

Del paper al lote:

¿Cuándo, cómo y por qué fertilizar el trigo?

El trigo constituye el principal cultivo invernal de los sistemas productivos de la región pampeana, no solo por su relevancia en términos de volumen de producción, sino también por su contribución al aporte de carbono dentro de las rotaciones. Un manejo nutricional adecuado es una de las herramientas clave para potenciar los rendimientos y, al mismo tiempo, mejorar la calidad del grano obtenido.

Entre los nutrientes esenciales, el nitrógeno (N) y el fósforo (P) son los que con mayor frecuencia condicionan el rendimiento del cultivo. No obstante, en las últimas décadas, la intensificación agrícola ha provocado una reducción en la disponibilidad de azufre (S) en los suelos, lo que ha incrementado la probabilidad de obtener respuestas productivas al agregado de este nutriente. A su vez, micronutrientes como zinc, boro y cloro han sido diagnosticados como limitantes en determinados sistemas productivos de la región pampeana. Ensayos realizados en los últimos años de manera conjunta entre CREA Sur de Santa Fe, IPNI y Nutrien Ag Solutions indican que esquemas de nutrición balanceada con NPS permiten alcanzar incrementos promedio de rendimiento que oscilan entre 500 y 2500 kg ha⁻¹, traducándose en márgenes brutos de entre 90 y 140 US\$/ha, según el sitio experimental (**Fig. 1**).

M-S-T/ S 23 sitios-año			M-T/ S 18 sitios-año		
Tratamiento	Respuesta		Tratamiento	Respuesta	
	kg/ha	Relativa		kg/ha	Relativa
PS	1048	44%	PS	1064	58%
NS	945	38%	NS	1036	59%
NP	1356	57%	NP	2230	124%
NPS	1568	65%	NPS	2660	146%
Completo	1745	72%	Completo	2822	155%

Figura 1. Respuesta en rendimiento absoluta y relativa al Testigo sin fertilizar en los ensayos de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (CREA Sur de Santa Fe-IPNI-Nutrien Ag Solutions). Rotaciones maíz-soja-trigo/soja (M-S-T/S) y maíz-trigo/soja (M-T/S). Dosis de 100-150 kg N/ha; 20-30 kg P/ha; y 12-20 kg S/ha. El tratamiento Completo incluye la aplicación de potasio, magnesio, zinc y boro.

Nitrógeno, la Bala de Plata

El N disponible a la siembra junto con el N mineralizado del suelo y de los residuos del antecesor durante el ciclo del cultivo, constituyen las principales fuentes de N para el cultivo. Este abastecimiento de N determina el rendimiento y el contenido de proteína en cultivos sin fertilizar (**Fig. 2**).

Para evaluar la disponibilidad de N inicial se recomienda el muestreo de suelo a la siembra del cultivo en los estratos superficiales (0-20 cm) y subsuperficiales (20-50 o 20-40 y 40-60 cm). No obstante, en años o regiones con excesos hídricos durante la pre-siembra del mismo y/o con antecesores que dan lugar a un corto período de barbecho (ej. soja y sobre todo soja de segunda), es conveniente realizar un segundo control de N en macollaje. Se han propuestos distintos umbrales de disponibilidad de N a la siembra ($N_{\text{suelo } 0-60\text{cm}} + N_{\text{fertilizante}}$), los cuales varían según la zona y el rendimiento objetivo desde 90 hasta 210 kg de N por ha.

El N mineralizado de la materia orgánica durante el ciclo de crecimiento del cultivo puede estimarse a partir de la determinación del N anaeróbico (Nan). El diferente potencial de mineralización que existe entre lotes -o ambientes dentro de un mismo lote- debido al manejo previo y/o los efectos de tipo suelo, se refleja en este índice. El muestreo de Nan puede realizarse en cualquier época del año y solo en el estrato 0-20 cm. En función de más de 5000 muestras analizadas por FERTILAB para el sudeste bonaerense, el valor promedio de Nan fue de 60 ppm, con un 25% de los lotes con valores menores a 45ppm y mayores a 75ppm. En general, para el cultivo de trigo el aporte de N por mineralización es de 2.0 a 2.4 kg N/ha por cada ppm de Nan, valor que varía según zona, fecha de siembra y textura del suelo.

El aporte de N por mineralización desde el residuo del cultivo antecesor se puede estimar a partir de información local. En general, se esperan aportes de N de antecesores leguminosas como soja o coberturas como vicia y aportes nulos, o inmovilización de N, con residuos voluminosos de antecesores de gramíneas de alta relación C/N como maíz y sorgo. Los valores pueden ir desde inmovilizaciones (competencia con el cultivo) de N de 60 kg/ha hasta mineralizaciones (aportes al cultivo) de 100 kg N/ha.

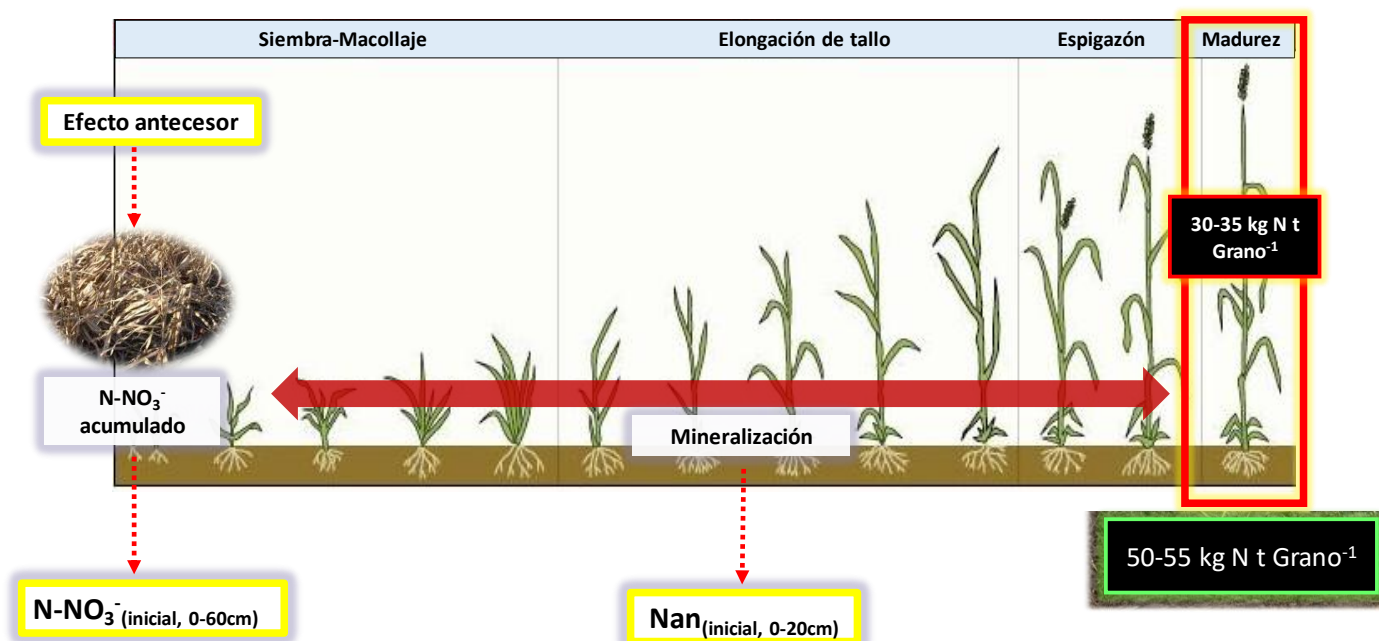


Figura 2. Abastecimiento de N del sistema para un cultivo de trigo sin fertilizar: N de residuo de antecesores, N disponible en el suelo a la siembra y N mineralizado de la materia orgánica a lo largo del ciclo del cultivo.

Para producir 1 tonelada de trigo con niveles proteicos adecuados (11-12%), el cultivo necesita absorber aproximadamente 30-35 kg de N. Considerando una eficiencia de recuperación de N del sistema del 60%, se necesitan 50-55 kg de N en el suelo para producir 1 tonelada de trigo (**Fig. 2**). De la misma manera, necesitamos aplicar 50-55 kg de N como fertilizante por cada tonelada de rendimiento que queremos producir por sobre el cultivo sin fertilizar. No obstante, los mismos pueden variar entre 40 y 60 kg N en función de la eficiencia de absorción del N del suelo y de los niveles de proteína deseados.

La **Fig. 3** muestra un ejemplo de determinación de la dosis de N a aplicar para un cultivo de trigo con objetivo de rendimiento de 5000 kg/ha en un suelo con 40 kg N/ha según análisis de N-nitrato a la siembra a 0-60 cm, Nan de 50 ppm y antecesor neutro (sin aporte de N de residuos). Con el abastecimiento de N del sistema, el cultivo podría alcanzar 2700 kg/ha de rendimiento, para llegar a 5000 kg/ha se necesitarían aplicar 126 kg/ha de N como fertilizante (55 kg/ha de N en el sistema por tonelada de grano producida). Para cebada, si bien los modelos están en desarrollo no se deberían esperar grandes diferencias respecto de trigo debido a la similitud entre requerimiento y ciclos de ambos cultivos.

Ejemplo de Diagnóstico de Nitrógeno

Rendimiento objetivo: 5 t/ha (11% proteína); Nan: 50 ppm (0-20 cm); Nitrato inicial = 40 kg/ha (0-60 cm).

$$1) \text{ N disponible} = \text{N inicial} (40 \text{ kg ha}^{-1}) + \text{Nan}$$

Varia con la zona/cultivo/
fecha de siembra

$$2) \text{ N disponible con Nan} = \text{N inicial} + \text{Nan} = 40 \text{ kg ha}^{-1} + 110 \text{ kg ha}^{-1} (50 * 2.2) = 150 \text{ kg N ha}^{-1}$$

$$\text{Requerimiento de N} = 55 \text{ kg N t de grano}$$

$$3) \text{ Rendimiento del testigo} = 150 \text{ kg N ha}^{-1} / 55 \text{ kg N t grano}^{-1} = 2,7 \text{ t ha}^{-1}$$

$$4) \text{ Respuesta} = 5,0 \text{ t ha}^{-1} - 2,7 \text{ t ha}^{-1} = 2,3 \text{ t ha}^{-1}$$

$$5) \text{ Dosis N} = 2,3 \text{ t ha}^{-1} * 55 \text{ kg N t grano}^{-1} = 126 \text{ kg N ha}^{-1}$$

Figura 3. Ejemplo de estimación de recomendación de fertilización nitrogenada en trigo utilizando la información de N disponible a la siembra, N anaeróbico (Nan), y rendimiento objetivo.

Respecto a las herramientas para el monitoreo, en la actualidad, existe una amplia gama de sensores remotos los cuales permitirían caracterizar, de forma rápida y no destructiva, el estatus nitrogenado durante el ciclo del

cultivo. Dentro de estos, el medidor de clorofila SPAD 502 y el sensor remoto Green Seeker son los más difundidos. Ambas herramientas podrían ser empleadas para el monitoreo del estatus nitrogenado del trigo desde mediados de macollaje hasta hoja bandera. Además, se desarrolló un modelo que permite estimar la respuesta a N en el estadio de un nudo detectable (**Fig. 4**). Estas herramientas son de mayor utilidad en situaciones o años donde por excesos hídricos se producen pérdidas de N por lavado y/o condiciones climáticas muy favorables que permitan mejorar la expectativa de rendimiento definida a la siembra.

En regiones productoras de trigo que se caracterizan por tener una muy baja probabilidad de déficit hídrico (menor al 5%) desde la siembra hasta la espigazón del cultivo y una alta potencialidad de rendimiento, como el sudeste bonaerense, es factible considerar el fraccionamiento de la dosis de N con el objetivo de maximizar el rendimiento, la eficiencia de uso de N y mejorar también la calidad de los granos. Además, es válido recordar que la mayor acumulación de N se produce a partir de fines de macollaje y durante la encañazón, momento en el cual se obtendría la mayor eficiencia de uso del nutriente. Aplicaciones de N en espigazón o en hoja bandera, con el objetivo de incrementar los niveles de proteína, han logrado en promedio aumentos de 0,3% hasta 3% según nivel de fertilización de base y potencialidad del ambiente. No obstante, considerando que las fertilizaciones tardías no permiten la aplicación de elevadas dosis de N, se las considera solo como complementarias dentro del programa de fertilización.

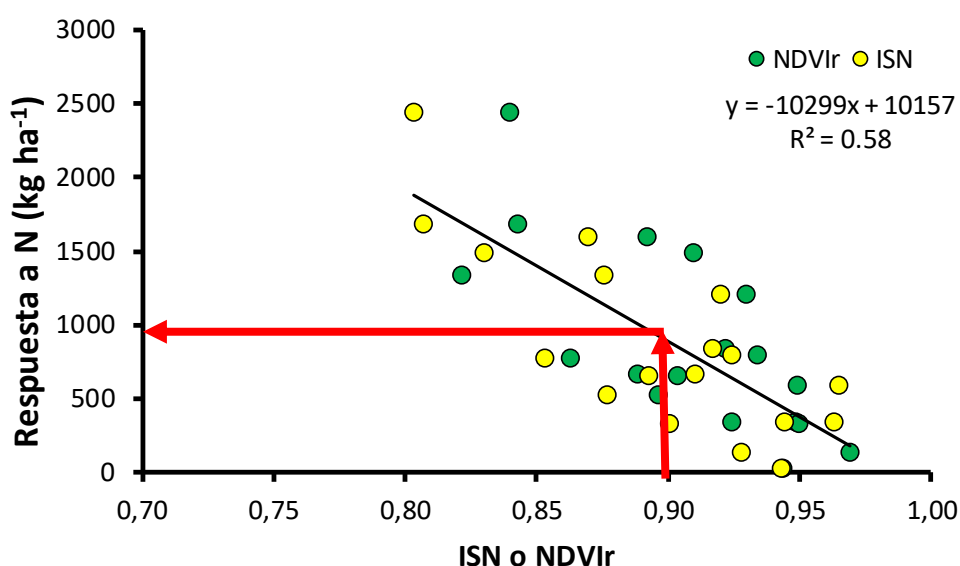


Figura 4. Relación entre la respuesta en rendimiento del cultivo de trigo a la re-fertilización con N y el ISN (= valor de SPAD del lote/ valor de SPAD de la franja sin limitaciones de N) o NDVIr (= valor del Green Seeker del lote/ valor del Green Seeker de la franja sin limitaciones de N) determinados en el estadio de un nudo del trigo (Z31). Fuente: Grupo Relación Suelo-Cultivo (Unidad Integrada Balcarce).

El fósforo, cimientos del gran cultivo

La recomendación de fertilización fosfatada se basa en el diagnóstico de fertilidad a partir del análisis de suelo del P extractable (P Bray) a 0-20 cm. Para trigo es ideal ubicarse por arriba del rango crítico de 15-20 ppm P Bray (**Fig. 5**). La **Fig. 6** muestra el rendimiento y la respuesta a P de trigo según el nivel de P Bray del suelo.

La recomendación a partir del análisis puede orientarse a satisfacer las necesidades del cultivo, también llamada *Suficiencia*, o a mejorar/mantener los niveles de P Bray del suelo, *Reconstrucción y Mantenimiento*. La

Tabla 1 muestra recomendaciones generales sugeridas para distintos niveles de P Bray del suelo y según el rendimiento objetivo:

- Las dosis de *Suficiencia* sugeridas dependen del nivel de P Bray y consideran solo el cultivo de trigo siguiente.
- Las dosis de *Reconstrucción y/o Mantenimiento* buscan elevar niveles bajos y mantener niveles altos de P Bray. En este caso se estima que para subir 1 ppm de P Bray se requiere aplicar 3 kg de P por arriba de la remoción de grano de los cultivos (**Tabla 1**), pero este valor varía entre 2.5 y 4 kg P por ppm P Bray. Para reponer el P removido en granos se estima una concentración de 3.2 kg P por tonelada de grano (**Tabla 1**), y este valor también varía entre 2.8 y 3.6 kg P/t grano.

Las recomendaciones sugeridas en la **Tabla 1**, además de depender el nivel de P Bray y rendimiento, variarán de acuerdo a la relación de precios fertilizante/grano, el capital disponible y la percepción frente al riesgo. Además, en caso de considerar el doble cultivo trigo/soja de segunda, las dosis deberían aumentar para ambos criterios de recomendación según productividad de la soja.

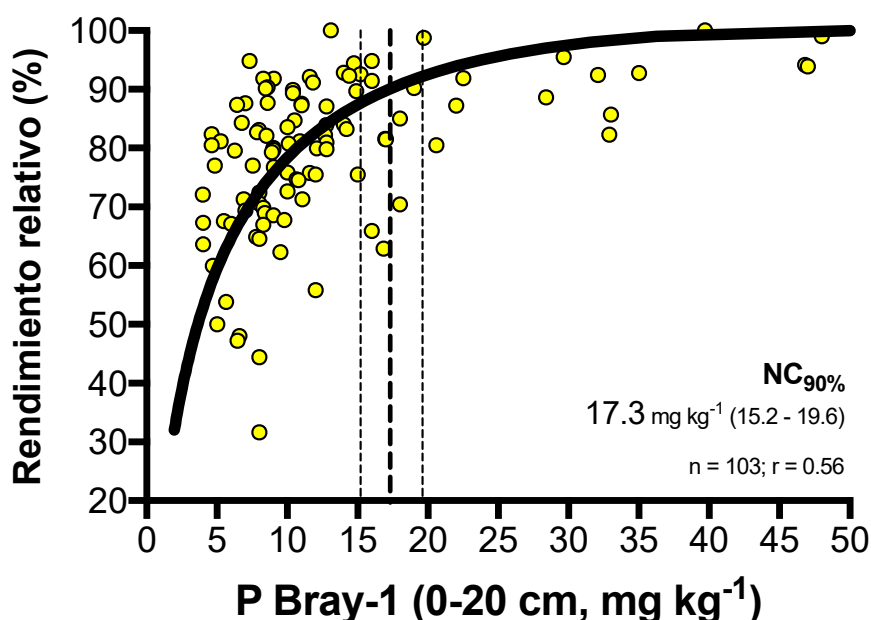


Figura 5. Rendimiento relativo de trigo en función del nivel de P_{Bray-1} (0-20 cm) a la siembra. La línea punteada y la franja vertical gris indican el nivel crítico (17 mg kg⁻¹) de P_{Bray-1} para obtener 90% del rendimiento relativo y su intervalo de confianza al 95% (15 a 20 mg kg⁻¹). n= 103 ensayos en región pampeana entre 1998 y 2014.

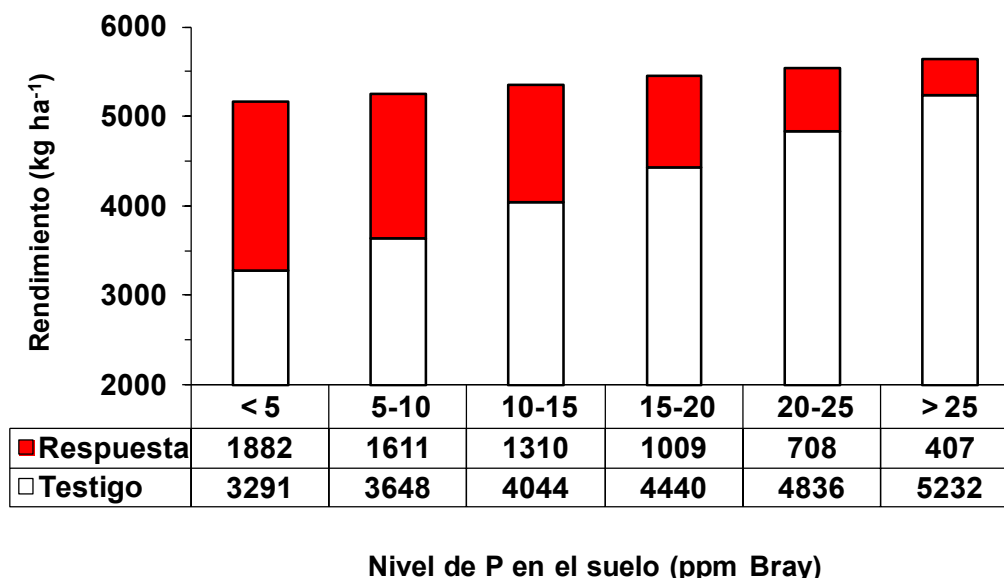


Figura 6. Rendimiento de trigo y respuesta a la fertilización fosfatada en función del nivel de P_{Bray-1} (0-20 cm) a la siembra. Ensayos Unidad Integrada FCA-INTA Balcarce 1998-99. Fuente: Angel Berardo y colaboradores.

Tabla 1. Recomendaciones sugeridas de fertilización fosfatada para trigo según niveles de P extractable (ppm P Bray, 0-20 cm) y rendimiento objetivo (t/ha).

Nivel de P extractable (P Bray 0-20 cm)	Dosis de suficiencia (kg P*/ha)	Dosis de reconstrucción y/o mantenimiento (kg P*/ha)
Menor de 10 ppm	20-25	$((20 - P \text{ Bray}) * 3 \text{ kg P/ppm}) + (t/\text{ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$
10-15 ppm	15-20	$((20 - P \text{ Bray}) * 3 \text{ kg P/ppm}) + (t/\text{ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$
15-20 ppm	10-15	$(t/\text{ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$
20-25 ppm	5-10	$(t/\text{ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$
25-30 ppm	-	$(t/\text{ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$
Más de 30 ppm	-	No fertilizar, muestrear año siguiente

*Para transformar de P a P₂O₅ multiplicar por 2,29.

A modo de ejemplo, supongamos un lote con 9 ppm P Bray y un rendimiento objetivo de 5000 kg/ha:

- Dosis de *Suficiencia* sugerida sería de 20 kg P/ha.
- Dosis de *Reconstrucción y/o Mantenimiento*:

$$\text{Dosis P} = ((20 - 9) * 3) + (5 \text{ t/ha} * 3.2 \text{ kg P/t})$$

$$\text{Dosis P} = (33 \text{ kg P/ha}) + (16 \text{ kg P/ha})$$

$$\text{Dosis P} = 49 \text{ kg P/ha}$$

En el caso de *Reconstrucción y/o Mantenimiento* lo recomendado es aportar los kg de P de reconstrucción a lo largo de 3-6 años de manera de reducir las cantidades aplicadas por cultivo. Esto reduce el costo financiero y la posibilidad de que se produzca un consumo excesivo de P (*consumo de lujo*). En el ejemplo anterior, los 33 kg P de reconstrucción se podrían aplicar en dosis sucesivas de 11 kg P/ha en tres años.

Respecto a la *forma de aplicación de P*, existen varios trabajos que han demostrado, para suelos con bajo nivel de P Bray y/o para dosis bajas de fertilización, una mayor eficiencia de la aplicación en la línea respecto al voleo. Las diferencias entre sistemas de aplicación es menor cuando mayor es el nivel de P Bray del suelo o la dosis de P aplicada. Las aplicaciones al voleo anticipadas alcanzan eficiencias similares a la aplicación en línea con P Bray de 10 ppm o mayor y con dosis de 20 kg/ha de P o mayores. Son especialmente útiles en planteos de *Reconstrucción y/o Mantenimiento* que generalmente utilizan dosis de fertilización altas.

Azufre, el potenciador

La deficiencia de S se ha generalizado en numerosos sistemas de trigo y especialmente en trigo/soja. La principal reserva de S del suelo es la materia orgánica, al igual que la de N y una gran parte del P. El diagnóstico se basa en identificar los lotes deficientes a partir de las siguientes observaciones:

- Caracterización del ambiente.
- Suelos con bajo contenido de materia orgánica, suelos arenosos.
- Sistemas de cultivo mas intensivos, disminución del contenido de materia orgánica.
- Análisis de S-sulfato: Nivel crítico menor de 10 ppm (0-20cm).
- Presencia de napa o uso de riego: Frecuentemente las napas y las aguas de riego pueden contener altos niveles de sulfato. Algo similar se observa en suelos con tosca por acumulación de sulfato.
- Balances de S en el sistema: Buscar balances neutros o levemente positivos.

Para la región pampeana, trabajos realizados por INTA han determinado un umbral crítico a la siembra del cultivo de 45 kg S ha⁻¹ (0-60 cm), siendo correcto el diagnóstico en el 79% de los casos estudiados (**Fig. 7**). Además, para el sudeste bonaerense, el Nan podría contribuir a identificar lotes con problemas de S siendo el nivel crítico de 62 ppm (**Fig. 6**). Asimismo, el análisis de grano puede ser empleado para caracterizar el estatus azufrado que tuvo el cultivo, y programar la fertilización para los cultivos subsiguientes en la rotación.

Al igual que para N, la aplicación de S puede realizarse a la siembra o en estadios avanzados del cultivo debido a la absorción demorada de dicho nutriente. Además, dada la residualidad de S, se puede aprovechar para aplicar todo el S de la secuencia trigo/soja de segunda al momento de fertilizar el trigo.

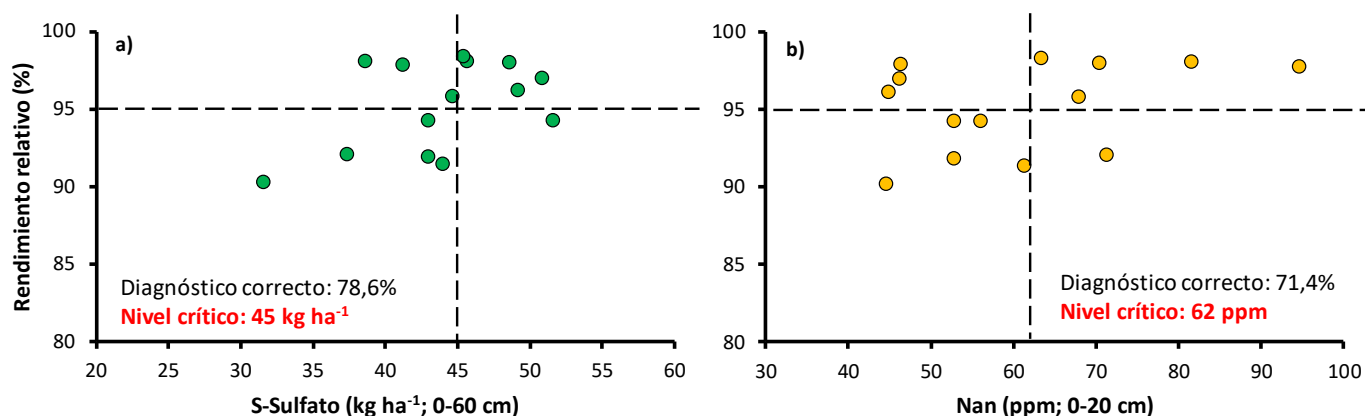


Figura 7. Rendimiento relativo de trigo en función de: a) S-sulfato y b) Nan en presiembra. Fuente: W. Carciochi-Grupo Relación Suelo-Cultivo (Unidad Integrada Balcarce).

Análisis de granos: una ayuda para el próximo cultivo

Conocer la concentración de nutrientes en el grano puede indicarnos si hicimos un manejo correcto de la nutrición del cultivo. Por ejemplo, por debajo de 9.6% (1.68% N) de proteína se pierde 10% de rendimiento cada 0.6% de caída de proteína. Se han sugerido las siguientes concentraciones de nutrientes en grano para cultivos de trigo sin limitaciones nutricionales:

N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
----- % -----						----- ppm -----				
2.1	0.4	0.4	0.04	0.3	0.2	11	6	117	10	22

¿Y los números dan?

Los niveles de **EFICIENCIA** más frecuentes de uso de los nutrientes en la región pampeana varían de 10 a 30 kg grano por kg de N aplicado; de 40 a 60 kg grano por kg de P y 40 a 80 kg grano por kg de S en ambientes con deficiencias de nutrientes. El **COSTO** (kg grano necesarios para pagar un kg de nutriente) varía históricamente entre 5 y 10 kg/kg para N, de 16 a 24 kg/kg para P y de 8 a 12 kg/kg para S. Esto evidencia la **RENTABILIDAD** de la práctica de fertilización, aún sin considerar el efecto residual de cada nutriente. Además, considerando los niveles actuales de extracción de los distintos nutrientes mencionados, la residualidad en el suelo, sobre todo de P y de S, y el reciclaje a través de los residuos de cosecha, es fundamental empezar a manejar la fertilización en función del balance de nutrientes dentro de la rotación para una agricultura sustentable.

Para una correcta definición de la estrategia de fertilización, es indispensable realizar un muestreo de suelo representativo y ajustar las recomendaciones en función de los resultados de los análisis químicos, integrándolos con variables de manejo y factores productivos que condicionan el rendimiento del cultivo.