

La nutrición del cultivo de trigo

Fernando O. García¹, Guillermo A. Divito², y Nahuel Reussi Calvo³

¹Consultor privado, Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce; fgarcia1957@gmail.com

²Asesor Privado. Asistente Técnico Regional Necochea AAPRESID; guillermodivito@yahoo.com.ar

³CONICET-Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, Fertilab; nreussicalvo@laboratoriofertilab.com.ar

Importancia de la nutrición mineral para el rendimiento del cultivo

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 periodo crítico, reducir la partición de biomasa hacia estructuras reproductivas o dis-

minuir 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. 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 puede ser consultado en Echeverría y García (2015).

Síntomas de deficiencia de los principales nutrientes en trigo

Fotografías gentileza de IPNI, *Crop Nutrient Deficiency Collection*.



Una de las principales funciones del N en las plantas es ser constituyente de la clorofila. Por ello, la deficiencia se manifiesta como una clorosis de las hojas, en particular en el estrato inferior de las plantas, debido a la alta movilidad que presenta el nutriente hacia hojas del estrato superior del canopeo.

También las hojas de plantas deficientes de N muestran un menor crecimiento.

Adaptado de Divito G., A.A. Correndo y F.O. García. 2017. La nutrición del cultivo de trigo. En Divito G.A. y F.O. García (ed.). 2017. Manual del Cultivo de Trigo. Pp. 27-50. International Plant Nutrition Institute. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 224 p. ISBN 978-987-46277-3-5. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1320>



La deficiencia de P restringe el crecimiento y la división celular en mayor medida que la síntesis de clorofila, por lo que plantas deficientes adquieren, comúnmente, un color verde oscuro. Además, ante deficiencias severas de P, el color de las hojas puede tornarse púrpura por acumulación de antocianinas. Por otra parte, el menor crecimiento de la planta se puede manifestar con un menor número de macollos y raíces secundarias. Otro rasgo característico de la deficiencia del nutriente es que se demora el desarrollo del cultivo.



Trigos con inadecuada nutrición de K presentan crecimiento inicial despasejo y las hojas adquieren un tono verde oscuro con las puntas hacia abajo en estados juveniles. Luego, las hojas inferiores se vuelven cloróticas con márgenes y puntas necróticas. Las plantas manifiestan entrenudos cortos y tallos débiles, lo que le confiere mayor susceptibilidad al vuelco.



La deficiencia de S da lugar a un menor crecimiento. Las plantas presentan clorosis foliar, que comienza con el amarillamiento internerval y progresa hacia toda la superficie de la hoja. A diferencia de los síntomas de deficiencias de N, la clorosis se observa en hojas jóvenes debido a que el nutriente presenta menor movilidad en la planta.



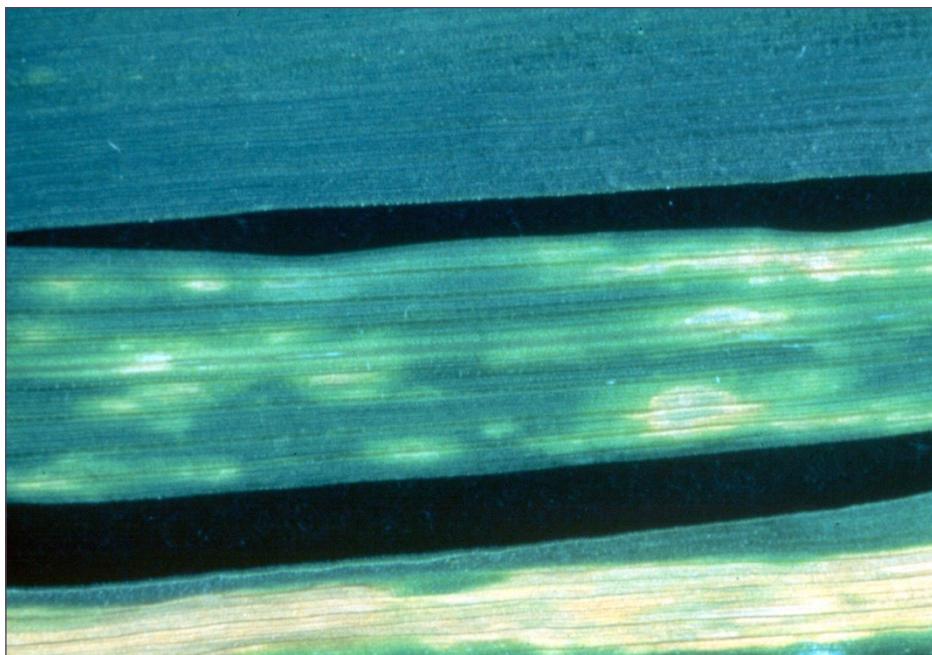
Las deficiencias de Mg resultan en manchas cloróticas internervales.



Cultivos de trigo deficientes en cobre (Cu) presentan puntas de hojas nuevas amarillentas o secas y espigas deformadas (falta de espiguillas y/o granos).



La inadecuada disponibilidad de cloro (Cl) resulta en una mayor incidencia de enfermedades y vuelco.



La clorosis interveinal de hojas jóvenes es el síntoma característico de la deficiencia de zinc (Zn).

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 culti-

vos, 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 -- kg t grano ⁻¹ --	Índice de Cosecha	Extracción -- 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 ha ⁻¹ --		-- g ha ⁻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 (IPNI, 2013). Existen principios científicos que guían el desarrollo de las prácticas que determinan fuente, dosis, momento y forma correctos. 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.

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 sensoriales como el clorofilómetro (un tipo de sensor proximal) 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 1, la relación entre ambas variables depende de varios factores que se analizarán a continuación, lo que resulta en modelos diferentes según la región.

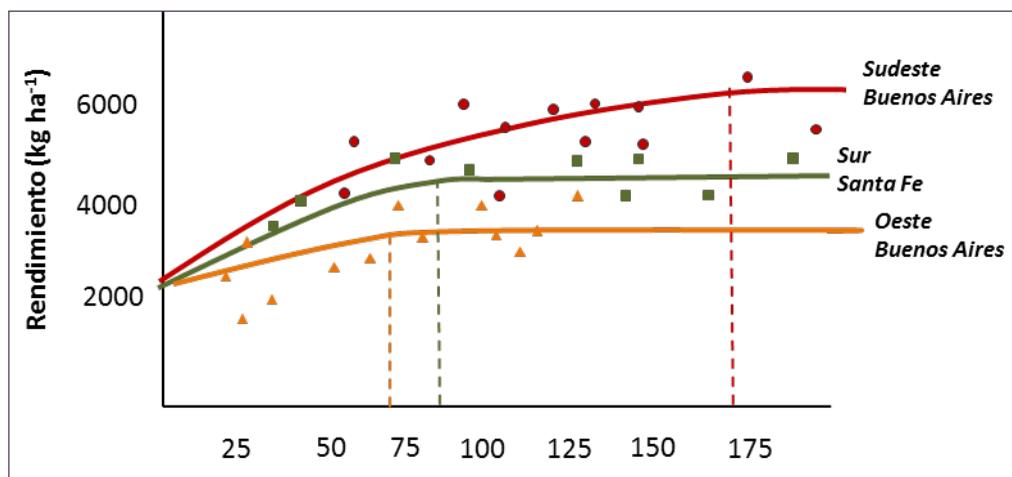


Figura 1. Representación teórica del rendimiento del trigo en función de la disponibilidad de N en el suelo ($N-NO_3^- + N$ del fertilizante, kg/ha) para el sudeste de Buenos Aires, el sur de Santa Fe y el oeste de Buenos Aires. Las líneas punteadas indican el umbral crítico de N en el suelo donde el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

- Cultivo antecesor

Los residuos del cultivo antecesor condicionan la disponibilidad de N para el trigo. En la medida que los mismos tengan alta relación C:N (ej. maíz) se favorecerá la inmovilización del nutriente, mientras que si dicha relación es baja (ej. soja) se promoverá la mineralización. Para el sudeste bonaerense, Echeverría y Studdert (2001) estimaron que cuando el antecesor fue girasol, la disponibilidad de N fue 40 kg ha⁻¹ mayor que cuando fue maíz, mientras que cuando el antecesor fue soja, el N disponible fue 60 kg ha⁻¹ mayor.

- 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 (Abbate, 2015).

- 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 2A) es posible calcular la eficiencia agrónomi-

ca de uso del N, que indica el rendimiento por unidad de N. Como se observa en la Figura 2B, 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.

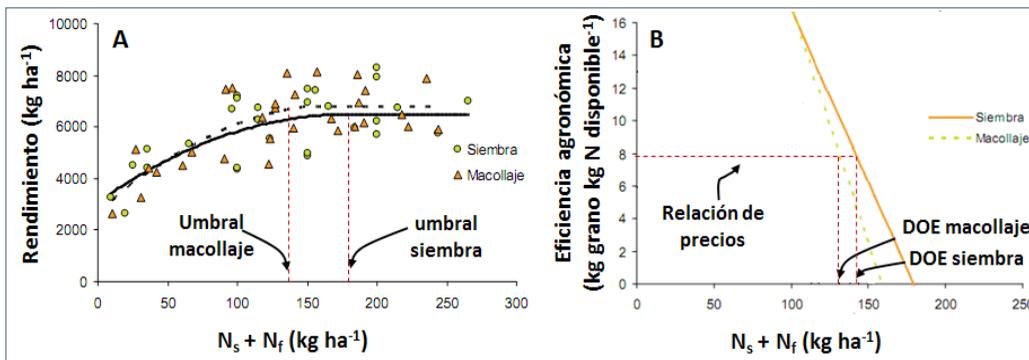


Figura 2. (A) Relación entre el rendimiento del cultivo y el N en el suelo (N_s) más el N del fertilizante (N_f). Muestreo a la siembra (línea llena) y al macollaje (línea punteada) en el sudeste de Buenos Aires. (B) Relación entre la eficiencia agronómica de uso de N ($\text{kg grano kg de N disponible}^{-1}$) y el N en el suelo (N_s) más el N del fertilizante (N_f) a la siembra (línea llena) y al macollaje (línea punteada). La línea punteada horizontal indica la relación de precios $\text{kg de N kg de trigo}^{-1}$ (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).

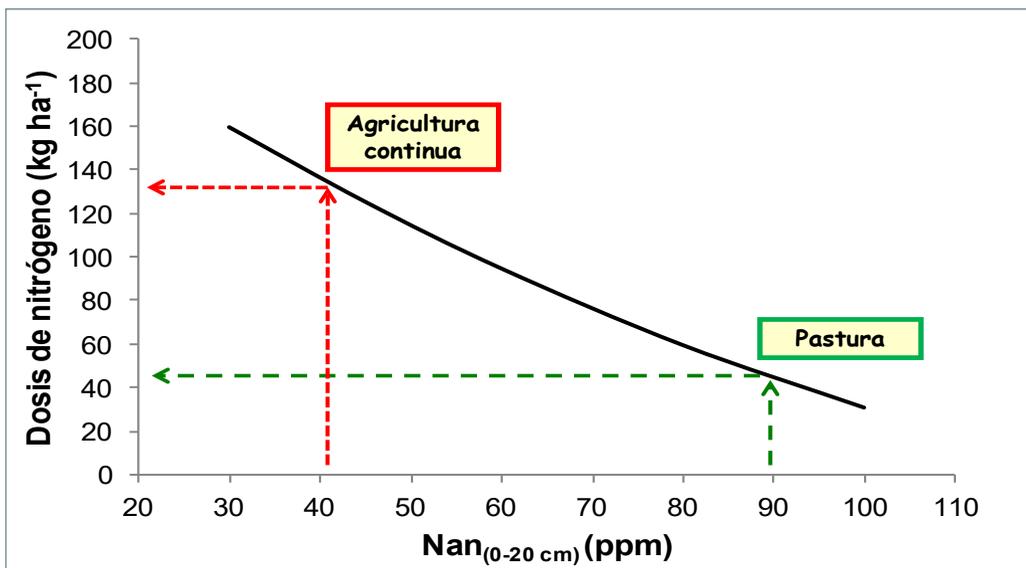


Figura 3. Dosis de N a aplicar para lograr un rendimiento de 6000 kg ha^{-1} con una disponibilidad inicial de 60 kg N ha^{-1} (0-60cm) en función del N anaeróbico (Nan). Datos del sudeste de Buenos Aires. Adaptado de Reussi Calvo et al. (2013).

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 (N_{an})** 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 N_{an} 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).

- 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⁻¹ 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**:

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

Donde E_s, E_m y E_r son las eficiencias de uso del N_s, N_m y N_r, 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-NO₃⁻ 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_r. 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, para ambientes sin limitaciones hídricas, 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 (<https://dssat.net>), 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 proximales: clorofilómetro y sensores de reflectancia

Los *sensores proximales* 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**:

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

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.

La **Figura 4** muestra la relación entre la respuesta a N y el ISN al estado de un nudo (Z31) en el sudeste de Buenos Aires y sur de Santa Fe.

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 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.

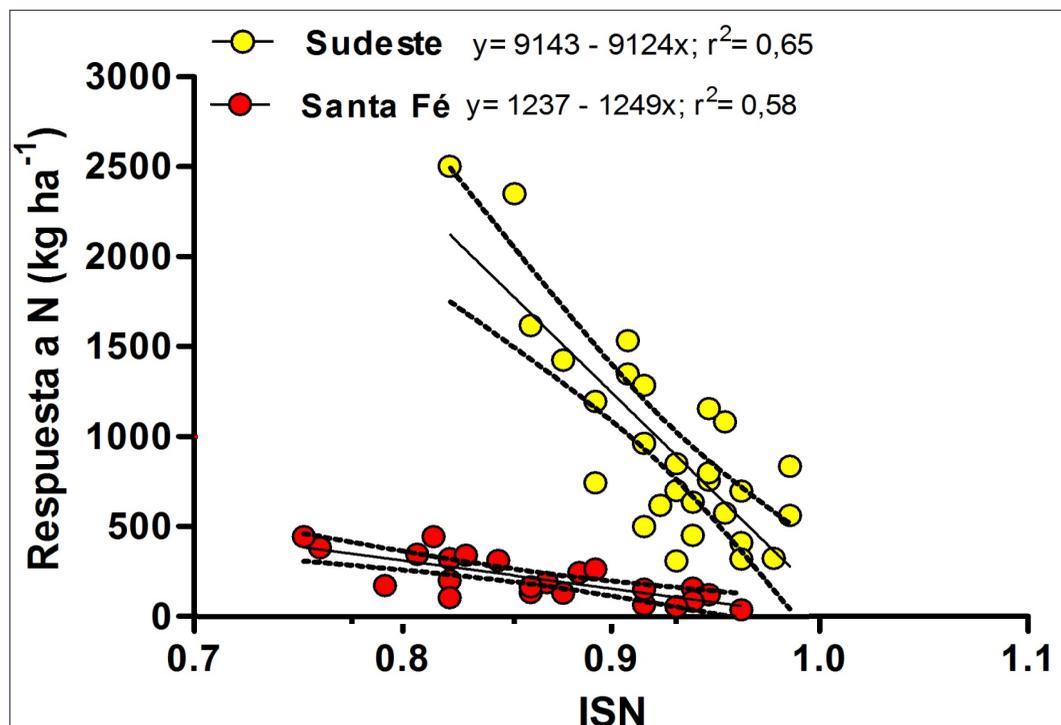


Figura 4. Relación entre la respuesta a N en trigo y el Índice de Suficiencia de Nitrógeno – ISN- en el sudeste de Buenos Aires y sur de Santa Fe. Fuente: Reussi Calvo et al. (2013; 2015).

Como se discute 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 eficiencia de uso del N.

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 discute más adelante, 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.

Ubicación de fertilizantes con la semilla

Detalles adicionales y otros cultivos pueden consultarse en Ciampitti, I.A. et al. (2006). Manejo y ubicación del fertilizante junto con la semilla: Efectos fitotóxicos. Archivo Agronómico No. 10. IPNI Cono Sur, Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1084>

En el cultivo de trigo, la fitotoxicidad de los fertilizantes aplicados a la siembra junto a la semilla varía teniendo en cuenta algunos factores. Un factor de importancia es la textura de los suelos, propiedad que influye en su CIC y su capacidad de retención de humedad.

En la **Figura 5a**, en suelos Argiudoles típicos, se evaluó como fuente nitrogenada la urea, presentando diferentes combinaciones: urea sola, combinada con superfosfato triple (SFT) y con fosfato monoamónico (FMA). En el caso de las últimas dos combinaciones, las dosis de los fertilizantes SFT y FMA fueron constantes, correspondiendo 33 kg ha^{-1} SFT y 55 kg ha^{-1} FMA. Se debe considerar que el tratamiento con fertilizante FMA adiciona de forma extra, $5\text{-}6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N elemento y en ambos casos, FMA y SFT, incrementan adicionalmente los efectos de salinidad al aumentar la dosis de fertilizante aplicado junto con la semilla.

Las tres combinaciones presentan el mismo efecto de fitotoxicidad sobre el número de plántulas emergidas, teniendo en consideración las prácticas de manejo utilizadas, bajo siembra directa, con condiciones de humedad moderadas (rango 17-27% HA) al momento de la siembra y un distanciamiento entre hileras de 0.175 metros. Dosis de urea entre 19 y 40 kg ha^{-1} resultan en pérdidas de 10 y 25% de plántulas a emergencia, respectivamente, cuando la fertilización se realiza junto a la semilla.

En el sudeste de Córdoba, Gudelj et al. (2001), observaron que la urea fue la fuente que mayor fitotoxicidad produjo, aumentando la mortandad con dosis superiores a 25 kg ha^{-1} de N elemento o sea 54 kg ha^{-1} de urea. Otros autores encontraron que para prevenir la fitotoxicidad, es recomendable agregar no más de 30 kg ha^{-1} de N (65 kg ha^{-1} de urea o 167 kg ha^{-1} de FDA) en suelos con mayor contenido de MO y texturas medias, mientras que en suelos de textura gruesa y menor contenido de MO no se debería superar los 15 kg ha^{-1} de N (26 a 33 kg ha^{-1} de urea o 67 a 83 kg ha^{-1} de FDA).

Las dosis mencionadas son meramente orientativas, e indican que la dosis límite no puede generalizarse y que la misma aumenta con el contenido de humedad del suelo, arcilla y MO, y disminuye cuando aumenta la distancia entre hileras (Ron y Loewy, 2000). Con respecto a otros fertilizantes, los efectos de FDA serían similares a los de la urea en cuanto a los niveles críticos de N, ya que el NH_4 del FDA puede generar NH_3 por la reacción alcalina de este fertilizante en el suelo (pH 8-8.5). Los efectos de superfosfatos y FMA son menores ya que no producen NH_3 , por lo tanto, sólo generan efecto salino.

Disponibilidad de N y contenido de proteína en grano

El contenido de proteína en grano es uno de los principales indicadores de calidad del trigo.

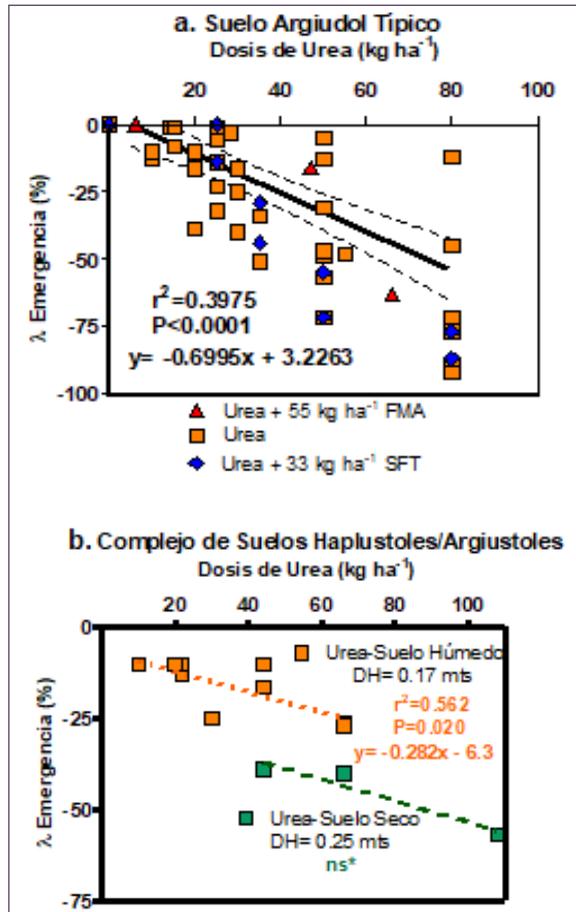


Figura 5. Fitotoxicidad de la urea en el cultivo de trigo dependiendo de los tipos y condición hídrica de suelos y con la combinación de otros tipos de fertilizantes. Elaborado con datos de Baumer et al. (1995/96), Gudej et al. (2001), Loewy (2000a) y H. Fontanetto (no publicado).

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).

El cambio en el rendimiento y proteína ante distinta oferta de N afecta los requerimientos del cultivo (Tabla 3). Nótese 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

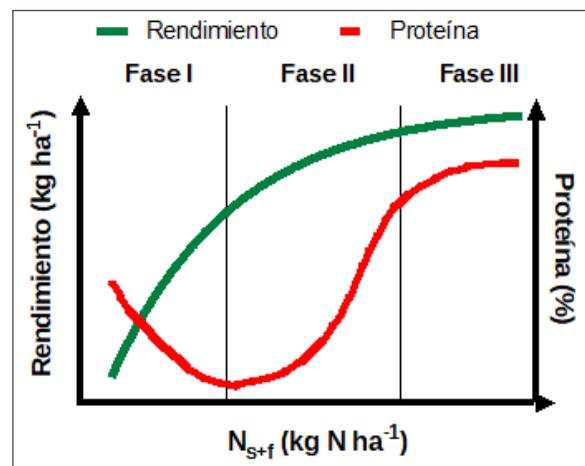


Figura 6. Rendimiento y proteína en grano en función de la cantidad de N disponible en el suelo (s) más el fertilizante (f). Adaptado de Stone y Savin (1999).

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

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%.

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 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)

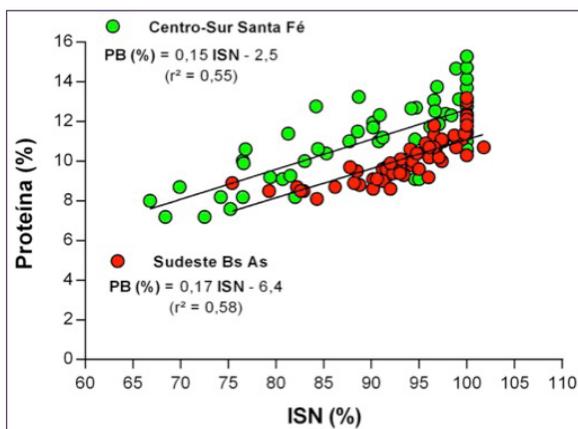


Figura 7. Proteína en grano en función del índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) al estado Z39 determinado con un clorofilómetro. Adaptado de Reussi Calvo et al. (2015) y Orcellet et al. (2017).

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

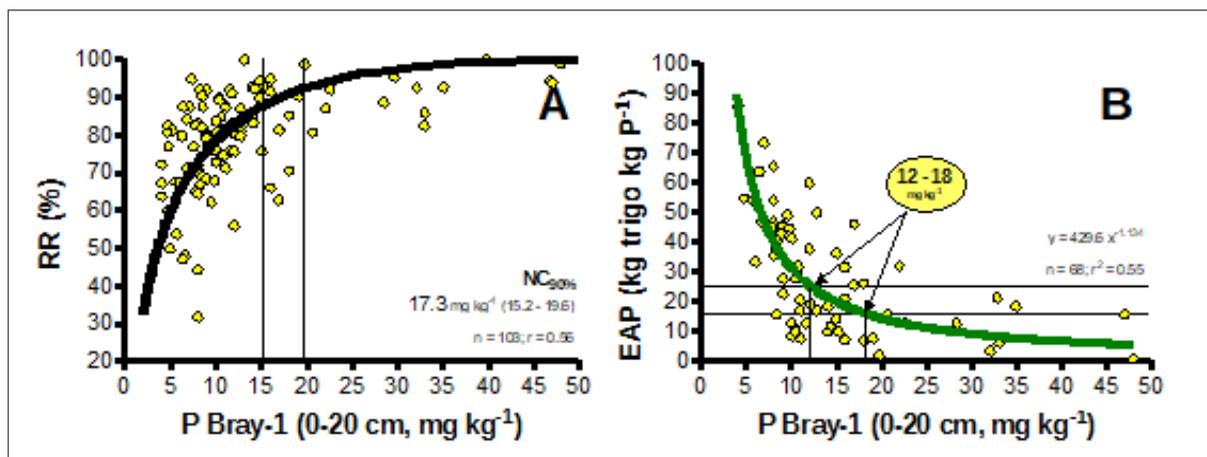


Figura 8. Estimación de nivel crítico de P extractable Bray-1 utilizando rendimiento relativo (RR, A) y eficiencia agronómica de la respuesta a P (EAP, B). En A, la franja vertical gris indica el intervalo de confianza (95%) para el nivel crítico estimado según el método ALCC modificado (Correndo et 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).

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).

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. Para la región pampeana central, Sucunza et al. (2018) reportaron incrementos de aproximadamente 3 ppm de P Bray con aplicaciones de 10 kg P ha⁻¹ por arriba de la extracción en grano de los cultivos.

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.

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, 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

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

dispone en el mercado de mezclas químicas y físicas que incluyen también S y otros nutrientes junto al P. Asimismo, en los últimos años han surgido nuevas formulaciones de P en formas sólidas y líquidas, que se presentan como alternativas de interés considerando aspectos logísticos y la posibilidad de sumar otros nutrientes en una misma fuente y aplicación. Estas fuentes podrían resultar en mejoras en la eficiencia de uso de P bajo ciertas condiciones de suelo y cultivo.

El contenido de P de los fertilizantes puede expresarse en términos de grado equivalente (como P_2O_5), 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

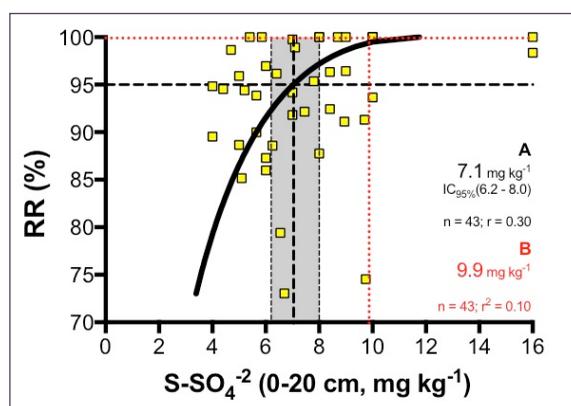


Figura 9. Relación entre el rendimiento relativo (RR) de trigo y el nivel de $S-SO_4^{-2}$ del suelo en 0-20 cm. La barra vertical gris indica un rango crítico de 6.2 a 8.0 mg kg⁻¹, según el método del arco seno-logaritmo -ALCC- modificado (A) (Correndo y col., 2016). Las líneas punteadas rojas indican 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.

na se ha sugerido un umbral de 36 kg de S-SO₄⁻² por hectárea para determinaciones realizadas en el estrato 0-60 cm (Echeverría et al., 2011).

Sin embargo, el análisis de S-SO₄⁻² en suelo no ha mostrado resultados completamente satisfactorios. Esto obedece, entre otras razones, a la dinámica de mineralización del SO₄⁻² 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 SO₄⁻² 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 SO₄⁻² en horizontes sub-superficiales o en agua de napa y características propias de la determinación del SO₄⁻² 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 SO₄⁻² 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 super-

fosfato simple presentan similares eficiencias de uso. 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 SO₄⁻² 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

(K_{int}), 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 K_{int} 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 K_{int}

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.

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.

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 K_{int} 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.

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 pieftín, 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.

Bibliografía

- Abbate P.A.** 2015. Ecofisiología y manejo del cultivo de trigo. En: Divito G. y F.O. García (ed.). 2017. Manual del Cultivo de Trigo. Pp. 33-52. International Plant Nutrition Institute. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 224 p. ISBN 978-987-46277-3-5. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1320>
- Abbate P.A. y F.H. Andrade.** 2015. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. Pp.155-185. En: F.O. García y H.E. Echeverría (Eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2º 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. Salvagiotti, 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.
- Domínguez, 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 y G.A. Studdert.** 2001. Predicción del contenido de proteína en grano de trigo (*Triticum aestivum* L) mediante el índice de verdor de la hoja. *Ciencia del Suelo* 19(1):67-74.
- 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.
- 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. Minteguiga; 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.
- Orcellet, J.M., D. Perez, N.I. Reussi Calvo, H. Sainz Rozas, L.Tornotti y J. Calcha.** 2017. ¿Podemos diagnosticar nitrógeno durante el ciclo del trigo en el norte de la región pampeana? Simposio de Fertilidad. 17 y 18 de Mayo, Rosario, Santa Fé, Argentina.
- 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.I., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría y A. Berardo.** 2013. Contribution of anaerobiosis incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agronomy Journal* 105: 321-328.
- Reussi Calvo, N.I., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría y N. Diovisalvi.** 2015. Using canopy indices to quantify the economic optimum nitrogen rate in spring wheat. *Agronomy Journal* 107: 459-465.
- 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? 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.
- Sucunza F, F.H. Gutiérrez-Boem, F.O. García, M. Boxler, y G. Rubio.** 2018. El balance de fósforo del suelo determina los cambios en el nivel de fósforo extraíble. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 30:23-29. IPNI. Buenos Aires, Argentina. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1321>
- 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. ◀