



XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ



EFFECTOS DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN SOBRE LOS RENDIMIENTOS DE MAÍZ, SOJA, TRIGO Y CEBADA, Y LA RENTABILIDAD EN EL LARGO PLAZO

LONG-TERM EFFECTS OF DIFFERENT FERTILIZATION STRATEGIES ON CROP YIELD AND PROFITABILITY

G.N. Ferraris¹, N. Ferrero², F. Mousegne³, E. Ciarlo^{4,5}

¹INTA Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, ²El Ceibo Cereales S.A,

³Universidad de San Antonio de Areco, ⁴Universidad de Buenos Aires, ⁵Fertilizar Asociación Civil.

* Contacto: ferraris.gustavo@inta.gob.ar

ABSTRACT

Over a twenty-year, five fertilization strategies based on different fertilization management were compared. Nutrient replacement and soil nutrient build-up strategies increased crop yields, particularly in cereal crops. Profitability did not differ consistently among treatments during the first four years; however, from the fifth year T2, representing the current standard fertilization practice, became less competitive. After ten years, higher fertilization inputs resulted in greater profitability due to the progressively larger differences in crop productivity. These findings demonstrate that improving fertilization management has an increasing positive impact on both crop productivity and long-term profitability.

Palabras clave: Fósforo, Azufre, residualidad, sustentabilidad

Keywords: Phosphorus, Sulfur, residual effect, sustainability.

INTRODUCCIÓN

A nivel productivo, las deficiencias de nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) no ocurren de manera aislada, sino que se combinan de diversas maneras, por lo que es necesario evaluar integralmente la respuesta a la fertilización y conocer su efecto en el largo plazo (Weeks et al., 2019). Con el propósito de estudiar la evolución en el tiempo de los rendimientos, el balance de nutrientes, las propiedades del suelo y los resultados económicos se diseñó un ensayo de estrategias de fertilización NPS en la secuencia maíz-soja-trigo/soja-cebada/soja (Mz-Sj-Tr/Sj-Ce/Sj). El proyecto se inició en la campaña 2006/07, con maíz como el primer cultivo, llegando a dieciocho campañas completas en 2023/24. En este escrito se reporta el efecto de las diferentes estrategias de fertilización NPS sobre: 1) los rendimientos anuales durante el período 2006/07 a 2025/26; 2) los rendimientos acumulados, y 3) el análisis económico período 2006/07-2025/26.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo es conducido en la localidad de Arribeños, partido de General Arenales. Se plantea en un diseño en bloques al azar, con cuatro repeticiones, integrando una rotación de seis cultivos en cuatro años (M-Sj-T/Sj-C/Sj). El inicio de la secuencia se realizó con el cultivo de maíz, durante la campaña 2006/07, llegando al vigésimo año en 2025/26, con el cultivo de maíz. Los tratamientos implican cinco manejos diferentes de fertilización, donde los fertilizantes son agregados en cobertura total al momento de la siembra (**Tabla 1**). Como fuentes se utilizaron superfosfato triple de calcio (0-20-0), superfosfato simple de calcio (0-9-0-12S) y urea granulada (46-0-0).



Tabla 1. Tratamientos y dosis (kg ha^{-1}) de N, P y S aplicados en promedio en los cultivos de Trigo/Soja – Maíz – Soja. En trigo y cebada se describen las demandas del doble cultivo, pero los fertilizantes fueron aplicados en su totalidad al primero. Estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2025/26, dieciocho años de experimentación.

Tratamiento	Criterio de fertilización	Nitrógeno (N) – Fósforo (P) – Azufre (S)					
		maíz	soja	trigo	soja 2 ^{da}	cebada	soja 2 ^{da}
T1	Testigo sin fertilización	0 – 0 – 0	0 – 0 – 0	0 – 0 – 0	0 – 0 – 0	0 – 0 – 0	0 – 0 – 0
T2	Tecnología Uso Actual	46 – 16 – 0	0 – 16 – 0	46 – 16 – 0	0 – 0 – 0	46 – 16 – 0	0 – 0 – 0
T3	Reposición PS Rendimiento objetivo medio	94 – 30 – 18	0 – 22 – 12	83 – 16 – 7	0 – 15 – 8	83 – 16 – 0	0 – 15 – 8
T4	Reposición PS Rendimiento objetivo alto	114 – 30 – 18	0 – 26 – 15	113 – 20 – 9	0 – 22 – 11	113 – 20 – 9	0 – 22 – 11
T5	Reposición S Reconstrucción P Rendimiento objetivo alto	114 – 46 – 18	0 – 42 – 15	113 – 36 – 9	0 – 22 – 11	113 – 36 – 9	0 – 22 – 11

A cosecha se evalúa el rendimiento de los cultivos. Se determinó el margen bruto (MB) por fertilización (anual y acumulado). Para cada campaña agrícola se calculó la diferencia de producción de granos (kg/ha) entre los distintos tratamientos de fertilización (TUA, Rep PS, Rep PS AR y Reconst) y el Testigo. Partiendo de dichos valores, se estimó el margen bruto de la fertilización ($\text{U\$S/ha}$) como la diferencia entre los ingresos adicionales y los costos de fertilización de cada tratamiento. Los ingresos acumulados se determinaron como la sumatoria de los ingresos originados por cada una de las estrategias de fertilización respecto del testigo y los costos acumulados como la sumatoria de los costos de fertilización para los distintos tratamientos realizados. Para el cálculo de ambos indicadores económicos, las secuencias T/Sj y C/Sj fueron consideradas como un solo cultivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

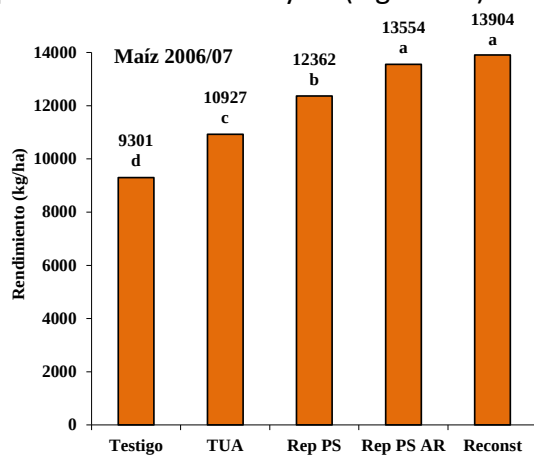
A. Efectos sobre los rendimientos anuales.

Anualmente, se determinaron diferencias significativas en los rendimientos de al menos un cultivo entre 2006/07 y 2023/24 (Figura 1). En el Maíz de 2006/07 los rendimientos máximos se alcanzaron por T4 y T5, los que a su vez superaron a T3, este a T2, y a la vez este a T1, respectivamente (Figura 1.a). En 2007/08 los rendimientos máximos fueron en T5, superando a T2, T3 y T4, y estos a T1 (Figura 1.b). En el ciclo siguiente, los cultivos estuvieron afectados por una fuerte sequía. En trigo, todos los tratamientos superaron al testigo, con el rendimiento máximo en T5. Los tratamientos de mayor fertilización permitieron leves mejoras en la concentración de proteína en grano. En la soja de segunda subsiguiente, T4 y T5 superaron a los tratamientos T1 y T2 (Figura 1.c). En el ciclo 2009/10 no se determinaron diferencias significativas en los rendimientos de cebada ($P > 0,10$), pero sí en soja de segunda, con el tratamiento T4 por encima de T2 y T5. A su vez, T4 y T3 superaron a T1 (Figura 1.d). El comienzo de un nuevo

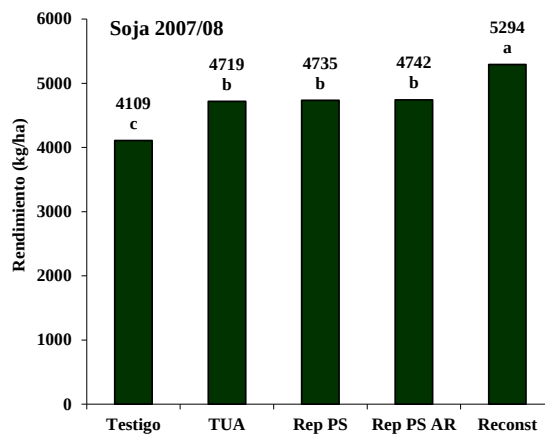


ciclo de rotación en 2010/11 trajo rendimientos de maíz máximos en T3, T4 y T5, estos a su vez superaron a T2, y éstos a T1 (Figura 1.e). Un resultado similar se determinó en 2011/12, donde todos los tratamientos superaron a T1 (Figura 1.f). En la cebada de la campaña 2012/13, nuevamente todos los tratamientos superaron a T1, sin cambios significativos en el % de proteína. Las diferencias fueron más marcadas en soja de segunda, donde T3, T4 y T5 alcanzaron rendimientos significativamente superiores a T2, y éstos a los de T1 (Figura 1.g). El Trigo de 2013/14 mostró rendimientos superiores en T5 vs T3, en T4 y T5 vs T2, y en T3, T4 y T5 vs T1, con una significativa ganancia de proteína. En soja de segunda, T3, T4 y T5 superaron a T1 (Figura 1.h). La soja de primera del ciclo 2014/15 alcanzó rendimientos superiores en T5 respecto de T1 y T2, y de T3, T4 y T5 en comparación con T1 (Figura 1.i). Durante la campaña húmeda 2015/16, los tratamientos T3, T4 y T5 alcanzaron rendimientos muy elevados, superando a T2, y este a T1, respectivamente. Sin embargo, el T5 alcanzó los niveles máximos de concentración de proteína. La soja de segunda mantuvo la tendencia, con T3, T4 y T5 en el escalón máximo de rendimiento (Figura 1.j). En la campaña 2016/17 el maíz mostró un comportamiento destacadísimo agrupando cuatro niveles de significancia estadística: T5 superior al resto, seguido por T3 y T4 en un nivel de equidad. Luego continuaron T2 y más abajo T1 con un rendimiento muy bajo y considerable brecha con los anteriores (Figura 1.k). En la campaña 2017/18 la soja evidenció diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,10$). El rendimiento máximo se obtuvo en los tratamientos T4 y T5, los cuales superaron al control (T1), a la vez de una tendencia incremental sobre T2 y T3 (Figura 1.l). Más adelante, el ciclo 2018/19 se caracterizó por una alta expresión de rendimiento y de los efectos de tratamiento. En trigo, se determinaron diferencias en (T2, T3, T4, T5) vs T1. Por su parte, en concentración de proteína se separaron un grupo de comportamiento superior (T3, T4, T5) vs otro inferior (T1, T2). Lo propio sucedió en los rendimientos de soja de segunda, donde se determinaron rendimientos crecientes en todo el rango de tratamientos (Figura 1.m). En el maíz de 2019/20 se determinó un incremento lineal en todo el rango de tratamientos evaluados, con el máximo estadístico en T4-T5 y el óptimo agronómico en T5 (Figura 1.n). En la soja del año 2020/21 la severa reducción de precipitaciones acontecida durante el verano no afectó los rendimientos máximos en los mejores tratamientos, ni limitó la expresión de respuesta a la fertilización. La estabilidad del cultivo se expresó al igualar estadísticamente los tratamientos T5, T4 y T3, este último con inferior productividad agronómica (Figura 1.o). Sin embargo, cuando la fertilización fue limitada o nula la caída en los rendimientos fue muy severa. En la campaña 2021/22, año muy favorable para los cultivos y la expresión de tecnologías, el rendimiento de trigo y soja de 2da expresaron diferencias significativas, con el máximo en T4. Algo similar ocurrió con la concentración de proteína (Figura 1.p). Las ventajas de T4 respecto de T5 no tiene una explicación aparente. En el ciclo extremadamente seco 2022/23, el más seco de la serie, afectó el experimento en menor medida al resto de la región, por el aporte de agua de napa, la fertilización y la excelencia del ambiente (Figura 1.q). En 2023/24 los tratamientos reconstrucción (T5) y reposición para altos rendimientos (T4) superaron a T3, y este a su vez al testigo absoluto (T1) (Figura 1.r). La campaña 2024/25 mostró rendimientos medios a buenos en trigo y extraordinarios en soja. En el primero, T4 y T5 obtuvieron el rendimiento máximo. Esto se repitió en T3, T4 y T5 en soja (Figura 1.s).

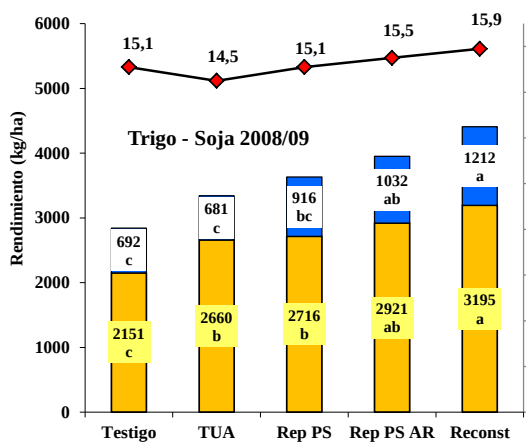
Finalmente, en el maíz 2025/26 se observaron tres grupos de datos, con la mayor performance en los T4 y T5 (Figura 1.t).



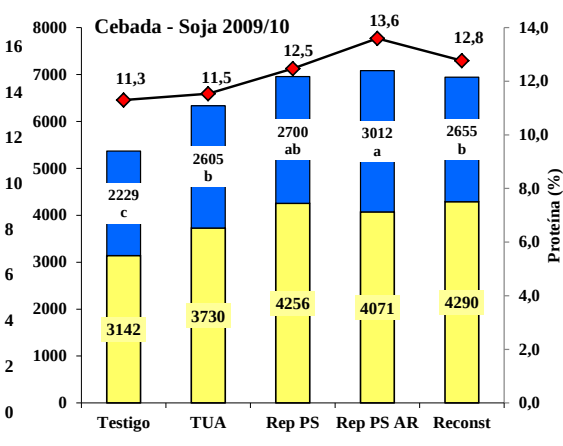
Estrategia de Fertilización
Figura 1.a



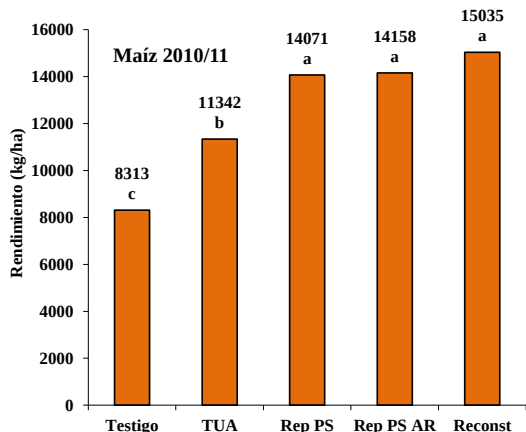
Estrategia de Fertilización
Figura 1.b



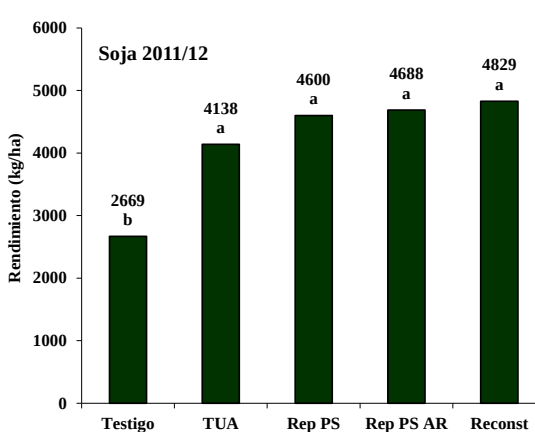
Estrategia de Fertilización
Figura 1.c



Estrategia de Fertilización
Figura 1.d



Estrategia de Fertilización
Figura 1.e



Estrategia de Fertilización
Figura 1.f

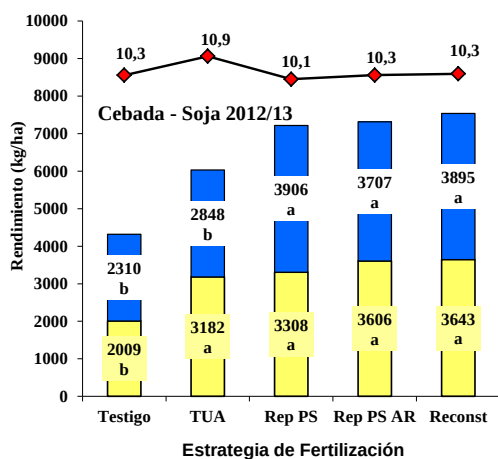


Figura 1.g

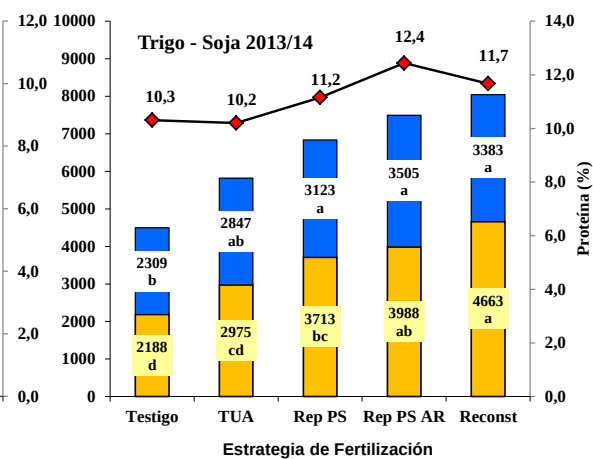


Figura 1.h

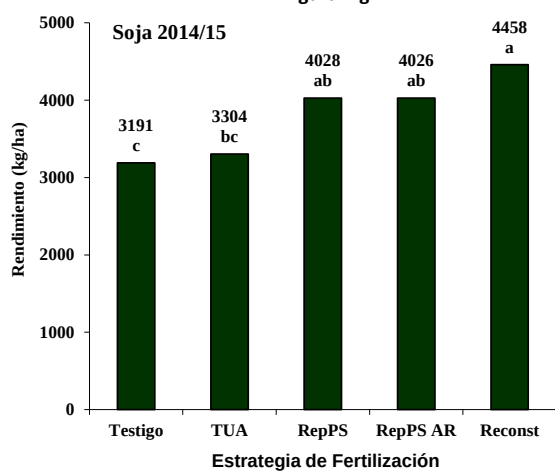


Figura 1.i

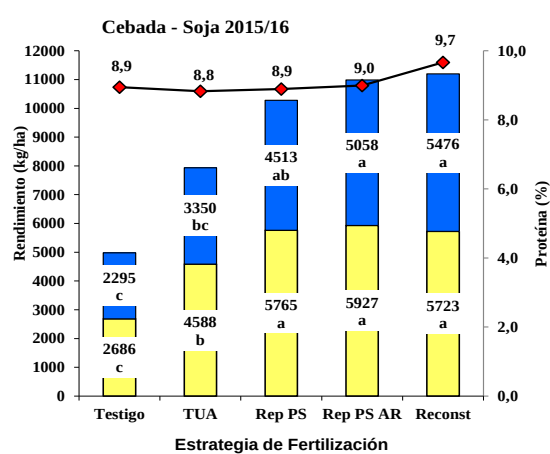


Figura 1.j

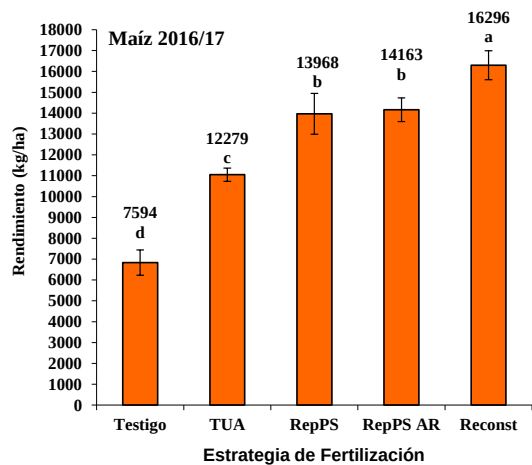


Figura 1.k

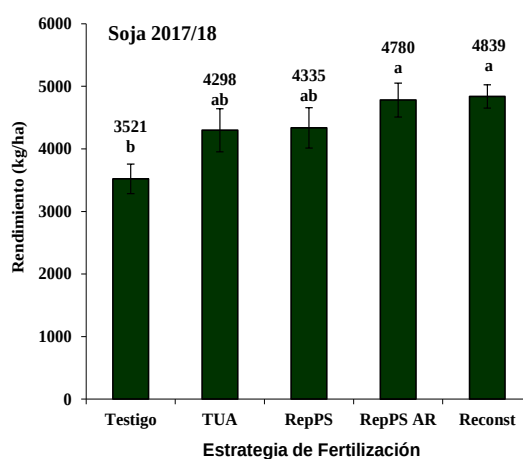


Figura 1.l

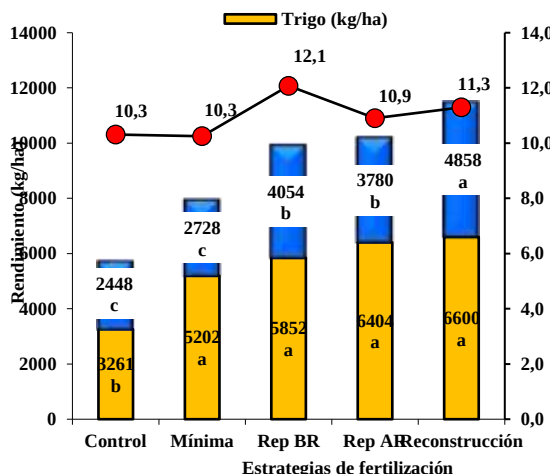


Figura 1.m

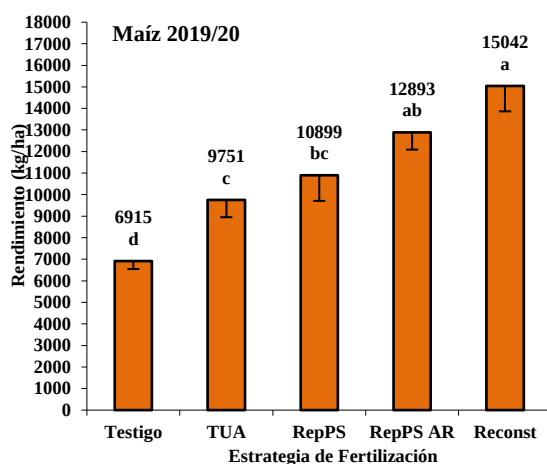


Figura 1.n

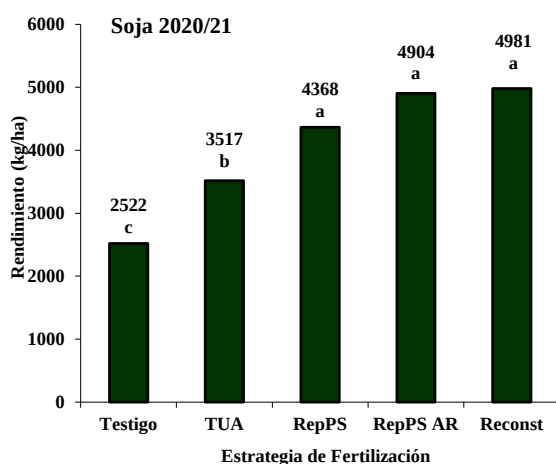


Figura 1.o

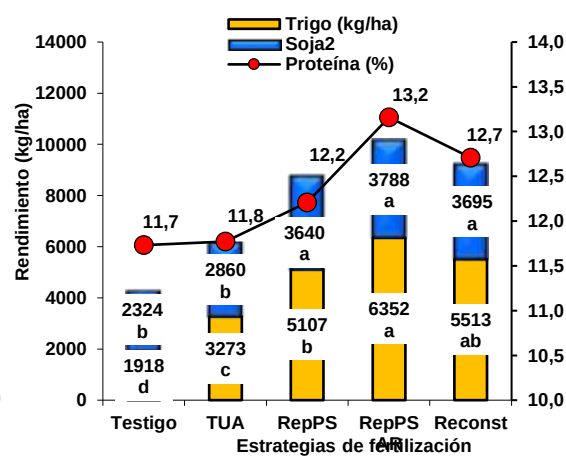


Figura 1.p

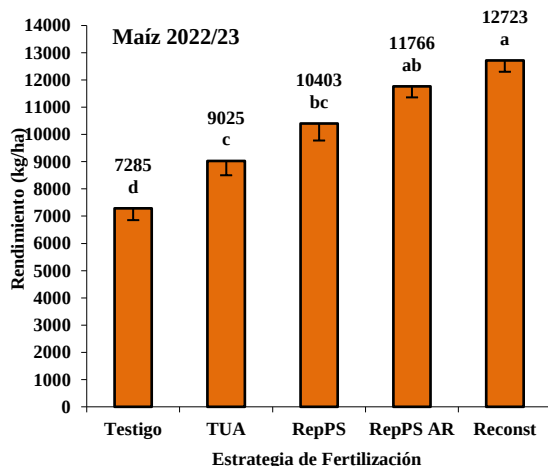


Figura 1.q

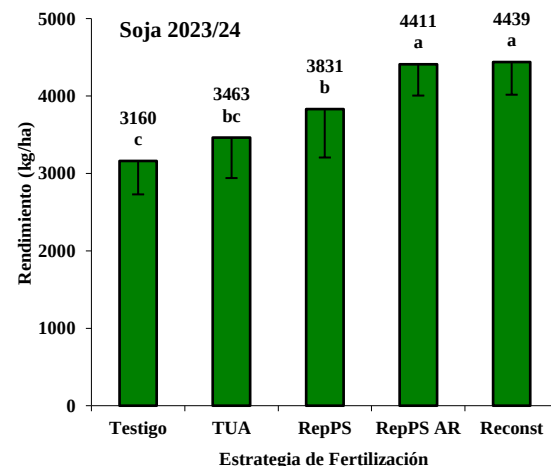


Figura 1.r

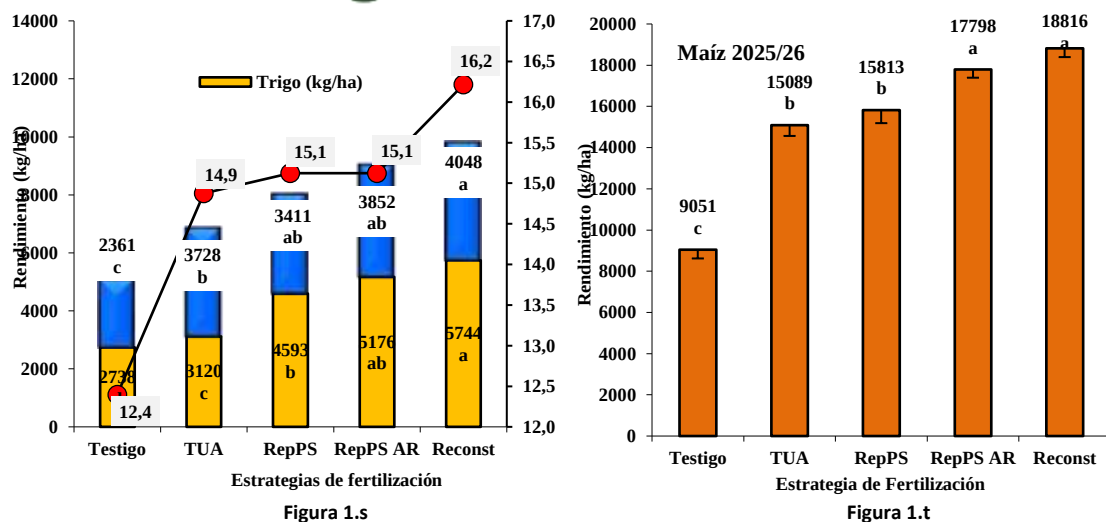


Figura 1. Rendimiento y proteína (en cereales de invierno) anualizado de diferentes estrategias de fertilización. Dentro de cada cultivo, letras distintas sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos. Experimento de estrategias de fertilización en una secuencia de cultivos. Campañas 2006/07 a 2025/26. Arribeños, General Arenales.

B. Efectos sobre los rendimientos acumulados

La productividad acumulada de la secuencia –veintiocho cultivos en veinte campañas- mantuvo su tendencia consistente en ampliar la diferencia entre tratamientos conforme el paso del tiempo. Así, mientras el testigo acumuló 103.924 kg grano ha⁻¹, el tratamiento T5 de reconstrucción llegó a 188.532 kg ha⁻¹, siendo la brecha de rendimiento de 81.4 % (**Figura 2**), la cual se amplía año tras año. Esta brecha es superior a la observada por Akpinar & Ortas (2023) y Wang et al., (2025).

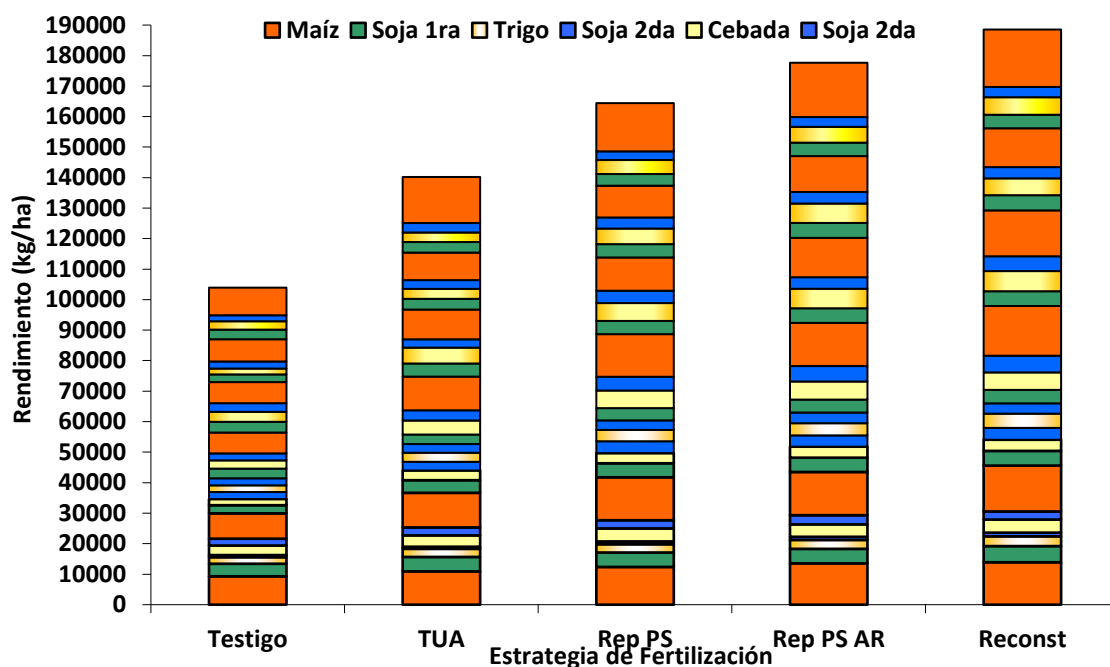


Figura 2. Producción por cultivo (kg ha⁻¹) de diferentes estrategias de fertilización acumulada en una secuencia maíz - soja - trigo/soja - cebada/soja - maíz - soja - cebada/soja - trigo/soja - soja - cebada/soja - maíz. Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2025/26.

C. Análisis económico

En la Figura 3 se presentan los márgenes acumulados. Luego de veinte campañas agrícolas las diferencias de margen bruto acumulados respecto del testigo fueron de 5508, 8411, 10035 y 10787 U\$ ha⁻¹ para TUA, Rep. PS, Rep. PS RA y Reconstrucción, respectivamente (Figura 3). Durante las primeras cuatro campañas los distintos tratamientos realizados acumularon un beneficio similar. Los mayores márgenes totales fueron alcanzados por los tratamientos Reconstrucción y Rep. PS RA, los que a su vez superaron a Rep. PS, y este a TUA. Entre la quinta y la décima campaña, se produjo una marcada diferencia entre el margen bruto del tratamiento TUA y el correspondiente a los tratamientos Rep. PS, Rep. PS RA y Reconstruc. los que superaron al primero (Ferraris et al., 2015). En las últimas diez campañas el margen por fertilización se diferenció entre tratamientos y el beneficio acumulado del manejo TUA fue considerablemente inferior al resto (Figura 3). Esto se explica claramente por la acumulación de residualidad, como postulan Liu et al., (2020).

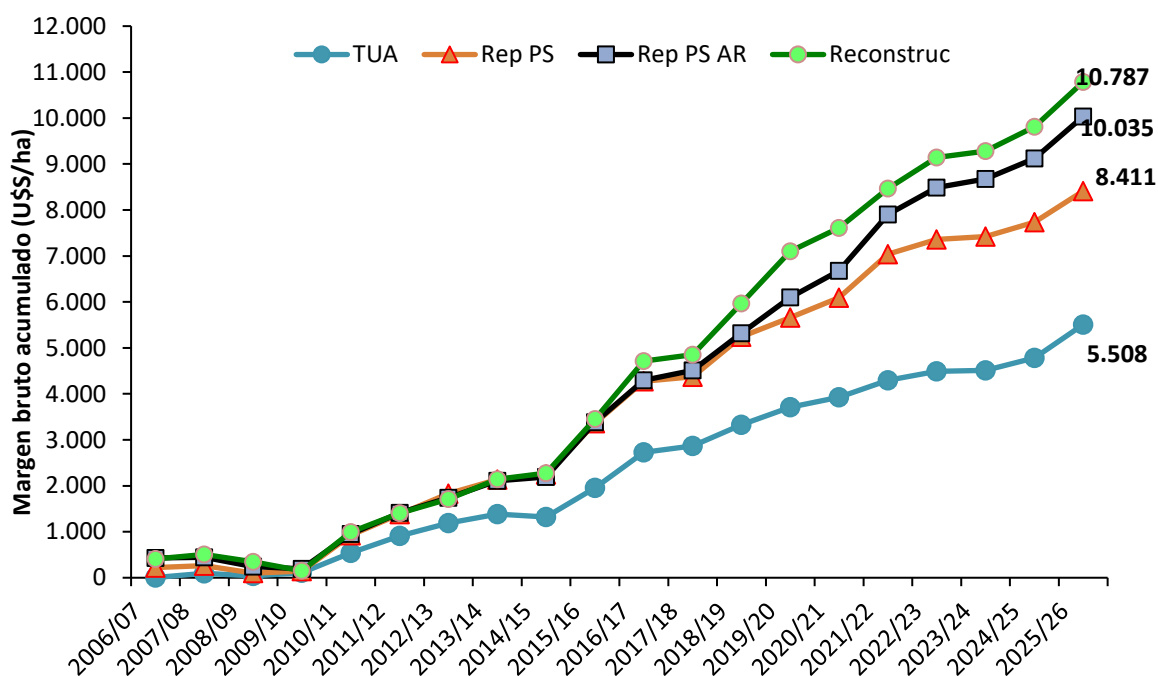


Figura 3. Margen bruto acumulado respecto del testigo no fertilizado para los diferentes tratamientos de fertilización. Ensayo de larga duración, Arribeños, General Arenales. Campañas 2006/07 a 2025/26.

CONSIDERACIONES FINALES

Las estrategias de fertilización impactaron en los rendimientos. Las diferencias en producción de granos entre estrategias se amplían campaña tras campaña. Así, la diferencia entre los tratamientos T5 y T1 alcanza luego de 20 años y 28 cultivos a un 81,4 %. Los resultados económicos señalan que, si bien las estrategias de fertilización más ambiciosas incrementan la inversión en fertilizantes respecto de la tecnología media del productor actual, también aumentan los ingresos y la rentabilidad en el mediano y largo plazo. En el cultivo de maíz, las diferencias se expanden. Esta tendencia es creciente, y se ha logrado sostener aun en períodos secos como los que se atravesaron durante las tres últimas campañas.

BIBLIOGRAFÍA

Akpinar, C., & Ortas, I. 2023. Impact of Different Doses of Phosphorus Fertilizer Application on Wheat Yield, Soil-Plant Nutrient Uptake and Soil Carbon and Nitrogen Dynamics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(11), 1537-1546.

Ferraris, G., M. Toribio, R. Falconi y L. Couretot. 2015. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos en el largo plazo. *Actas CD Simposio Fertilidad 2015*. pp 137-142. "Nutriendo los suelos para las generaciones del futuro". Rosario, 19-20 Mayo 2015. IPNI Cono Sur – Fertilizar AC.

Liu, J., Han, C., Zhao, Y., Yang, J., Cade-Menun, B. J., Hu, Y., ... & Ma, Y. 2020. The chemical nature of soil phosphorus in response to long-term fertilization practices: Implications for sustainable phosphorus management. *Journal of Cleaner Production*, 272, 123093.

Wang, J., Yang, X., Huang, S., Wu, L., Cai, Z., & Xu, M. 2025. Long-term combined application of organic and inorganic fertilizers increases crop yield sustainability by improving soil fertility in maize–wheat cropping systems. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(1), 290-305.

Weeks Jr, J. J., & Hettiarachchi, G. M. 2019. A review of the latest in phosphorus fertilizer technology: possibilities and pragmatism. *Journal of Environmental Quality*, 48(5), 1300-1313.