

Dosis y fuentes de Nitrógeno-Azufre y Zinc en una secuencia trigo-soja en el medio-oeste bonaerense. La Trinidad, General Arenales

**Área de Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino,
Proyecto Regional Agrícola, Campañas 2009 y 2010.**

**Ings. Agrs. Gustavo N. Ferraris⁽¹⁾, Fernando Mousegne⁽²⁾ y Marcelo López de Sabando⁽²⁾
Lucrecia A. Couretot⁽¹⁾,**

*1. Área de Desarrollo Rural INTA EEA Pergamino. Av Frondizi km 4,5 (2700) Pergamino 2.AER San Antonio de Areco.
nferraris@pergamino.inta.gov.ar*

Introducción

En la Región Pampeana Argentina, nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) limitan los rendimientos en un grado variable según la región, cultivo y nivel de rendimiento. Para los cereales de invierno, la genética y el ajuste en prácticas de manejo como el almacenaje de agua en el suelo, el uso de modelos de fertilización o el control de enfermedades son medidas de singular importancia con el objetivo de obtener altos niveles de rendimiento, un grano de calidad, y un sostener la producción de cultivos de segunda sin deficiencias nutricionales. Aunque se acepta que fertilizar correctamente el primer cultivo mejora la productividad del siguiente, los incrementos deben cuantificarse periódicamente para adecuarlos a nuevas prácticas de cultivo y niveles crecientes de rendimiento. Por otra parte, esta secuencia intensiva podría inducir carencias de nuevos elementos, que hasta el momento han tenido un balance netamente negativo.

El objetivo de este trabajo fue: 1) Evaluar el efecto de la fertilización con NS, combinando fuentes y dosis, sobre la productividad de trigo en siembra directa. 2) Estudiar el efecto de estrategias novedosas como el agregado de N y zinc (Zn) foliar, en forma complementaria a la fertilización inicial del cultivo. 3) Cuantificar la residualidad de estas estrategias sobre soja de segunda.

Materiales y métodos

Durante dos años consecutivos, se realizaron experimentos de campo en la Escuela Agrotécnica Salesiana “Concepción G. de Unzué” situada en La Trinidad, partido de General Arenales. Los suelos del sitio corresponden al límite sur de la Serie Rojas, Argiudoles típicos transicionales a los Hapludoles. En los ensayos se evaluaron diferentes estrategias de fertilización nitrógeno-azufrada, que incluyeron sólidos y líquidos, aplicadas en su totalidad en el cultivo de trigo. Todo el sitio fue fertilizado de manera uniforme con 100 kg ha⁻¹ de superfosfato triple (0-20-0), a la siembra de trigo. La soja de segunda no fue fertilizada. Los experimentos fueron conducidos con un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. La descripción de los tratamientos y la dosis de NS aportada se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Tratamientos evaluados en el ensayo.

Trat	Fuente	Momento de aplicación	Nivel N (suelo + fertilizante)	Dosis de S (kg ha ⁻¹)	Dosis de N foliar o Zinc (kg ha ⁻¹)
T1	Testigo				
T2	Urea (46-0-0)	siembra	100		
T3	UAN (32-0-0)	siembra	100		
T4	Urea + Yeso (0-0-0-S18)	siembra	100	20	
T5	UAN + TSA (12-0-0-S26)	siembra	100	20	
T6	Urea (46-0-0)	siembra	140		
T7	UAN (32-0-0)	siembra	140		
T8	Urea + Yeso (0-0-0-S18)	siembra	140	20	
T9	UAN + TSA (12-0-0-S26)	siembra	140	20	
T10	UAN + TSA + Nfoliar (20-0-0)	Siembra + antesis	100	20	N20
T11	UAN + TSA + Nfoliar (20-0-0)	Siembra + antesis	140	20	N20
T12	UAN + TSA + Nfoliar + Sulfato Zinc (0-0-0-Zn20)	Siembra + antesis	140	20	N20 + Zn 0,3

En 2009, el ensayo fue sembrado el día 18 de Julio, en siembra directa. El antecesor fue soja de primera y el cultivar elegido Nidera Baguette 9. La disponibilidad inicial de agua fue muy baja (30 mm de agua útil, medido a 1 m de profundidad). La soja de segunda se implantó el día 23 de Diciembre, siendo la variedad DM 4970 RR. La siembra fue demorada desde la cosecha del trigo por la ocurrencia de lluvias torrenciales que recargaron completamente el perfil.

En 2010, el ensayo se sembró el día 13 de Julio, también en siembra directa. En este segundo año, la dotación inicial de agua a la siembra fue muy superior en comparación con el año anterior, totalizando 105 mm (1 m de profundidad). La implantación de soja de segunda se realizó el 18 de Diciembre, con ajustada humedad en el suelo. Las variedades de trigo y soja fueron las mismas del año precedente.

Previo a la siembra, se realizó un análisis químico de suelo por bloque, cuyos resultados promedio se expresan en la Tabla 2. La disponibilidad de N en suelo se sumaría al fertilizante hasta llegar al nivel deseado.

Tabla 2: Análisis de suelo al momento de la siembra

Profundidad	pH	Materia Orgánica	P-disp.	N-Nitratos 0-20, 20-40, 40-60 cm	N-Nitratos suelo 0-60 cm	S-Sulfatos suelo 0-60 cm
cm	agua 1:2,5	%	Ppm	ppm	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Año 2009	6,0	3,09	19,0	18-7-3,5	74,1	25,3
Año 2010	6,0	2,22	8,1	11-8-4	58,7	20,4

La cosecha de ambos cultivos se realizó en forma manual, con trilla estacionaria de las muestras. Se estimó N en hoja bandera mediante una medida adimensional no destructiva con Spad, y el vigor de planta y cobertura en hoja bandera expandida (Z39). A la cosecha de trigo, se midió biomasa total y rendimiento. Mediante un análisis químico se determinó la concentración de N en grano, permitiendo calcular proteína en %. A la cosecha de soja se determinó rendimiento, obteniendo así la productividad acumulada de la secuencia. Para el estudio de los resultados se realizaron análisis de la varianza (ANVA), comparaciones de medias y análisis de regresión.

Resultados y discusión

A) Algunas características salientes de la campaña

En la Tabla 3 se presenta el cociente fototermal (Q) (Fisher, 1985) para las últimas 6 campañas agrícolas de trigo. Este término representa la relación existente entre la radiación efectiva diaria en superficie y la temperatura media diaria, y es una medida del potencial de crecimiento por unidad de tiempo térmico de desarrollo. El mismo fue favorable durante 2009 y 2010 (Tabla 3). Los rendimientos superiores de este último año con relación a 2009 se explican en una mejor condición hídrica, producto de mayor almacenaje de agua al momento de sembrar el cultivo.

Tabla 3: Insolación efectiva (hs), Temperatura media (C°) y Cociente fototermal Q (T base 0°C) para el período crítico del cultivo de Trigo en la localidad de Pergamino. Se tomó entre 15 de setiembre al 15 de Octubre durante los años 2005 a 2009, y del 1 al 30 de Octubre en 2010, por encontrarse las etapas desfasadas en el tiempo durante esta campaña.

Condiciones ambientales	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010
Insolación Efectiva media (hs)	7,2	7,1	5,9	6,9	8,3	7,45
T media del período °C	15,1	17,1	15,0	16,4	13,4	14,8
Cociente fototermal (Q) (Mj m ⁻² día ⁻¹ °C ⁻¹)	1,24	1,10	1,12	1,10	1,56	1,34

B) Rendimientos y otras variables de cultivo en trigo

B1. Trigo. Año 2009.

En la Tabla 4 se presentan los datos de las variables evaluadas en Trigo.

Tabla 4: Cobertura e índice de vigor en hoja bandera, fitotoxicidad de aplicaciones foliares, materia seca acumulada en madurez, rendimiento de grano, proteína (%) y significancia estadística de las variables medidas en el ensayo. Fertilización nitrógeno-azufrada en una secuencia trigo-soja. La Trinidad, General Arenales, campaña 2009/10.

Trat	Cobertura en Z39	Indice de vigor	Unidades Spad	Fitotoxicidad	M. seca cosecha	Rendimiento (kg/ha)	Proteína (%)
T1	93,6	3,0	39,9		3535	1996	10,1
T2	96,6	3,6			3447	1983	10,6
T3	96,2	3,5	41,4		3758	2311	11,1
T4	96,7	3,9	41,5		4232	2243	11,2
T5	96,2	3,8			3881	2091	11,0
T6	96,4	3,9			4171	2199	11,0
T7	96,1	3,9	44,9		4714	2572	11,1
T8	96	3,8			4253	2213	11,0
T9	96,8	4,1	44,4		4386	2357	10,9
T10	98,6	4,2		0	4499	2385	11,7
T11	96,2	4,1		0	5185	2802	11,4
T12	97,8	4		2,3	4869	2674	11,8

Escala de fitotoxicidad: 0-100. Los valores observados en el T12 son pasajeros y apenas detectables, sólo apreciables por un observador experimentado, en presencia del contraste con testigos no tratados.

Índice de vigor: 1: Malo 2: Regular 3: Bueno 4 Muy bueno 5: Excelente. Para elaborar el índice de vigor se tomó como base la cobertura, altura de la planta, intensidad de verde y uniformidad de la parcela.

Cobertura: La evaluación de cobertura se realizó mediante el procesamiento de imágenes digitales

El N fue el nutriente con mayor impacto sobre trigo. Dosis crecientes aumentaron el vigor, índice Spad, materia seca y rendimiento (Tabla 4 y Figura 3). Su limitación llegó al punto de permitir respuesta contrastando dosis (N140 vs N100) pero también al agregado de N foliar (Figura 4). Adicionalmente, la aplicación de N foliar permitió incrementar la concentración de proteína (%) en grano, en un rango de 0,5 a 0,7 %. La combinación de respuesta en rendimiento y proteína permite concluir que el N fue absorbido en forma eficiente por el cultivo, sin provocar fitotoxicidad a excepción del tratamiento con uso conjunto de Zinc (Zn), en el cual los síntomas fueron leves. Despejando otros nutrientes, no se observó respuesta a Zn en trigo, aunque fue un tratamiento de rendimiento elevado y el de mayor concentración de proteína.

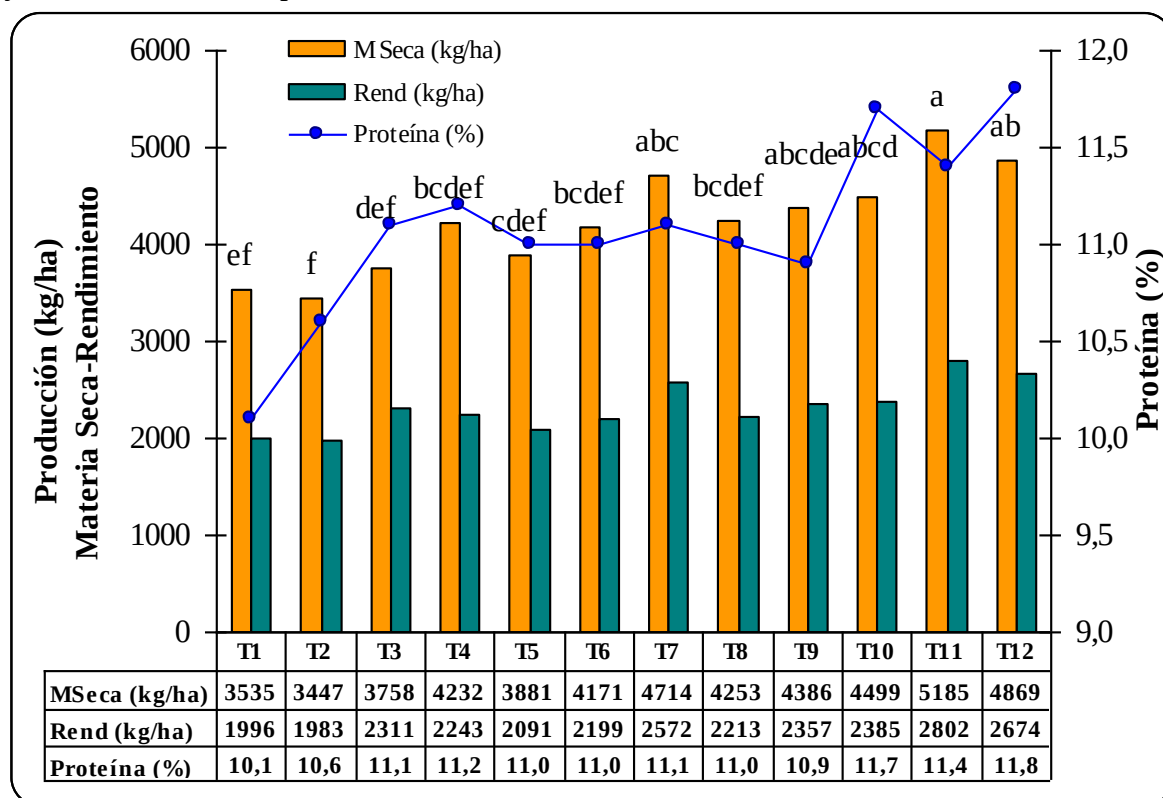


Figura 1: Producción de materia seca, grano (kg ha^{-1}) y proteína (%) de estrategias combinando niveles y fuentes de nitrógeno y azufre en trigo. Para materia seca, letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$). La Trinidad, General Arenales. Campaña 2009/2010.

B2. Trigo. Año 2010

En la Tabla 5 se presentan los datos de las variables evaluadas en el segundo cultivo de Trigo.

Tabla 5: Cobertura e índice de vigor en hoja bandera, fitotoxicidad de aplicaciones foliares, materia seca acumulada en madurez y rendimiento de grano. Fertilización nitrógeno-azufra en una secuencia trigo-soja. La Trinidad, General Arenales, campaña 20010/11.

Trat	Cobertura en Z39	Índice de vigor	Unidades Spad	Fitotoxicidad	M. seca cosecha	Rendimiento (kg/ha)
T1	80,4	3,5	36,0		16630	3534
T2	92,3	3,8	41,2		20761	4003
T3	93,8	3,8	41,2		20652	4663
T4	> 95%	3,9	37,7		22283	4789
T5	> 95%	4,1	41,3		22935	5313
T6	> 91,4%	3,9	44,0		21630	4248
T7	> 95%	3,9	44,8		22391	4479
T8	> 95%	4,3	43,0		23261	6323
T9	> 95%	4,3	39,7		22174	6290
T10	> 95%	4,2	43,7	0	20870	5279
T11	> 95%	4,2	44,0	0	21739	5715
T12	> 95%	4,4	44,2	0	23261	6123

Escala de fitotoxicidad: 0-100. Con mejor contenido de humedad en suelo y temperaturas más frescas no se observaron síntomas a causa de las aplicaciones foliares.

Índice de vigor: 1: Malo 2. Regular 3.Bueno 4 Muy bueno 5: Excelente. Para elaborar el índice de vigor se tomó como base la cobertura, altura de la planta, intensidad de verde y uniformidad de la parcela.

Cobertura: La evaluación de cobertura se realizó mediante el procesamiento de imágenes digitales

En esta segunda campaña, los rendimientos medios fueron más elevados, alcanzando a 5263 kg ha⁻¹ vs 4244 kg ha⁻¹ en 2009. Asimismo, la deficiencia de N más marcada. Tanto N como S fueron nutrientes de gran relevancia. El pasar a una disponibilidad de 140 kg N total permitió aumentar el vigor, cobertura, índice Spad, materia seca y rendimiento (Tabla 5 y Figura 2). Sin embargo, el aporte más importante fue dado por la inclusión de azufre, independientemente de la fuente utilizada. Por otra parte, el uso de N foliar no otorgó una ventaja significativa en los rendimientos, alcanzando su máximo cuando se lo combinó con Zn foliar (Figura 2).

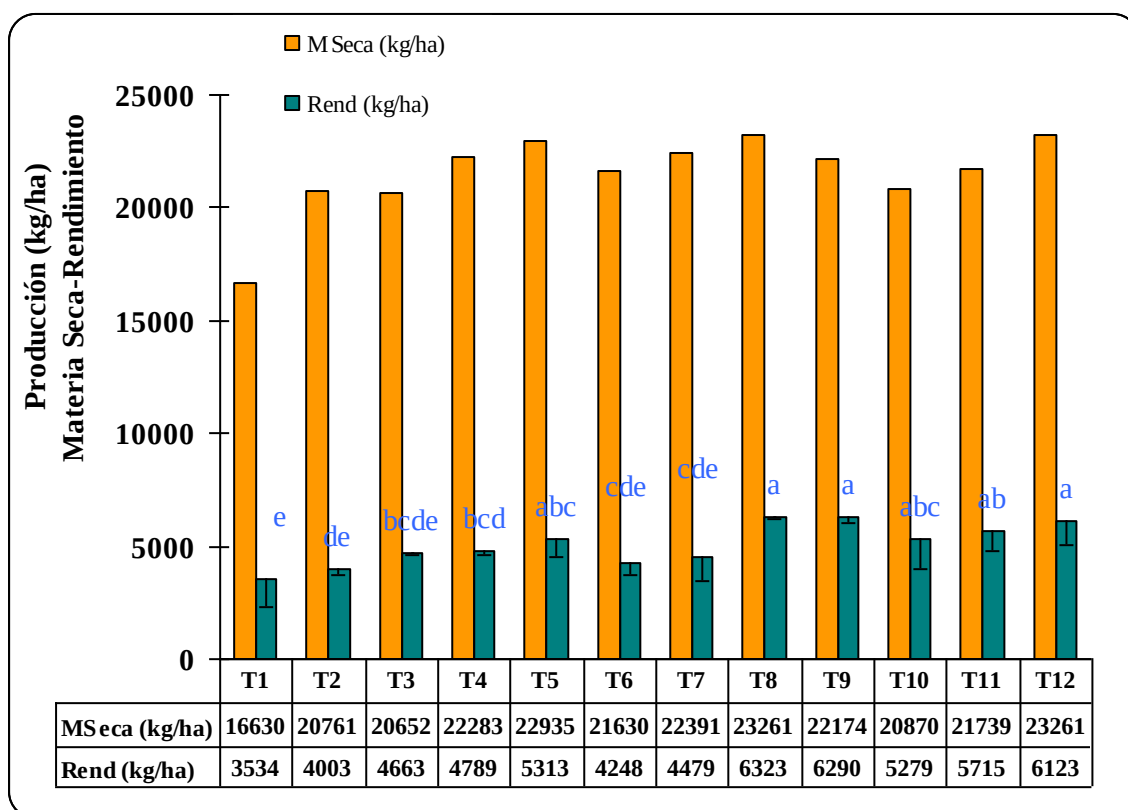


Figura 2: Producción de materia seca y grano de estrategias combinando niveles y fuentes de nitrógeno, azufre y zinc en trigo. Para rendimiento, letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$). La Trinidad, General Arenales. Campaña 2010/2011.

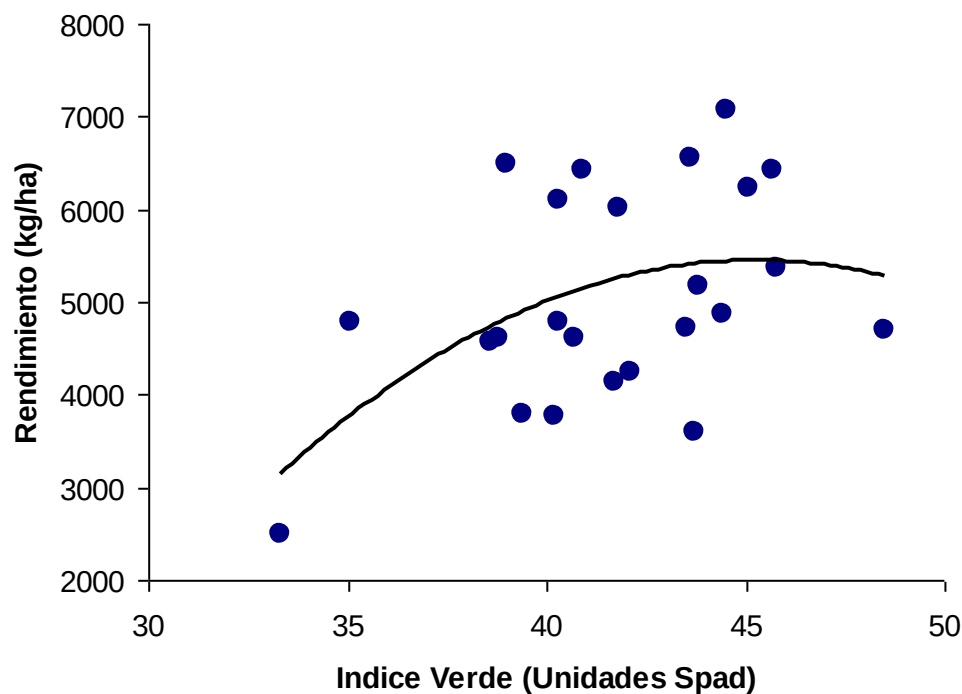


Figura 3: Relación entre Rendimiento y Unidades Spad medido en hoja bandera de trigo en el estado de Zadoks 39. La Trinidad, General Arenales. Campaña 2010/2011.

Para este segundo año de análisis, se determinó una relación, aunque de bajo ajuste, entre Rendimiento y Unidades Spad en el estado de hoja bandera. De acuerdo con esta relación, un valor de Spad menor a 45 unidades indicaría una caída en los rendimientos del cultivo (Figura 3). En experimentos anteriores, ha resultado dificultoso hallar relaciones entre estas variables, lo que sucedería porque la variabilidad en los rendimientos entre ensayos es superior a la observada en los valores Spad. Es decir, para valores similares de Spad, es posible hallar rendimientos muy diferentes. Por otra parte, la observación del estado fenológico y la lectura de Spad suelen estar sesgadas por el observador, y afectadas por variables externas como variedad, condición ambiental o nivel hídrico. Sólo alguno de estos desvíos puede ser atenuado por la expresión de resultados en términos de rendimiento relativo. Sin embargo, la mayoría de ellos desaparece cuando se analiza un ensayo en particular, o un grupo de ensayos similares, en cuanto a campaña, localización geográfica y genotipo utilizado.

Un análisis conjunto de los resultados permite concluir que N fue en 2009 el elemento limitante por excelencia, mientras que en 2010 este lugar fue ocupado por S. Una evaluación a través de los rendimientos relativos, permite detectar incrementos en los rendimientos medios al aumentar la dosis de N, pero a su vez una interacción positiva con S. Cuando N y S se agregaron en forma conjunta, el incremento en el nivel de N de 100 a 140 kg ha⁻¹ permitió aumentos notorios en los rendimientos. Por el contrario, las diferencias fueron discretas en ausencia de S (Figura 4).

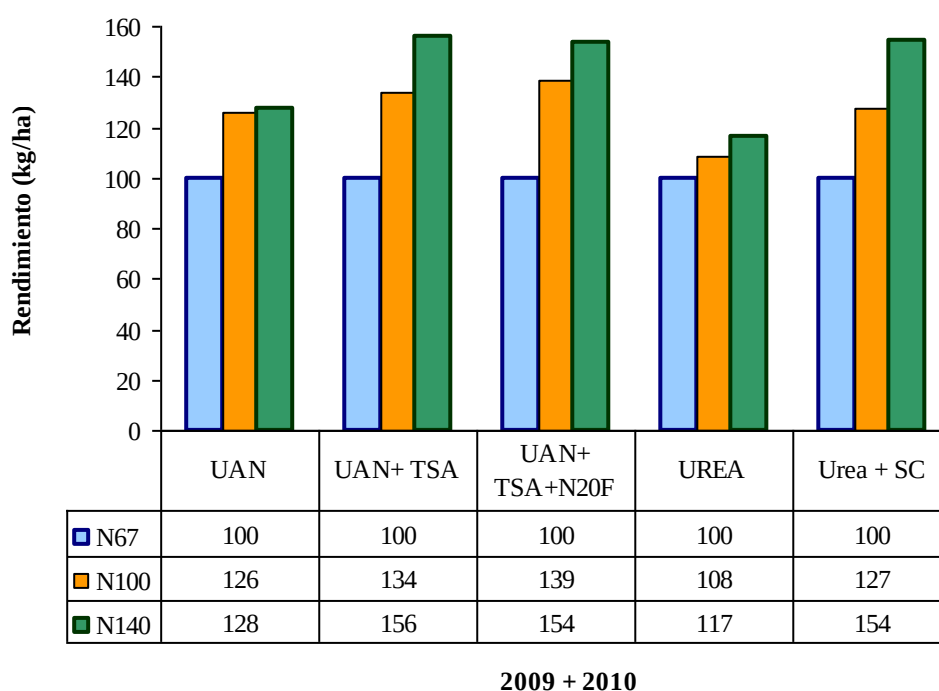


Figura 4: Rendimiento de trigo a niveles crecientes de nitrógeno, según fuente y uso adicional de azufre y nitrógeno foliar. La Trinidad, General Arenales. Campañas 2009/10 y 2010/11.

C) Efectos residuales de la fertilización en soja de segunda

C1. Soja Año 2009/10

Se determinaron diferencias significativas en los rendimientos ($P=0,023$, $cv=6,2\%$) como resultado del efecto residual de los fertilizantes aplicados en trigo. El tratamiento de mayor productividad fue el que reunió el uso de N, S y Zn, que además resultó ser el de mayor rendimiento en la secuencia (Figura 5). Los tratamientos T12, T2, T10, T9 y T5 superaron estadísticamente al testigo. A excepción de T2, todos tuvieron como característica común el aporte de S en trigo.

La productividad acumulada de los dos cultivos mostró una tendencia creciente y aditiva. Cuando los nutrientes son limitados en una rotación intensiva, los factores de cultivo adquieren menor importancia, ya que si no se expresaran en el primer cultivo a causa de limitaciones a la productividad, su efecto residual impactaría sobre los siguientes, como se verifica en este ensayo. Las diferencias de rendimiento no alcanzaron la significancia estadística, probablemente a causa de su variabilidad en el cultivo de invierno. El cultivo de soja perteneciente a la campaña 2010/11 no fue cosechado al momento de elaborar el presente informe.

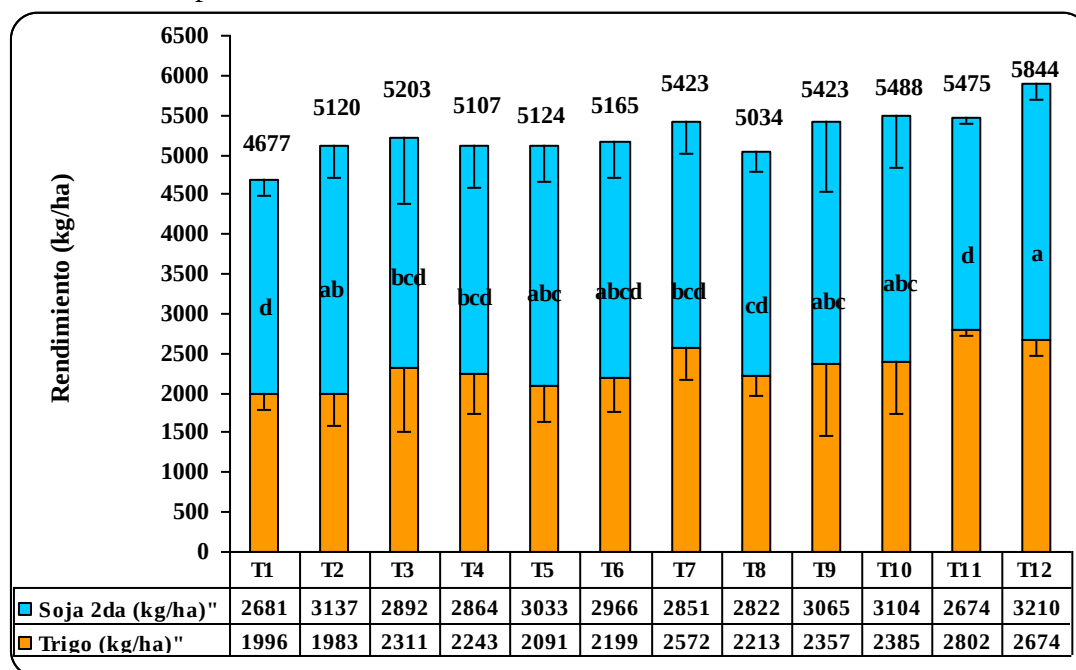


Figura 5: Rendimiento en la secuencia trigo-soja de segunda de diferentes estrategias combinando niveles y fuentes de nitrógeno, azufre y zinc. Letras distintas representan diferencias significativas en los rendimiento de soja ($P<0,05$). Las barras de error indican la desviación standard de la media. La Trinidad, General Arenales. Campaña 2009/10.

Incrementos en los rendimientos de trigo no necesariamente implican menores rendimientos de soja. A niveles bajos de productividad, la relación entre ambos cultivos fue negativa, demostrado por la primera parte de una función cuadrática (Figura 6). Sin embargo, la parte final de la curva muestra una pendiente positiva: niveles de suficiencia nutricional pemiten incrementar los rendimientos de ambos cultivos de manera asociada.

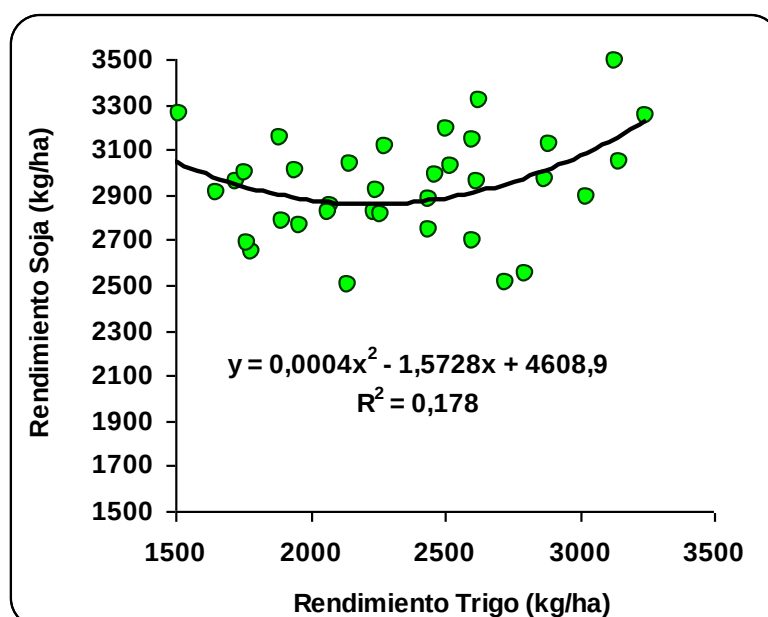


Figura 6: Relación entre los rendimientos parcelarios de trigo y soja de segunda en una secuencia de cultivos. La Trinidad, Campaña 2009/10.

C2. Soja Año 2010/11

Se determinaron diferencias significativas en los rendimientos ($P=0,023$, $cv=6,2\%$) como resultado del efecto residual de los fertilizantes aplicados en trigo. El tratamiento de mayor productividad fue el que reunió el uso de N, S y Zn, que además resultó ser el de mayor rendimiento en la secuencia (Figura 7). En este experimento, se detectó una fuerte respuesta a S, siendo el rendimiento medio del Testigo de 2527 kg ha^{-1} , el rendimiento medio de los tratamientos sin S de 2833 kg ha^{-1} , alcanzando a igualdad de otros factores a 3041 kg ha^{-1} cuando se agregó S, independientemente de la fuente.

La productividad acumulada de los dos cultivos nuevamente mostró una tendencia creciente y aditiva, superando holgadamente la campaña precedente (Figura 7). Probablemente esta alta expresión de rendimiento contribuyó a que se determinaran diferencias estadísticamente significativas por efecto de nutrición en ambos cultivos de la secuencia (Figura 7).

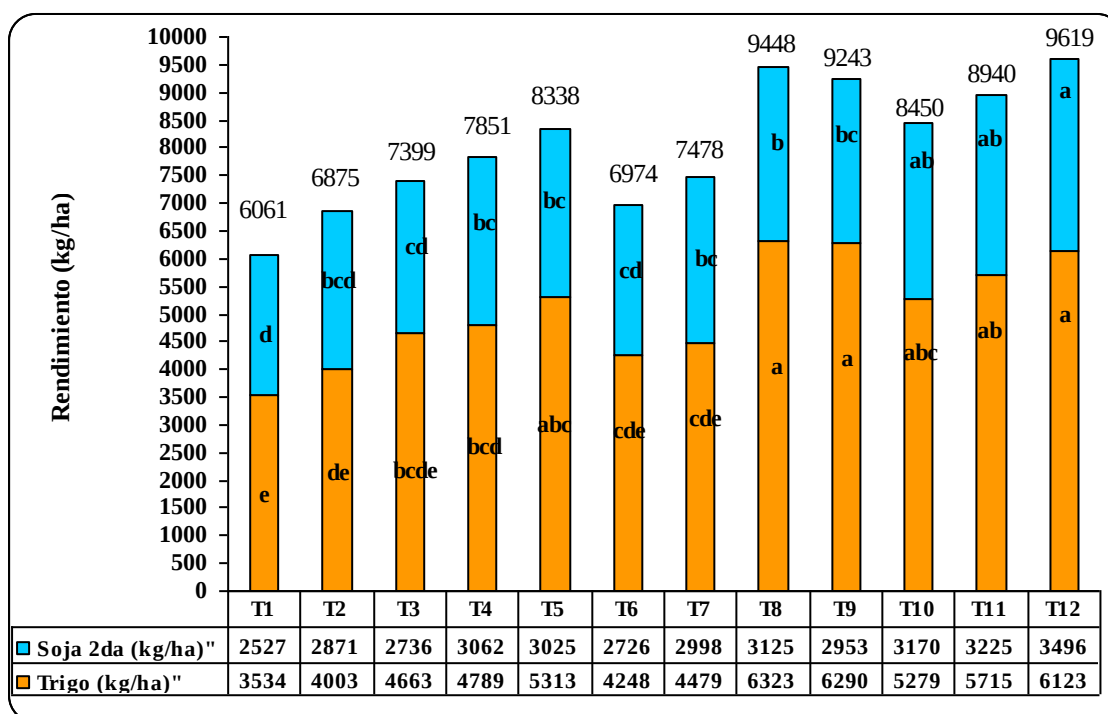


Figura 7: Rendimiento en la secuencia trigo-soja de segunda de diferentes estrategias combinando niveles y fuentes de nitrógeno, azufre y zinc. Letras distintas representan diferencias significativas en los rendimientos de soja ($P < 0,05$). Las barras de error indican la desviación standard de la media. La Trinidad, General Arenales. Campaña 2010/11.

Las condiciones favorables del ciclo 2010, sin estrés hídrico severo, posibilitó una asociación positiva entre rendimientos de trigo y soja (Figura 8).

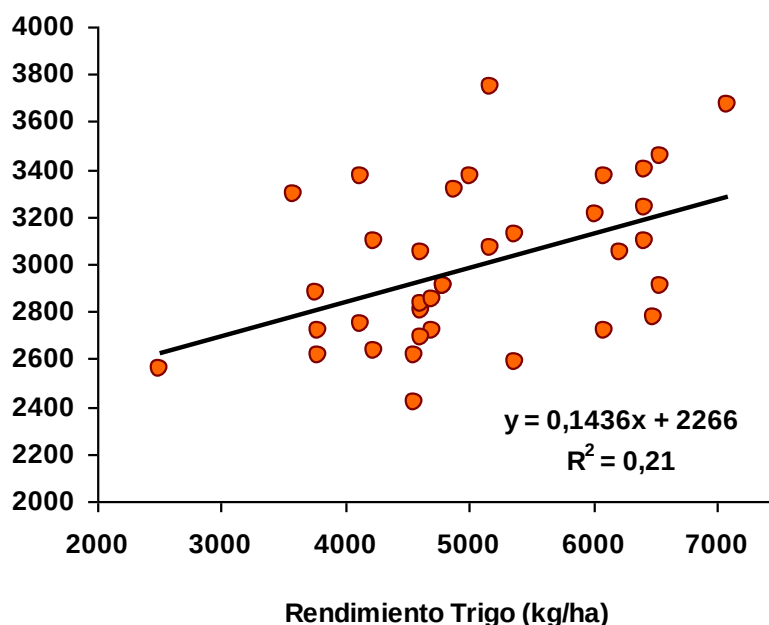


Figura 8: Relación positiva entre los rendimientos parcelarios de trigo y soja de segunda en una secuencia de cultivos. Campaña 2010/11.

Consideraciones finales

- En 2009, N fue el elemento más limitante en trigo, permitiendo incrementar el vigor de planta, índice Spad, materia seca y rendimiento, este último en aplicaciones tanto al suelo como por vía foliar en dosis más restringidas.
- Para la campaña 2010/11, S fue el nutriente de mayor relevancia. El efecto de S sobre trigo durante este segundo ciclo afectó la tendencia global de los ensayos, la cual indica que es posible obtener incrementos de rendimiento hasta la dosis máxima evaluada de 140 kgN ha^{-1} , siempre que no se registren carencias de otros nutrientes esenciales como S.
- La calidad del grano pudo ser mejorada por medio de aplicaciones foliares, obteniendo entre 0,5 y 0,7 % de mejora en la concentración proteica del grano.
- En 2009, no se verificó respuesta directa a Zn en trigo, pero sí respuesta residual de 145 kg ha^{-1} en soja de segunda. De manera global, este tratamiento fue el de mayor concentración de proteína y el de mayor rendimiento en la secuencia. En 2010 el Zn maximizó la productividad de ambos cultivos de la secuencia.
- Se determinaron diferencias significativas en los rendimientos de soja, por efecto residual de los fertilizantes aplicados en trigo. Asimismo, la tendencia en los rendimientos de la secuencia fue creciente con los niveles de fertilización.
- Bajo suficiencia nutricional y agua no limitante, es posible obtener relaciones positivas entre los rendimientos de trigo y soja de segunda.