruguay. Su importancia dentro de la economía de estas naciones, su relevante participación como proveedor de alimento para sus poblaciones y, desde el punto de vista agronómico, su rol en las rotaciones de cultivos anuales, han sido destacados y ampliamente discutidos en numerosas publicaciones.

Este manual trata de cubrir los temas más relevantes de la producción, industrialización y comercialización de trigo, con énfasis en los sistemas de la región triguera argentina. A través de catorce capítulos y una serie de anexos se revisan aspectos relacionados al crecimiento y la fenología; la ecofisiología y la generación de rendimiento; las nuevas variedades; la importancia del manejo del cultivo para calidad; la nutrición y las mejores prácticas de manejo de la fertilización; la identificación y manejo de malezas, enfermedades y plagas más relevantes; el manejo de cultivo en distintas regiones; la cosecha y el almacenamiento de granos; la molienda y la panificación; y el mercado actual.

Como editores queremos dejar expreso nuestro más sincero agradecimiento al trabajo, dedicación y paciencia que han demostrado los autores de los distintos capítulos. Estos destacados científicos y profesionales son referentes insoslayables en las distintas temáticas abordadas y es un honor contar con su contribución en este manual.

Guillermo A. Divito
Fernando O. García

EDITORES

Guillermo A. Divito

Ingeniero Agrónomo, Magister Scientiae y Doctor en Ciencias Agrarias. Actualmente se desempeña como asesor privado y Asistente Técnico de la Regional Necochea de Aapresid. Es especialista en manejo de cultivos agrícolas. Ha dirigido y asesorado tesis de grado y posgrado. Ha publicado trabajos en revistas científicas nacionales e internacionales con referato y de divulgación.

Fernando O. García

Ingeniero Agrónomo, Magister Scientiae y Ph.D. en Agronomía. Actualmente es Director Regional del International Plant Nutrition Institute (IPNI) Programa Cono Sur de Latinoamérica. Es especialista en fertilidad de suelos y nutrición de cultivos. Ha dirigido y asesorado tesis de grado y posgrado. Ha publicado numerosos trabajos en revistas científicas nacionales e internacionales con referato y de divulgación.

AUTORES

Bernadette Abadía

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
abadia.maria@inta.gov.ar

Pablo E. Abbate

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
abbate.pablo@inta.gov.ar

Cristian Álvarez

INTA Gral. Pico, La Pampa, Argentina.
alvarez.cristian@inta.gov.ar

Fernando Aramburu Merlos

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
aramburumerlos.f@inta.gov.ar

Mirian Barraco

INTA Gral. Villegas, Buenos Aires, Argentina.
barraco.miriam@inta.gov.ar

Ricardo Bartosik

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
bartosik.ricardo@inta.gov.ar

Javier Bujan

Kimei Cereales S.A. y Cámara Arbitral Bolsa de Cereales de Buenos Aires
bujan@kimei.com.ar

Leda E. Campaña

Molino Campodónico, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
laboratorio@molinocampodonico.com.ar

Miguel J. Cardoso

Molino Campodónico, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
laboratorio@molinocampodonico.com.ar

Leandro Cardoso

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
cardoso.marcelo@inta.gov.ar

Dora Carmona

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Buenos Aires, Argentina.
carmona.dora@inta.gov.ar

Marcelo Carmona

Facultad de Agronomía - UBA, Buenos Aires, Argentina
carmonam@agro.uba.ar

Pablo Calviño

Asesor y director técnico. Tandil, Buenos Aires, Argentina.
calvinopabloa@gmail.com

Adrián A. Correndo

Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Latinoamérica-Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

acorrendo@ipni.net

Diego de la Torre

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

delatorre.diego@inta.gob.ar

Guillermo A. Divito

Asesor Privado. AAPRESID, Asistente Técnico Regional Necochea. Buenos Aires, Argentina.

guillermodivito@yahoo.com.ar

Oswaldo Ernst

EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Paysandú, Uruguay.

oernst@fagro.edu.uy

Ariel Jesús Faberi

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-FCA UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

faberi.ariel@inta.gob.ar

Jorge A. Frascina

EEA INTA Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.

frascina.jorge@inta.gob.ar

Fernando O. García

Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Latinoamérica-Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

fgarcia@ipni.net

Lisardo González

Buck Semillas. La Dulce, Buenos Aires, Argentina.

lgonzalez@bucksemillas.com.ar

Esteban Hoffman

EEMAC, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Paysandú, Uruguay.

tato@fagro.edu.uy

María I. Leaden

Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

mileaden@hotmail.com

Gisele Maciel

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

maciel.gisel@inta.gob.ar

Pablo Manetti

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

manetti.pablo@inta.gob.ar

Juan Pablo Monzon

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

monzon.juanpablo@inta.gob.ar

Carla Salvio

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

salvio.carla@inta.gob.ar

Francisco Sautua

Facultad de Agronomía - UBA, Buenos Aires, Argentina

sautuaensayo@gmail.com

Santiago Néstor Tourn

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

tourn.santiago@inta.gob.ar

María Celia Tulli

Unidad Integrada Balcarce. EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

tulli.maria@inta.gob.ar

Índice	Pág.
1. El trigo, su difusión, importancia como alimento y consumo _____	7
Pablo E. Abbate, Miguel J. Cardos y Leda E. Campaña	
Brechas de rendimiento de trigo en Argentina _____	20
Fernando Aramburu Merlos y Juan Pablo Monzon	
2. Como crece y se desarrolla el cultivo de trigo _____	22
Pablo E. Abbate y Guillermo A. Divito	
3. Ecofisiología y manejo del cultivo de trigo _____	33
Pablo E. Abbate	
4. Cambios recientes y venideros en las variedades de mayor difusión en Argentina ____	53
Lisardo González	
5. ¿Por qué es importante la calidad del trigo? _____	57
Jorge A. Fraschina	
6. La nutrición del cultivo de trigo _____	67
Guillermo A. Divito, Adrián A. Correndo y Fernando O. García	
7. Identificación y manejo de malezas _____	85
María I. Leaden	
8. Criterios para el manejo integrado de las enfermedades _____	93
Marcelo Carmona y Francisco Sautua	
9. Caracterización y manejo de plagas animales _____	109
Dora Carmona, Pablo Manetti, María C. Tulli, Carla Salvio y Ariel J. Faberi	
10. Manejo del cultivo de trigo en distintas regiones _____	123
10.a Región Pampeana Central	
Jorge A. Fraschina	
10.b Región Sudeste de Buenos Aires	
Pablo Calviño y Guillermo A. Divito	
10.c Noroeste de Buenos Aires y Este de La Pampa	
Cristian Álvarez y Mirian Barraco	
10.d Uruguay	
Esteban Hoffman y Oswaldo Ernst	
11. Eficiencia en la cosecha de trigo _____	143
Santiago N. Tourn	
12. Almacenamiento y acondicionamiento de trigo _____	152
Ricardo Bartosik, Bernadette Abadía, Leandro Cardoso, Diego de la Torre y Gisele Maciel	
13. Calidad, molienda y panificación de trigos _____	172
Miguel J. Cardos, Leda E. Campaña y Pablo E. Abbate	
14. ¿Y tranqueras afuera? Consideraciones para la comercialización _____	194
Javier Bujan	
Anexos _____	198

Capítulo VI: La nutrición del cultivo de trigo

Guillermo A. Divito¹, Adrián A. Correndo², y Fernando O. García²

¹Asesor Privado. AAPRESID, Asistente Técnico Regional Necochea. Buenos Aires, Argentina.

²Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI), Latinoamérica-Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Importancia de la nutrición mineral para el rendimiento del cultivo

Como se desarrolló en el **Capítulo 3**, el número de granos por unidad de superficie es la variable que mayormente explica el rendimiento del trigo, y es el resultado de la tasa de crecimiento del cultivo alrededor de floración (período crítico). Para que dicha tasa sea máxima, se requiere que las hojas intercepten más del 90-95% de la radiación y que la conviertan en biomasa con la mayor eficiencia posible. Para que estos objetivos puedan ser alcanzados se requiere de una adecuada disponibilidad de nutrientes. Por otra parte, la deficiencia de nutrientes también puede reducir el rendimiento al acortar el período crítico, reducir la partición de biomasa hacia estructuras reproductivas o disminuir la fotosíntesis durante el llenado de granos. En general, el cultivo puede tolerar deficiencias nutricionales tempranas sin que se resienta el rendimiento, siempre que éstas se reviertan antes del período crítico. Cada nutriente cumple funciones específicas en el metabolismo de las plantas. Brevemente, se destaca que el nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) son constituyentes esenciales de moléculas orgánicas. El potasio (K), siempre como ión, es osmoregulador y, al igual que el magnesio (Mg), es activador enzimático. El calcio (Ca) cumple funciones primordialmente estructurales como estabilizador de membranas celulares. Los micronutrientes, por su parte, son constituyentes esenciales de varias enzimas. El rol específico de cada nutriente escapa a los objetivos de la presente publicación y puede ser consultado en Echeverría y García (2015). En el **Anexo IV** se presentan fotos de deficiencia de distintos nutrientes en trigo.

Requerimientos de nutrientes

En la **Tabla 1** se detalla la cantidad de nutrientes que el cultivo de trigo requiere para producir 1 tonelada de grano, la proporción de lo absorbido que particiona a granos (índice de cosecha) y la extracción en dichos órganos.

Además de los requerimientos totales, es importante conocer la dinámica de absorción durante el ciclo del cultivo. El trigo, al igual que otros cultivos, se caracteriza por un adelantamiento de la absorción de los nutrientes respecto a la materia seca. De este modo, mientras que hasta antesis acumula cerca del 40-45% de la biomasa aérea total, la acumulación de N a floración representa el 70-75% del total a madurez fisiológica. En el caso del P, el cultivo absorbe hasta antesis entre el 75-85% del total acumulado a madurez. Para S, la acumulación pre-antesis representa alrededor del 50-60% del total de S total.

Tabla 1. Requerimientos nutricionales (kg de nutrientes en planta para producir una tonelada de grano expresada a humedad comercial (14%) y extracción (kg de nutrientes en una tonelada de grano). El índice de cosecha representa la proporción del total del nutriente absorbido por la planta que es destinado al grano.

Nutriente	Necesidad	Índice de Cosecha	Extracción
	-- kg t grano ⁻¹ --		-- kg t grano ⁻¹ --
N	25.8	0.66	17.0
P	3.9	0.75	2.9
K	16.3	0.17	2.8
Ca	2.6	0.14	0.4
Mg	2.6	0.50	1.3
S	3.4	0.35	1.2
	-- g t grano ⁻¹ --		-- g t grano ⁻¹ --
B	21.5		
Cu	8.6	0.75	6.5
Fe	117.8	0.99	116.6
Mn	60.2	0.17	10.2
Zn	44.7	0.44	19.7

Los requerimientos nutricionales surgen de valores promedio, y existen variaciones según la disponibilidad del nutriente, rendimiento e interacción con otros factores. Para conocer la exportación real de un lote hay que medir la concentración en el grano correspondiente al mismo.

Mejores prácticas de manejo de la nutrición del cultivo de trigo

La aplicación de las *mejores prácticas de manejo (MPM)* de la nutrición permite ordenar y jerarquizar las prácticas involucradas en la fertilización del cultivo. El concepto central del *Manejo Responsable de Nutrientes* es realizar, para cada situación específica, un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de cuatro “requisitos” (**4Rs**) básicos: la “fuente” correcta de nutrientes, en la “dosis” correcta, en el “momento” correcto, y en la “ubicación” correcta (**Figura 1**). Existen principios científicos que guían el desarrollo de las prácticas que determinan fuente, dosis, momento y forma correctos. Algunos ejemplos de los principios y prácticas claves se muestran en la **Tabla 2**. Globalmente, los principios son los mismos, pero la forma en que se ponen en práctica a nivel local varía en función de las condiciones de suelo, cultivo, clima, tiempo, económicas y sociales. Los agricultores y los asesores de cultivos deberán asegurarse de que las prácticas que se seleccionan y aplican a nivel local, estén de acuerdo con estos principios.



Figura 1. Esquema conceptual del Manejo de Nutrientes 4Rs considerando las dimensiones ambiental, económica y social. Adaptado de IPNI (2013).

Tabla 2. Ejemplos de principios científicos y prácticas asociadas al manejo de nutrientes en trigo. Adaptado de IPNI (2013).

Los Cuatro Requisitos (4Rs)				
	Fuente	Dosis	Momento	Forma
Principios Científicos	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar una oferta balanceada de nutrientes - Adaptarse a las propiedades del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar la oferta de nutrientes de todas las fuentes - Evaluar la demanda del cultivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluar las dinámicas de absorción del cultivo y de abastecimiento del suelo - Determinar momentos de riesgo de pérdidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconocer los patrones de distribución de raíces - Manejar la variabilidad espacial
Elección de Prácticas	<ul style="list-style-type: none"> - Arrancador - Mezcla física - Mezcla química - Fertilizante líquido - Fertilizante foliar (bajo biuret) 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de suelo - Análisis de planta - Requerimientos y extracción del cultivo - Cálculos económicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Previo a la siembra - A la siembra - En macollaje - En hoja bandera - En floración - En llenado 	<ul style="list-style-type: none"> - Al voleo - En bandas, chorrado, inyectado - Aplicación en dosis variable

En general, la mayoría de los métodos de diagnóstico de fertilidad se basan en el análisis de muestras de suelo, por lo que se incluye una guía detallada para el muestreo de suelo y acondicionamiento de las muestras en el **Anexo** del presente Manual.

Nitrógeno

-Dosis de N

La dosis correcta de N surge a partir del diagnóstico de la oferta del suelo y de la demanda del cultivo. Los modelos más usados son los denominados “empíricos”, que se basan en la asociación entre la disponibilidad de N en el suelo y el rendimiento de los cultivos. Los balances simplificados de N y los modelos de simulación también se emplean con frecuencia. Además, los métodos ópticos como el clorofilómetro (un tipo de sensor local) o sensores remotos, son alternativas para el monitoreo del estatus nitrogenado durante el ciclo del cultivo. A continuación, se discuten brevemente las principales alternativas de diagnóstico que ayudan a determinar la dosis de N en el cultivo de trigo.

• Modelos empíricos basados en la disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo

Esta metodología se basa en el análisis de información experimental sobre la respuesta del rendimiento del cultivo ante un gradiente de disponibilidad de N en el suelo en forma de nitrato ($N-NO_3^-$) sumado al N aportado por el fertilizante. Como se observa en la representación teórica de la Figura 2, la relación entre ambas variables depende de varios factores que se analizarán a continuación, lo que resulta en modelos diferentes según la región.

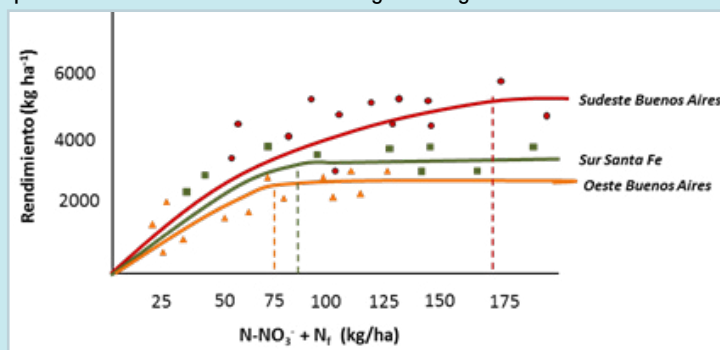


Figura 2. Representación teórica del rendimiento del trigo en función de la disponibilidad de N en el suelo ($N-NO_3^- + N$ del fertilizante, $kg\ ha^{-1}$) para el sudeste de Buenos Aires, el sur de Santa Fe y el oeste de Buenos Aires. Las líneas punteadas indican el umbral crítico de N en el suelo donde el rendimiento es máximo.

La recomendación de fertilización nitrogenada con este método se realiza estimando la cantidad de N a aplicar como la diferencia entre el umbral crítico y la disponibilidad en el suelo de N como nitrato a la siembra (Ec. 1):

$$N_f = UC - N_s \quad \text{Ec.1}$$

donde N_f es la cantidad de N a aplicar como fertilizante, **UC** es el umbral crítico de N disponible a la siembra para maximizar el rendimiento ($kg\ ha^{-1}$) y N_s es la cantidad de $N-NO_3^-$ ($kg\ ha^{-1}$) en el suelo. En general, las determinaciones de N_s se realizan en el estrato 0-60 cm de profundidad. Como se indicó, existen diferencias en los **UC** de los modelos propuestos para la Región Pampeana. Entre las principales causas se destacan:

- Rendimiento objetivo

En la medida que el rendimiento objetivo del cultivo aumenta, también lo hacen los requerimientos de N (Tabla 2). Esto genera que el **UC** también sea mayor. Esto se evidencia al analizar la evolución de los UC propuestos para el sudeste de la provincia de Buenos Aires, que a comienzos de la década de 1990 eran de $125\ kg\ N\ ha^{-1}$ para rendimientos de $3500-4000\ kg\ ha^{-1}$ (González Montaner et al., 1991) y luego fueron actualizados a $175\ kg\ N\ ha^{-1}$ para niveles de rendimiento superiores a $5000\ kg\ ha^{-1}$ (Echeverría et al., 2001; González Montaner et al., 2003).

- Región

Las características del suelo y clima de la región condicionan el **UC** de dos formas: i) definen la demanda de N del cultivo a partir del rendimiento que éste puede alcanzar y ii) establecen la oferta de N del suelo modulando los procesos que intervienen en el ciclo del nutriente (ej. aporte de N por mineralización, pérdidas por lavado de NO_3^- , etc.).

- Cultivares

Los cambios en los cultivares de mayor difusión han generado variaciones en los **UC**. Por ejemplo, las variedades de genética francesa presentan un menor **UC** respecto variedades tradicionales aun cuando los rendimientos alcanzados son mayores. Dicho comportamiento sería explicado por la mayor eficiencia de uso de N ($kg\ grano\ kg\ N^{-1}$), que se logra, en parte, mediante disminuciones en el contenido proteína en grano (ver Capítulo 3).

- Momento de muestreo

En general, los umbrales propuestos para las distintas zonas de la región pampeana argentina se basan en la determinación de $N-NO_3^-$ en muestras tomadas alrededor de la siembra. Sin embargo, trabajos realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, indican una mejor performance de los modelos que contemplan el muestreo en inicio de macollaje (Z21), debido a que reducen las variaciones atribuidas a pérdidas de NO_3^- por lavado. Así, los **UC** propuestos para dicho estadio son inferiores a los determinados con muestreo a la siembra del cultivo.

Tabla 2. Umbrales críticos de N disponible a la siembra ($N-NO_3^-$ en 0-60 cm de profundidad + N fertilizante) para distintas zonas de la región pampeana argentina y distintos niveles de rendimiento objetivo.

Zona	Umbral crítico	Rendimiento Objetivo	Fuente
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Sur de Santa Fe y Córdoba	130-140	4500-5000	García et al., 2010.
Centro-Sur de Santa Fe	70	2500	González Montaner (com. pers.)
Norte de Buenos Aires	100-140	3500-4000	Satorre (com. pers.)
Oeste de Buenos Aires	90	3000	González Montaner (com. pers.)
Sudeste de Buenos Aires	175	5000-5500	González Montaner et al., 2003.
Sudeste de Buenos Aires	170 (siembra) y 134 (macollaje)	> 5000	Barbieri et al., 2009.

La dosis de N definida por los modelos empíricos no contempla el contenido de proteína de los granos ni el óptimo económico

El **UC** de los modelos empíricos se define considerando la disponibilidad de N que maximiza el rendimiento. No contempla la relación entre el precio del N y el precio del trigo. En este sentido, a partir de la relación entre el rendimiento del cultivo y el N disponible en el suelo ($N_s + N_f$) (**Figura 3A**) es posible calcular la eficiencia agronómica de uso del N, que indica el rendimiento por unidad de N. Como se observa en la **Figura 3B**, dicha eficiencia decrece ante aumentos en el N disponible, siendo el óptimo económico el punto en el cuál dicha eficiencia iguala a la relación de precios entre el N del fertilizante y el trigo.

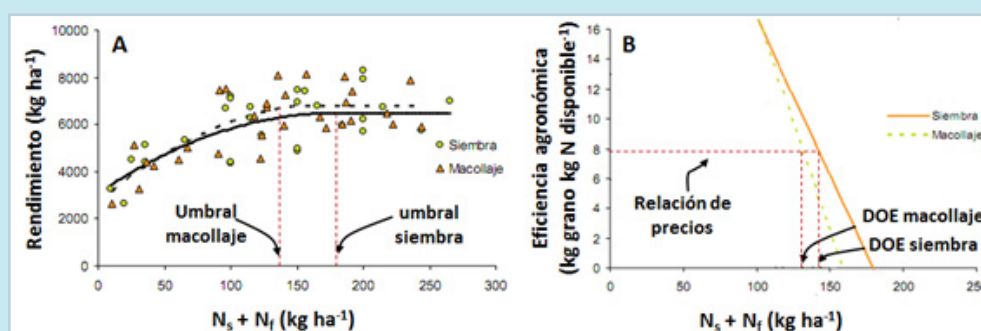


Figura 3. (A) Relación entre el rendimiento del cultivo y el N en el suelo (N_s) más el N del fertilizante (N_f). Muestreo a la siembra (línea lлена) y al macollaje (línea punteada) en el sudeste de Buenos Aires. **(B)** Relación entre la eficiencia agronómica de uso de N ($kg\ grano\ kg\ N\ disponible^{-1}$) y el N en el suelo (N_s) más el N del fertilizante (N_f) a la siembra (línea lлена) y al macollaje (línea punteada). La línea punteada horizontal indica la relación de precios $kg\ de\ N\ kg\ de\ trigo^{-1}$ (7.9 $kg\ kg^{-1}$) promedio desde el año 2000 a 2014 (Correndo et al., 2015). DOE indica la dosis óptima económica de N. Adaptado de Barbieri et al. (2009).

Estimación del aporte de N por mineralización

El aporte de N a partir de la mineralización de la materia orgánica del suelo constituye una de las fuentes principales del nutriente para el cultivo. Existe una amplia variación en el contenido de materia orgánica entre suelos de distintas regiones 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. Así, su incorporación a los modelos empíricos permite un mejor ajuste de las dosis de N a aplicar. A modo de ejemplo, la incorporación 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 de la misma en ambientes de alto potencial (ej. lotes que han tenido pasturas recientemente).

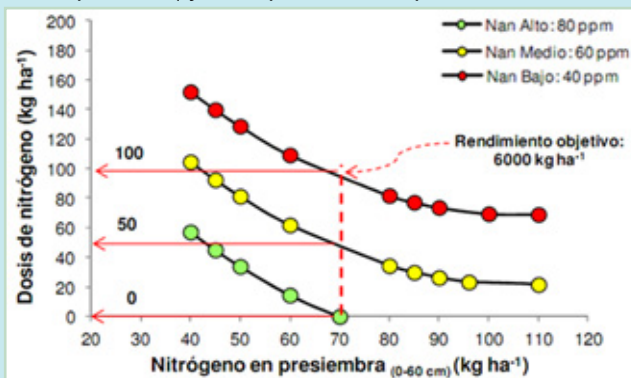


Figura 4. Dosis de N a aplicar para lograr un rendimiento de 6000 kg ha⁻¹, en función del N disponible en presembradura y para distintos valores de N anaeróbico (Nan). Datos del sudeste de Buenos Aires. Fuente: Reussi Calvo et al., (2015)

• Balances de N

Los balances de N permiten estimar los requerimientos de fertilización a partir de la diferencia entre la demanda del cultivo y la oferta de N del suelo. La demanda (N_c) se define de acuerdo al rendimiento esperado ($t\ ha^{-1}$) y al N requerido por unidad de rendimiento ($kg\ N\ t\ de\ grano^{-1}$), mientras que la oferta se establece determinando el N acumulado al momento de la siembra (N_s) y el que se mineralizará durante el ciclo del cultivo (N_m). Así, las necesidades de N del fertilizante (N_f) se calculan a partir de la **Ec. 2**:

$$N_f = [N_c - (N_s/E_s) - (N_m/E_m)] / E_f \quad \text{Ec. 2}$$

Donde E_s , E_m y E_f son las eficiencias de uso del N_s , N_m y N_f , respectivamente.

En general, el empleo del balance de N demanda que el usuario defina el rendimiento objetivo, determine la cantidad de N a la siembra (N_s) mediante muestreo de suelo y establezca, dentro de un rango, los valores para las eficiencias de uso de N. El N_s contempla, en general, la cantidad de $N-NO_3^-$ en el estrato 0-60 cm del suelo. Comúnmente, el valor de N_m se obtiene experimentalmente a partir de incubaciones de suelo en laboratorio o a partir del N absorbido por cultivos no fertilizados. Por su parte, las eficiencias de uso del N han sido estimadas entre 0.4-0.6 para E_s , entre 0.7-0.9 para E_m y entre 0.5-0.6 para E_f . Así, surge que para dichas variables, el usuario del modelo deberá seleccionar valores dentro de estos rangos de acuerdo a las condiciones de suelo y clima de la región y a las prácticas agronómicas. A modo de ejemplo, la eficiencia de uso del N del fertilizante será mayor si

se realizan aplicaciones fraccionadas de fertilizante durante el ciclo del cultivo en lugar de una única en estadios iniciales.

La metodología de balances de N requiere estimaciones locales de varios de los componentes de la ecuación. Aunque se cuente con las mismas, dichos componentes contribuyen a la variación total del modelo, lo que limita notablemente su performance.

• **Modelos de simulación agronómica**

Los modelos de simulación agronómica permiten diagnosticar el estatus nitrogenado del cultivo integrando características del ambiente y de manejo del cultivo. En Argentina, el software Triguero (Satorre et al., 2005) es el de mayor difusión, está desarrollado sobre la base de resultados generados con modelos de simulación agronómicos, en una gran variabilidad de escenarios edafoclimáticos y de manejo, para cuantificar respuestas productivas y económicas.

El usuario puede optar por distintos “escenarios” incluyendo opciones de a) cultivar, b) serie de suelo, c) disponibilidad de agua a la siembra y d) serie climática. A partir de los resultados de las simulaciones, se pueden estimar las necesidades de fertilización. Más información sobre Triguero está disponible en <http://www.aacrea.org.ar/index.php/software/123-triguero>.

Modelos más complejos, como el DDSAT, permiten simular el crecimiento y rendimiento del cultivo ante cambios en un mayor número de variables, por ejemplo, el fraccionamiento de dosis de N. Sin embargo, dichos modelos requieren de un mayor entrenamiento para su uso.

• **Métodos ópticos: clorofilómetro y sensores remotos**

Los sensores ópticos constituyen una alternativa práctica y sencilla para el monitoreo del status de N del cultivo. Entre ellos, el Minolta SPAD 502® es uno de los más empleados y permite dicho monitoreo a partir de la determinación de la intensidad del color verde de la hoja (**índice de verdor, IV**). Esta asociación se basa en que el N es uno de los principales constituyentes de la clorofila, pigmento responsable de esta coloración.

Por otra parte, existen numerosos sensores remotos capaces de determinar varios índices a partir de 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 el cultivar, el estado de desarrollo, la incidencia de plagas, enfermedades etc. Por ello, es necesario establecer en el lote a monitorear áreas de referencia con suficiencia de N a fin de relativizar las mediciones según la **Ec.3**:

$$ISN = IV_{\text{lote}} / IV_{\text{ref}} \quad \text{ó} \quad NDVI_r = NDVI_{\text{lote}} / NDVI_{\text{ref}} \quad \text{Ec.3}$$

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

En general, ambos índices se emplean para determinar la necesidad de hacer fertilizaciones complementarias de N. Para una red de 7 experimentos en las áreas de influencia de las Estaciones Experimentales de INTA Pergamino, 9 de Julio, Oliveros, Balcarce y Rafaela, el índice de verdor determinado con SPAD a comienzos de la elongación de tallos anticipó la respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada en forma precisa (**Figura 5**, Ferrari et al., 2010).

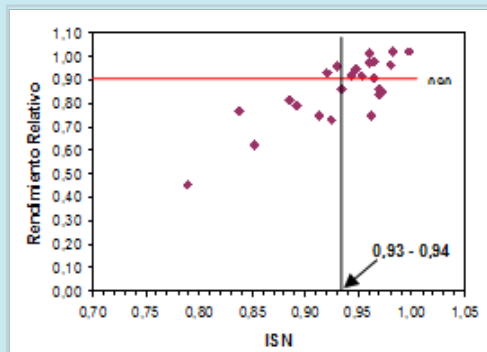


Figura 5. Relación entre el rendimiento relativo de trigo y el Índice de Suficiencia de Nitrógeno –ISN-. Fuente: Ferrari et al. (2010).

El diagnóstico del estatus nitrogenado mediante el uso del IV o NDVI requiere del establecimiento de franjas de suficiencia de N en el lote.

- Fuente de N

En general, las fuentes de N disponibles en Argentina (ver **Anexo**) no presentan diferencias en la eficiencia de uso del N cuando se aplican en estadios iniciales del cultivo, debido a que están rápidamente disponibles para su absorción y manifiestan similar susceptibilidad a sufrir pérdidas del sistema. En este sentido, el principal mecanismo de pérdidas del nutriente durante el ciclo del cultivo es el lavado de nitrato, ante el cual las distintas fuentes se comportan de manera similar. Por el contrario, las fuentes difieren respecto de la susceptibilidad a pérdidas por volatilización de amoníaco, aunque en la región triguera argentina, estas pérdidas no son muy relevantes (<10% de lo aplicado) debido a las bajas temperaturas y, según las zonas, la falta de humedad en el suelo.

Como se discutirá en el apartado de proteína en grano, las aplicaciones que tienen como objetivo el follaje deben contemplar fuentes que no causen daño por toxicidad.

- Momento de aplicación de N

De modo general, la mayor eficiencia de uso del N aplicado se logra cuando la oferta coincide con la demanda del cultivo. Sin embargo, diversos factores (climáticos, operativos, etc.) condicionan el momento de fertilización. En este sentido, en la mayor parte de las regiones trigueras, la ocurrencia de precipitaciones durante estadios iniciales del cultivo determina el momento de aplicación de N por dos motivos: i) la deficiencia hídrica limita la incorporación del nutriente al suelo y ii) los excesos hídricos incrementan la probabilidad de que ocurran pérdidas, principalmente por lavado. La primera situación es frecuente en gran parte de la región triguera argentina, especialmente hacia el oeste y norte, por lo que las aplicaciones a la siembra han resultado en una eficiencia de uso del N igual o mayor que la de las aplicaciones al macollaje. Por el contrario, en el sudeste de Buenos Aires (subregión IVS), las aplicaciones diferidas al macollaje han resultado en una mayor.

Las aplicaciones divididas constituyen un caso particular. Estas son más frecuentes cuando se utilizan dosis elevadas de N, para cultivos de altos rendimientos, en particular para siembras tempranas. Así, cuando el objetivo es incrementar el rendimiento, es posible fraccionar la dosis entre siembra y fin de macollaje. Como se discutirá luego, si se pretende aumentar el rendimiento y mejorar el contenido de proteína en grano se deberán realizar aplicaciones tempranas de base y complementar luego entre hoja bandera (Z39) y post-floración (Z60).

- Forma de aplicación de N

Como se indica en el **Anexo** “Ubicación de fertilizantes junto con la semilla”, las fuentes sólidas amoniacales generan problemas de fitotoxicidad a semillas y plántulas. Por ello deben evitarse las aplicaciones de dosis elevadas de dichas fuentes en la línea de siembra. En estos casos, la práctica más común es al voleo, en cobertura total. Por su parte, las fuentes líquidas que contiene UAN se aplican, en general, chorreadas a fin de evitar quemado del follaje.

- Disponibilidad de N y contenido de proteína en grano

Como se detalló en el **Capítulo 5**, el contenido de proteína en grano es uno de los principales indicadores de calidad del trigo. El mismo está afectado por la disponibilidad de N en el suelo, aunque lo hace de un modo complejo (**Figura 6**). Así, cuando la disponibilidad de N es baja, el agregado incrementa principalmente el rendimiento y no afecta el nivel de proteína o provoca disminuciones debido a un “efecto dilución” (Fase I). Cuando la disponibilidad del nutriente aumenta, aumentan simultáneamente rendimiento y proteína (Fase II); y finalmente, con alta disponibilidad de N, el rendimiento alcanza un plateau, mientras que la concentración de proteína continúa aumentando hasta estabilizarse (Fase III).

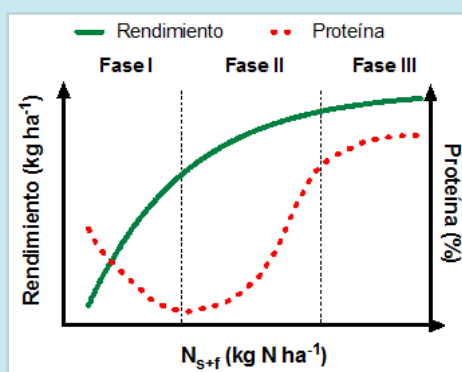


Figura 6. Rendimiento y proteína en grano en función de la cantidad de N disponible en el suelo (s) más el fertilizante (f). Adaptado de Stone y Savin (1999).

El cambio en el rendimiento y proteína ante distinta oferta de N afecta los requerimientos del cultivo (**Tabla 3**). Note que para un rendimiento de entre 4 y 6 t ha⁻¹ y 11% de proteína (valor de referencia para la comercialización), el cultivo requiere absorber entre 25 y 26 kg N t⁻¹ de grano, un valor similar al presentado en la **Tabla 1**. Se destaca también que el requerimiento aumenta con el nivel de rendimiento, pero lo hace mucho más al cambiar el nivel de proteína. De este modo, independientemente del rendimiento, el requerimiento de N supera los 25 kg N t⁻¹ si se pretende lograr un contenido de proteína superior a 11%.

Tabla 3. Requerimientos de N (kg de N en planta para producir una tonelada de grano) para distintos valores de rendimiento y proteína en grano. Adaptado de Abbate y Andrade (2015).

Rendimiento (t ha ⁻¹)	Proteína (%)				
	9	10	11	12	13
3	19	21	24	27	29
4	20	22	25	27	30
5	20	23	25	28	30
6	21	23	26	28	31
7	21	24	26	29	31

Según lo descripto, la fertilización nitrogenada de base (a la siembra o al macollaje) debe ser elevada si se pretende incrementar simultáneamente el rendimiento y el contenido de proteína. Esto conlleva, necesariamente, a una menor eficiencia de uso del nutriente debido al mayor riesgo de pérdidas. Una alternativa más eficiente consiste en efectuar aplicaciones fraccionadas de N hasta estados avanzados de desarrollo. En el sudeste bonaerense, las aplicaciones de fuentes sólidas hasta hoja bandera resultaron efectivas, aunque, en aplicaciones posteriores (hasta post-antesis), las fuentes líquidas presentan mejor performance.

En las aplicaciones de fuentes líquidas en estadios avanzados, la mayor parte del N se absorbe directamente desde la biomasa aérea. En este caso, se deben aplicar fuentes que no causen fitotoxicidad. Las formulaciones de urea (20% N) con bajo contenido de biuret (<0,25%) son las más empleadas. No debe excederse la dosis de 30 kg N ha⁻¹.

Como se indicó anteriormente, el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 y los sensores remotos que determinan el NDVI, permiten la estimación rápida y sencilla del estatus nitrogenado del cultivo en estadios avanzados, y resultan útiles para diagnosticar las necesidades de N para corregir el contenido de proteína (**Figura 7**)

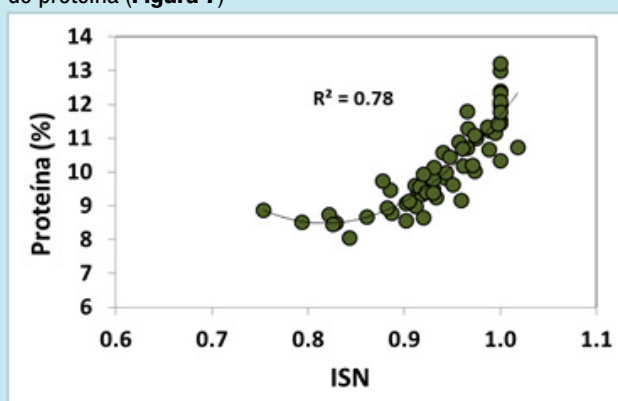


Figura 7. Proteína en grano en función del índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) determinado con un clorofilómetro. Fuente: Reussi Calvo et al. (2014).

Fósforo

- Dosis de P

Los métodos de diagnóstico de la fertilidad fosfatada para los cultivos se basan en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial (0-20 cm). En la región pampeana argentina y Uruguay, el análisis recomendado y calibrado es el P extractable Bray-1. La experimentación agronómica relacionó el rendimiento del cultivo con el nivel de P Bray-1 y ha permitido establecer umbrales críticos por debajo de los cuáles los cultivos manifiestan alta probabilidad de respuesta a la fertilización.

Para la región pampeana argentina, se observan relaciones significativas entre diferentes variables asociadas al rendimiento de trigo y el nivel de P Bray-1. Por un lado, bajo un criterio productivo de lograr el 90% del rendimiento relativo (sin limitaciones de P), el rango crítico resulta entre 15.2 y 19.6 mg kg⁻¹ (**Figura 8A**). Por otro lado, bajo un criterio económico de decisión, para relaciones de precios entre 16 y 25 kg de trigo por kg de P (variación normal histórica), los niveles críticos por debajo de los cuales existe una alta probabilidad de respuesta rentable a la aplicación de fertilizantes fosfatados, se ubican entre 12 y 18 mg kg⁻¹ (**Figura 8B**).

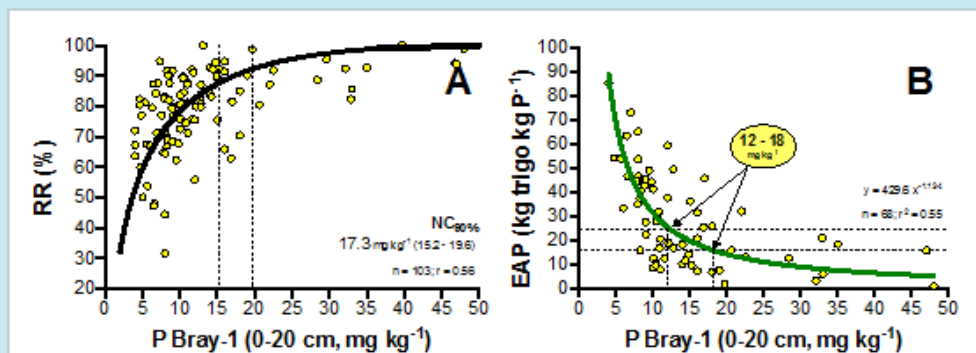


Figura 8. Estimación de nivel crítico de P extractable Bray-1 utilizando rendimiento relativo (RR, A) y eficiencia agronómica de la respuesta a P (EAP, B). En A, la franja vertical gris indica el intervalo de confianza (95%) para el nivel crítico estimado según el método ALCC modificado (Correndo et al., 2016). En B, la franja horizontal verde indica el percentil central (P25-P75) de la relación histórica de precios de P en trigo (16 a 25 kg trigo kg P⁻¹). Datos correspondientes a 103 ensayos de fertilización fosfatada en la región pampeana (1998-2014) de distintos autores. Fuente: Correndo y García (inédito).

La profundidad de muestreo y los niveles críticos de P-Bray son iguales en siembra directa y labranza convencional

De este modo, la dosis recomendada P depende del nivel de P Bray, del rendimiento esperado (asociado a la reposición del nutriente que extraerá el cultivo), de la relación de precios entre el trigo y el fertilizante y del criterio de manejo del nivel P del suelo. Respecto a esto último, existen dos criterios básicos: el de **suficiencia** y el de **reconstrucción y mantenimiento**. El criterio de suficiencia pretende satisfacer los requerimientos del cultivo, mientras que el de reconstrucción y mantenimiento implica establecer un nivel deseado de P en el suelo, generalmente considerado a partir del nivel necesario para obtener un rendimiento objetivo. Si se parte desde un análisis de suelo menor al objetivo se debe “reconstruir” el nivel de P extractable, para luego “mantenerlo” mediante la reposición del P que se exporta en grano. Resulta evidente que pueden plantearse alternativas intermedias a estas dos líneas, dependiendo de la concentración de P en el suelo y del esquema productivo (lote propio o arrendado, situación financiera de la empresa, etc.)

Para “reconstruir” el nivel de P Bray del suelo en 1 mg kg⁻¹ se deben aplicar entre 2 y 5 kg de P por encima de la exportación del cultivo, dependiendo del tipo de suelo. Este valor es variable, lo que exige un monitoreo mediante análisis de suelo.

A modo de ejemplo, la **Tabla 4** muestra la recomendación de fertilización fosfatada para trigo en el sudeste bonaerense, de acuerdo al nivel de P Bray-1 y el rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998). Estas recomendaciones, generadas a partir de los resultados de los ensayos realizados en el área, se basan en el criterio de suficiencia e incluyen, en forma parcial, el criterio de reconstrucción para los niveles muy bajos de P extractable, y de mantenimiento para niveles superiores a los 16 mg kg⁻¹.

Tabla 4. Recomendaciones de fertilización fosfatada para trigo según el nivel de P Bray del suelo y el rendimiento esperado del cultivo (Echeverría y García, 1998).

Rendimiento	Concentración de P disponible en el suelo (mg kg ⁻¹)						
	< 5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-16	16-20
kg ha ⁻¹	----- kg P ha ⁻¹ -----						
2000	20	15	13	11	9	7	0
3000	23	19	17	15	13	11	0
4000	27	22	21	18	17	14	10
5000	31	26	24	22	20	18	14
6000	34	30	28	26	24	22	17
7000	38	33	31	29	28	26	21

- Fuente de P

Varios trabajos realizados en la región coinciden que no existen diferencias en la eficiencia de uso de P entre las fuentes más utilizadas (ver **Anexo**), siempre que se igualen las dosis de los demás nutrientes que componen el fertilizante. Esto obedece a que las mismas presentan similar solubilidad. La roca fosfórica es la excepción, debido a que es menos soluble, por lo que debe ser aplicada con anticipación a la siembra del cultivo. Actualmente, se dispone en el mercado de mezclas químicas y físicas que incluyen también S y otros nutrientes junto al P.

El contenido de P de los fertilizantes puede expresarse en términos de grado equivalente (como P₂O₅), aunque debe expresarse como grado (P elemento). La conversión es la siguiente:

$$\begin{aligned} \% P &= \% P_2O_5 * 0.43 \\ \% P_2O_5 &= \% P * 2.29 \end{aligned}$$

- Forma y momento de aplicación de P

El P es un nutriente de baja movilidad en el suelo, por lo que las aplicaciones localizadas realizadas junto a la siembra tienden a presentar una mayor eficiencia de uso que aplicaciones en cobertura (“al voleo”). Esta diferencia entre formas de aplicación se incrementa en suelos muy deficientes de P (P Bray-1 < 10 mg kg⁻¹) o suelos que presentan alta capacidad de fijación del nutriente (poco comunes en las regiones trigueras de Argentina). Por el contrario, las aplicaciones “al voleo” alcanzan eficiencias de uso de P similares a las aplicaciones en bandas, cuando las mismas se realizan bajo sistema de siembra directa estabilizados y con anticipación a la siembra del cultivo. Esto puede ser atribuido a que, bajo siembra directa, hay un incremento de la actividad de las raíces y microorganismos en los primeros centímetros de suelo que favorece la disponibilidad del nutriente. Además, la eficiencia de la aplicación al voleo tiende a ser similar a la localizada cuando la dosis de P es mayor a 20-25 kg P ha⁻¹, cuando las lluvias post-aplicación son mayores a 50 mm y cuando la cobertura del suelo por residuos de cultivos no es excesiva.

Azufre

El aporte de S al cultivo depende de los procesos de mineralización-inmovilización del nutriente en el suelo, debido a que más del 95% se encuentra en formas orgánicas. Por ello, las deficiencias de S se observan con mayor frecuencia en suelos de textura gruesa, con bajo contenido original de materia orgánica o donde dicho nivel ha disminuido por un prolongado uso agrícola. Información surgida de redes de ensayos realizadas en trigo en la Región Pampeana indica una alta frecuencia y magnitud de

respuesta en el sur y centro de Santa Fe y en el centro-oeste y norte de Buenos Aires. En el sudeste de Buenos Aires, la respuesta es menos frecuente, aunque se ha observado un aumento en los últimos años, especialmente en lotes con más de 8-10 años de agricultura.

Suelos de textura gruesa, bajo siembra directa, con bajo contenido de materia orgánica y/o prolongada historia agrícola son los escenarios de mayor probabilidad de respuesta a la fertilización con S

- Dosis de S

• Indicadores de Suelo

La determinación del contenido de S como sulfato ($S-SO_4^{-2}$) en muestras de suelo (0 a 20 ó 0 a 60 cm) tomadas a la siembra del cultivo es la metodología más difundida para evaluar la disponibilidad del nutriente. Considerando una profundidad de muestreo de 0-20 cm, se determinó un rango crítico de $S-SO_4^{-2}$ de entre 6.2 y 8.0 $mg\ kg^{-1}$ para 43 experimentos realizados en la región pampeana entre 2000 y 2015 (Figura 9). Para una red de 30 ensayos realizada en la región pampeana se ha sugerido un umbral de 36 $kg\ de\ S-SO_4^{-2}$ por hectárea para determinaciones realizadas en el estrato 0-60 cm (Echeverría et al., 2011).

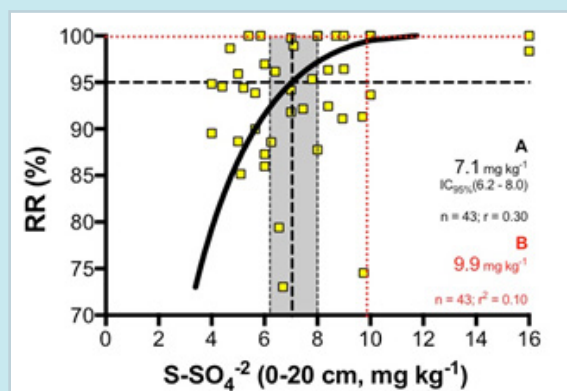


Figura 9. Relación entre el rendimiento relativo (RR) de trigo y el nivel de $S-SO_4^{-2}$ del suelo en 0-20 cm. La barra vertical gris indica un rango crítico de 6.2 a 8.0 $mg\ kg^{-1}$, según el método del arcoseno-logaritmo -ALCC- modificado (A) (Correndo y col., 2016). Las líneas punteadas rojas indican un nivel crítico de 9.9 $mg\ kg^{-1}$ para obtener 99.9% de RR, según el método estadístico de Cate-Nelson (B) (Cate y Nelson, 1971). Información de 43 ensayos realizados en el Sur de Santa Fe y Sur de Córdoba entre las campañas 2000/01 y 2015/16.

Sin embargo, el análisis de $S-SO_4^{-2}$ en suelo no ha mostrado resultados completamente satisfactorios. Esto obedece, entre otras razones, a la dinámica de mineralización del SO_4^{-2} en el suelo, a la presencia en horizontes sub-superficiales, a los aportes por agua de napa, y a características propias de la determinación del SO_4^{-2} en laboratorio. Esta situación ha propiciado que las recomendaciones de S intenten cubrir los requerimientos de los cultivos, con dosis que varían entre 5 y 20 $kg\ de\ S$ por ha. El desarrollo de herramientas más precisas para el diagnóstico de la fertilidad azufrada es el objetivo de numerosas investigaciones en Argentina. Esto permitirá aplicar estrategias más adecuadas a las actuales, tanto en términos económicos como ambientales.

La presencia de SO_4^{-2} en horizontes sub-superficiales o en agua de napa y características propias de la determinación del SO_4^{-2} en laboratorio dificultan el diagnóstico del estatus azufrado mediante análisis de suelo

• **Indicadores de Planta**

Debido a las inconsistencias del diagnóstico mediante el análisis de muestras de suelo, la determinación de la concentración de S y la relación N:S en biomasa aérea y en grano se proponen como herramientas complementarias. Así, se ha determinado que el umbral de 16:1 para la relación N:S en biomasa aérea permitió una buena caracterización del estatus azufrado, en muestreos realizados desde inicio de macollaje hasta fin de encañazón. Para el análisis de grano se propone el uso conjunto de la concentración de S total y de la relación N:S de los mismos. Reussi Calvo et al. (2011) informaron que granos provenientes de cultivos que manifestaron respuesta a S tuvieron una concentración menor a 1.5 g S kg^{-1} y con una relación N:S mayor a 13:1.

- **Fuente de S**

Debido a que la forma de S es SO_4^{-2} en todos los casos y a sus características químicas y físicas, el sulfato de amonio, sulfato de magnesio y potasio, sulfato de potasio, tiosulfato de amonio y superfosfato simple presentan similares eficiencias de uso (ver **Anexo**). Por su parte, el sulfato de calcio (yeso) tiene menor solubilidad, por lo que las formulaciones deben presentar partículas de tamaño pequeño para permitir un buen contacto con el suelo y facilitar su disolución. Las evaluaciones a campo de estas fuentes sulfatadas han mostrado eficiencias de uso de S similares.

Se destaca que las fuentes de S se presentan, comúnmente, en mezclas con fertilizantes que incluyen N, P u otros nutrientes. Dichas mezclas pueden ser físicas, que surgen de la combinación física de dos o más fertilizantes simples, o pueden ser "fertilizantes compuestos" que se obtienen por reacción química (y en algunos casos por compactación física) de diferentes compuestos. En este último caso, cada gránulo resultante contiene la misma concentración de nutrientes.

- **Forma y momento de aplicación de S**

Las aplicaciones de fertilizantes azufrados pueden realizarse indistintamente al voleo o en bandas ya que el sulfato tiene buena movilidad en el suelo. El S elemental debe aplicarse con anticipación a la siembra debido a que debe ser oxidado a SO_4^{-2} para que pueda ser absorbido por el cultivo. Cuando el S se aplica como componente de una mezcla, los demás nutrientes pueden condicionar la forma y momento de aplicación correctos.

Azufre y calidad del grano

El S es un componente relevante de las proteínas del grano de trigo. Su deficiencia puede afectar las propiedades funcionales de las masas, siendo estas más fuertes, menos extensibles y generando un menor volumen de pan. Aunque los umbrales no han sido aún verificados en Argentina, se sugiere que trigos de adecuada aptitud panadera deberían presentar una concentración de S superior a 0.12% y relación N:S mayor a 17:1.

Potasio

- **Dosis de K**

La química del K del suelo es relativamente simple en comparación con otros nutrientes como N o P, ya que el K no forma compuestos orgánicos. En este sentido, el K intercambiable (Kint), adsorbido a los coloides del suelo, es un adecuado estimador de la disponibilidad para los cultivos, ya que abastece rápidamente a la solución del suelo. Los suelos de la región pampeana argentina presentan, originalmente, adecuada disponibilidad de K para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Por esto, el estudio de metodologías de diagnóstico, umbrales de suficiencia y aspectos referidos a las MPM del nutriente no han recibido mucha atención. Sin embargo, el incremento en la extracción del nutriente a partir de una mayor producción de los cultivos ha provocado un empobrecimiento de los suelos.

Un relevamiento reciente realizado por Sainz Rozas et al. (2013) aporta información sobre los cambios en los niveles de Kint en la Región Pampeana y extra Pampeana y advierte sobre zonas con mayor probabilidad deficiencias a futuro. Si bien en la mayor parte de la Región los niveles son muy altos, surgen zonas específicas como la Provincia de Entre Ríos, el oeste de Santa Fe y noreste de Buenos Aires donde el nivel es sensiblemente menor y se pueden esperar las primeras deficiencias del nutriente en el futuro.

En la Provincia de Entre Ríos, el oeste de Santa Fe y noreste de Buenos Aires, la disponibilidad de K intercambiable es sensiblemente menor al resto de las regiones trigueras y advierten sobre la posible futura ocurrencia de deficiencias del nutriente.

Hasta el momento, no se han reportado situaciones de deficiencias severas en cultivos extensivos en Argentina. En Uruguay, estudios recientes han indicado disminuciones importantes del Kint así como deficiencias en varios suelos agrícolas (Barbazán et al., 2011). La **Tabla 5** muestra categorías según el análisis de K extractable y las recomendaciones de fertilización potásica para trigo para el sur de Brasil y el medio-oeste de EE.UU.

Tabla 5. Categorías de K intercambiable en suelos y recomendaciones de fertilización potásica para trigo según la Comisión de Fertilidad de Suelos de Rio Grande do Sul/Santa Catarina (Brasil) y las universidades estatales de Iowa y Kansas (EE.UU.).

Institución		Categorías de Kint y Dosis de K recomendadas				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Comisión Fertilidad de Suelos RS/SC ¹	Nivel (mg kg ⁻¹)	< 40	41-60	61-80	81-120	> 120
	Dosis de K (kg ha ⁻¹)	108-83	58	33	17	< 17
Iowa State University ²	Nivel (mg kg ⁻¹)	< 90	91-130	131-170	171-200	> 200
	Dosis de K (kg ha ⁻¹)	58	33	12	0	0
Kansas State University ³	Nivel (mg kg ⁻¹)	< 40	41-80	81-120	121-160	> 160
	Dosis de K (kg ha ⁻¹)	50	33	17-12	0-12	0

¹ Extractante Mehlich I; ² Extractante acetato de amonio o Mehlich 3, subsuelo bajo en K; ³ Extractante acetato de amonio.

- Fuente de K

Los fertilizantes potásicos son altamente solubles y no presentan diferencias agronómicas, más allá de los nutrientes acompañantes en la formulación (ver **Anexo**). En general, presentan un índice de salinidad relativamente elevado que puede provocar daños a semillas y plántulas si se aplican en la línea de siembra.

- Forma y Momento de aplicación de K

En general, las aplicaciones de K pueden realizarse “al voleo” en pre-siembra o siembra ya que el potencial de pérdidas por lavado es despreciable. Pueden presentarse excepciones en suelos arenosos o ambientes de elevadas precipitaciones, donde las aplicaciones en bandas a la siembra sean más eficientes.

De manera similar al P, la aplicación de K en dosis que exceden lo extraído por los cultivos manifiesta residualidad, lo que permite definir estrategias de fertilización a la rotación de cultivos.

Calcio y Magnesio

En general, no es común que se observen deficiencias de Ca y Mg en las regiones donde se cultiva el trigo en Argentina. Cuando ocurren, se asocian a problemas de acidificación del suelo. Así, resulta difícil separar las deficiencias de Ca o Mg, respecto a la toxicidad aluminio (Al^{+3}) o manganeso (Mn^{+2}). Es frecuente que la deficiencia de Ca no se observe, debido a que los efectos de la acidez del suelo se manifiestan antes. La deficiencia de Mg puede detectarse con niveles de Mg intercambiable menores a 50 mg kg^{-1} .

Las fuentes de Mg disponibles en el mercado son la dolomita (7-21% Mg; 21-45% Ca), el sulfato de magnesio (10-19% Mg; 13-26% S), el sulfato doble de Mg y K (11% Mg; 22% S; 18% K) y el nitrato de magnesio (6-10% Mg; 7% N).

Micronutrientes

El cloro (Cl) ha sido uno de los micronutrientes más estudiados en trigo. Además de su rol en el metabolismo de la planta, las aplicaciones de Cl han resultado en tolerancia a enfermedades como pietín, royas, y manchas foliares, entre otras. Las respuestas en rendimiento observadas en la región pampeana argentina varían entre 5 y 10%, y se han asociado con niveles de disponibilidad de Cl en suelos menores de 30 kg ha^{-1} (Melgar et al., 2001; Díaz Zorita et al., 2004; García, 2008; Ventimiglia et al., 2008). Asimismo, se han reportado valores críticos de 0.12% para la concentración de Cl en hojas superiores al estado de pre-emergencia floral (Z40). En caso de diagnosticarse deficiencias, las dosis recomendadas varían entre 10 y 25 kg ha^{-1} de Cl. No se han encontrado diferencias entre las distintas fuentes de Cl y se han observado resultados similares en aplicaciones al voleo en pre-siembra o durante el macollaje. Ver **Anexo** por fertilizantes disponibles en el mercado argentino.

En cuanto a otros micronutrientes, en la región pampeana se han reportado respuestas a boro en Alberti (Buenos Aires) (Klein, 2003). En la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, se observaron respuestas significativas a aplicaciones conjuntas B, Cu y Zn en 7 sitio-año de los 43 casos (sitios-año) evaluados con trigo entre 2000 y 2015. Con la intensificación de la agricultura y rendimientos progresivamente más elevados, es altamente probable que se manifiesten con mayor frecuencia las deficiencias de estos nutrientes.

Consideraciones Finales

El desarrollo y la adopción de determinadas metodologías de diagnóstico nutricional se encuentran estrechamente relacionados a las condiciones específicas de cada sistema de producción en el cual se inserta el cultivo de trigo. El análisis de suelos es la herramienta más comúnmente utilizada con fines de diagnóstico, aunque su adopción como práctica de manejo es aun baja en la región. En determinadas situaciones es necesario complementarlo o utilizar otras alternativas (e.g., calculadoras de requerimientos, análisis de plantas, modelos de simulación). Las tecnologías actuales de sensores locales y remotos, imágenes satelitales, mapas de rendimiento, mapas de suelos y topográficos, son de gran utilidad para lograr una mejor definición de ambientes contrastantes. Obviamente, los costos y recursos que involucran el desarrollo e implementación de cada una de estas tecnologías pueden ser una limitante.

Por otro lado, más allá de contar con alternativas sofisticadas, no debemos perder el enfoque de un punto esencial: "Conocer la realidad con la que trabajamos". En la medida que la información generada por una metodología es representativa de lo que realmente sucede con nuestros suelos y cultivos, a nivel productivo permite mejorar los diagnósticos y recomendaciones de nutrientes en términos de fuente, dosis, momento y forma de aplicación, con los consecuentes efectos positivos sobre los niveles superiores del sistema: ambiental, económico y social.

Beneficios del trigo sobre la calidad del suelo

La materia orgánica (MO) es el principal indicador de calidad del suelo ya que controla muchas de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Es fuente de carbono, nutrientes y energía para los microorganismos del suelo, provee de nutrientes a las plantas, favorece la difusión de aire, mejora la capacidad de infiltración, aumenta la retención de agua y reduce la erosión. Además, controla la eficacia y destino de plaguicidas u otros compuestos de origen antrópico.

El contenido de MO del suelo se define según el balance entre los procesos de entrada (residuos vegetales y animales) y salida (oxidación por actividad microbiana). El hombre puede incidir sobre el contenido de MO al favorecer uno u otro proceso y es aquí donde el tipo de cultivos y el manejo que se realice con ellos adquieren relevancia.

La cantidad de residuos de cultivo que retornan al suelo es el factor más importante que controla la dinámica de la MO del mismo. Por ello, todas las acciones que, a lo largo de una rotación, incrementen la cantidad de carbono devuelto al suelo (alta frecuencia de cultivos con gran volumen de rastrojos y/o sistema radical, fertilización, riego, etc.) atenúan la tasa de caída de la MO respecto de su condición original o, en algunas condiciones, logran incrementar el contenido. Por otra parte, la calidad de los residuos también afecta la dinámica de la MO. Materiales con baja relación carbono/nitrógeno y/o alto contenido de compuestos solubles favorecen la actividad de los microorganismos del suelo y se degradan con mayor velocidad.

Entre los cultivos predominantes de la Región pampeana argentina, el trigo es uno de los más beneficiosos para el mantenimiento de la calidad del suelo debido, principalmente, a las características de los residuos de cosecha. Así, este cultivo es, junto al maíz, uno de los que mayor cantidad de residuos aportan al sistema (**Tabla 6**). Los mismos presentan una alta relación carbono/nitrógeno (**Tabla 6**), lo que disminuye su velocidad de descomposición y favorece su persistencia en el suelo. Además, por ser una gramínea y poseer un sistema radical adventicio, su presencia en la rotación contribuye a mejorar la estructuración del suelo.

Tabla 6. Cantidad y calidad de residuos de maíz, girasol, soja (Andrade et al., 1995) y trigo (Falótico et al., 1999). Adaptado de Domínguez, Studdert y Echeverría (2006).

	Trigo	Maíz	Girasol	Soja
Rendimiento* (kg ha ⁻¹)	4500	7500	2500	3000
Materia seca en residuos (kg ha ⁻¹)	5500	7883	3993	3870
N en residuos (%)	0.70	0.68	0.95	1.16
C/N en residuos	60	63	45	37

*El rendimiento y cantidad de residuos varía según la región de producción. El N (%) y C/N es poco variable.

De acuerdo a lo tratado en el presente Capítulo, se destaca que un buen manejo nutricional del cultivo de trigo genera mayores beneficios sobre la calidad del suelo a partir de una mayor producción de biomasa y aporte de carbono al sistema.

Bibliografía

- Abbate P.A. y F.H. Andrade. 2015. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. Pp155-185. En: F.O. García y H.E. Echeverría (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2ª ed. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Andrade, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crop Res.*, 41: 1-12.
- Barbazán M., A. Del Pino, J. Bordoli, Bordoli, A. Califra, S. Mazzilli, O. Ernst. 2011. La problemática del K en Uruguay: situación actual y perspectiva de corto y mediano plazo. II Simposio Nacional de Agricultura de secano v1. P 21-33. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo.
- Barbieri P.A., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas. 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 27(1):115-125.
- Correndo A., Boxler, M., García F.O. 2015. ¿Qué nos dicen los números de la reposición de nutrientes en el largo plazo? Simposio de Fertilidad. 18 y 19 de Mayo, Rosario, Santa Fé, Argentina. 84-94.
- Correndo, A.A., F.H. Gutiérrez Boem, F. Salvagioti, y F.O. García. 2016. Método alternativo para estimar niveles críticos de nutrientes. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Ordenamiento territorial: un desafío para la ciencia del suelo. Junio 27-Julio 1, 2016. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. AACCS.
- Díaz Zorita, M., G. Duarte y M. Barraco. 2004. Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy Pampas region, Argentina. *Agron. J.* 96:839-844.
- Dominguez, G. F., G.A. Studdert, y H.E. Echeverría. 2006. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. Pp: 207-229. En: F.O. García y H.E. Echeverría (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría H.E. y F.O. García. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2ª ed. 904 p. Buenos Aires. Ediciones INTA.
- Echeverría, H.E y F.O. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico 149. EEA INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, H.E, Calviño P. y M. Redolatti. 2001. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada y fosfatada bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. Jornada de Actualización Profesional en el Cultivo de Trigo, 18. Mar del Plata, Abril 2001. EEA INTA Balcarce-FCA Balcarce-CIAM. Mar del Plata, Argentina.
- Echeverría, H.E, N.I. Reussi Calvo, A. Pagani, y L. Fernández. 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. Simposio de Fertilidad. 18 y 19 de Mayo, Rosario, Santa Fé, Argentina. 98-107.
- Falotico J, Studdert G, Echeverría HE. 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo.* 17:9-20.
- Ferrari, M., H. Castellarín, H.R. Saiz Rozas, H.S. Vivas, R.J.M. Melchiori, y V. Gudej. 2010. Evaluación de métodos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada para el cultivo de trigo en la región pampeana. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. El Suelo: pilar de la agroindustria en la pampa argentina, Rosario, Santa Fe, AACCS. Cd-rom.
- García F. 2008. Cloro en trigo: Resultados de las experiencias en la región pampeana argentina: Años 2001 a 2006. *Informaciones Agronómicas* 38:17-21.
- García F.O.; M. Boxler; J. Minteguaga; R. Pozzi; L. Firpo; I. Ciampitti; A. Correndo; F. Bauschen; A. Berardo y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 200-2009. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pag.
- González Montaner, J., G. Maddonni, N. Mailland y M. Porsborg. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo* 9:41-51.
- González Montaner, J., M. Di Nápoli, P. Calviño, N. Mailland, M. Posborg, F. Dodorico y J. Andenoché. 2003. Nitrógeno en trigo. *Revista de los CREA.* 272:56-59.
- IPNI. 2013. 4R de la Nutrición de Plantas: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. Bruulsema TW; P Fixen & G Sulewski (Eds.). 1ra Ed. Acassuso. International Plant Nutrition Institute. 140 pp.
- Klein, R. 2003. Experiencias en fertilización balanceada de trigo/soja en Alberti (Buenos Aires). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 17:1-6.
- Melgar, R., M. Camozzi, M. Torres Duggan y J. Lavandera. 2001. Más vale prevenir: Cloro y potasio. *Fertilizar* 23:30-33.
- Reussi Calvo, N.I., Echeverría y H.R. Sainz Rozas. 2011. Diagnosing sulphur deficiency in spring red wheat: plant analysis. *Journal of Plant Nutrition* 34: 573-589.
- Reussi Calvo, N.; H.E. Echeverría; H. Sainz Rozas; A. Berardo & N. Diovisalvi. 2015. Mejorando el diagnóstico de nitrógeno. *Visión Rural* 107: 17-19.
- Reussi Calvo, N.; H. Sainz Rozas; H.E. Echeverría; A. Berardo & N. Diovisalvi. 2014. ¿Cómo ajustamos la dosis de nitrógeno durante el ciclo del cultivo de trigo. *Revista Agromercado de Trigo* 180: 2-6.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverría, H. E., Barbieri, P. A., Angelini, H. P., Larrea, G. E., G.N Ferraris y Barraco, M. R. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? argentinos? Actas Simposio Fertilidad 2013. Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. Pp 62-72
- Satorre E., F. Menéndez y G. Tinghitella. 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Stone, P.J., y R. Savin. 1999. Grain quality and its physiological determinants. En *Wheat: ecology and physiology of yield determination*, 85-120. E H Satorre, Gustavo A Slafer
- Ventimiglia, L., L. Torrens Baudrix y J. Camarasa. 2008. Fertilización con cloro en el cultivo de trigo: Efecto de la dosis y respuesta varietal. *Informaciones Agronómicas* 38:22-24. IPNI. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.