

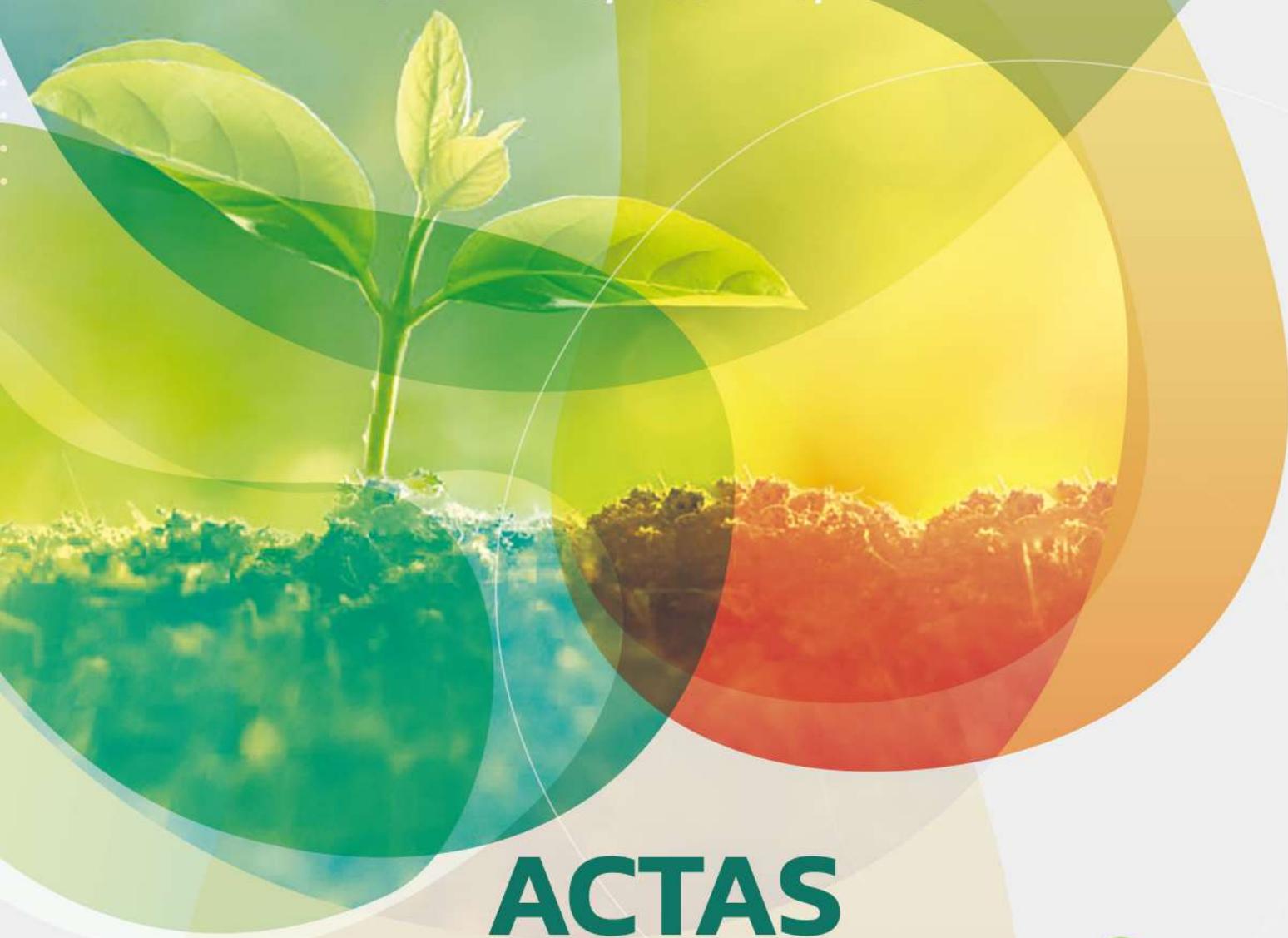


Simposio
Fertilidad 2023

AL GRAN SUELO ARGENTINO ¡SALUD!

10 Y 11 DE MAYO 2023

METROPOLITANO, ROSARIO, ARGENTINA



ACTAS

www.fertilizar.org.ar



FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

Estrategias de fertilización de mediano plazo en sistemas de cultivos extensivos con influencia de napa

Diego Hernán Rotili^{1,2*}, Santiago Alvarez Prado^{2,3,4}, Agustín Barattini⁵, Ignacio Lamattina⁵, Matías Saks⁶, Marcos Gregorini⁷, Fernando O. García⁸ y José Francisco Andrade^{1,2}

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Cátedra de Cerealicultura, Buenos Aires, Argentina.

² IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina.

³ IICAR - CONICET, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Campo Experimental Villarino S/N, S2125ZAA, Zavalla, Santa Fe, Argentina.

⁴ Cátedra de Sistemas de Cultivos Extensivos-GIMUCE, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Campo Experimental Villarino S/N, S2125ZAA, Zavalla, Prov. de Santa Fe, Argentina.

⁵ Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), Región Oeste, C1041AAZ Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

⁶ Bunge Argentina S.A., Argentina.

⁷ Nutrien Ag Solutions Inc., Argentina.

⁸ Consultor, Facultad de Ciencias Agrarias (UNMDP)

*autor correspondiente: rotili@agro.uba.ar

Resumen

Las limitaciones nutricionales para la producción de cultivos de grano son ubicuas. A pesar de que el rendimiento y la respuesta económica a la fertilización se han evaluado exhaustivamente en varios cultivos en diferentes ambientes, la atención se ha centrado principalmente en el nivel del cultivo individual en lugar de en el sistema de cultivo. Es necesario evaluar los beneficios de una fertilización más intensiva más allá de una única campaña para contribuir a revertir el actual proceso de extracción de nutrientes del suelo en la Pampa argentina. La transformación de la Pampa Interior desde sistemas de producción predominantemente ganaderos a sistemas agrícolas dominados por cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) ha llevado a una reducción del consumo de agua y al aumento del nivel freático, con una influencia positiva sobre el rendimiento de los cultivos, pero también ha socavado la materia orgánica del suelo (MORG) y la capacidad de ciclado de nutrientes. Este estudio, realizado en ambientes de la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior de Argentina, incluyó siete experimentos en los que se manejó una rotación de soja - trigo/soja 2^a - maíz bajo diferentes estrategias de fertilización (con niveles crecientes de N, P y S), incluyendo un testigo no fertilizado, a lo largo de seis campañas. Además, se sembró un cultivo adicional de soja

en el séptimo año para determinar el efecto residual de los tratamientos de fertilización impuestos previamente. La respuesta del rendimiento a la fertilización se incrementó con tratamientos de fertilización más intensivos y fue mayor para el trigo (hasta el 150 %) y el maíz (hasta el 100 %), que para la soja (hasta el 40 %) y la soja de segunda (hasta el 30 %). La respuesta general del rendimiento de los cultivos al aumento de los aportes de N y P se correlacionó negativamente con el P extractable inicial en el suelo, mientras que la respuesta al S fue mayor en sitios con un alto porcentaje de arena y baja MORG. El beneficio económico aumentó a medida que se intensificó la fertilización, aunque las diferencias entre tratamientos no siempre fueron significativas dentro de los sitios. En promedio, la intensificación resultó en una ganancia adicional de \$187 ha⁻¹ en comparación con la estrategia típica de fertilización seguida por los productores regionales, sin considerar la respuesta residual positiva de rendimiento (10-13%) detectada en el cultivo de soja sucesivo al séptimo año. Este estudio proporcionó elementos para mejorar la comprensión de las interacciones complejas que determinan la respuesta del rendimiento de los cultivos a la fertilización, contribuyendo a optimizar las decisiones de manejo a largo plazo que afectan los sistemas de cultivo con un gran impacto a nivel regional y nacional.

1. Introducción

Las limitaciones nutricionales para la producción de cultivos de granos son ubicuas, particularmente en los países en desarrollo con extensas áreas agrícolas (Mueller et al., 2012). Por lo tanto, existe una necesidad urgente de mejorar las estrategias de fertilización para atender las necesidades de una población en crecimiento con demandas crecientes de alimentos y energía (Cakmak et al., 2002). Si bien el rendimiento y la respuesta económica a la fertilización se han evaluado exhaustivamente en muchos cultivos en diferentes ambientes, la atención se ha centrado principalmente en el nivel del cultivo individual más que en el sistema de producción de cultivos (Rodríguez y Sadras, 2011; Spiertz, 2010). El problema es que, a lo largo del tiempo, optimizar el retorno económico de cultivos individuales puede resultar en el agotamiento de nutrientes del suelo con pérdidas de fertilidad a mediano y largo plazo (Manna et al., 2007; Singh et al., 2016; Sucunza et al., 2018). En este sentido, recientemente se han informado marcados balances negativos de nutrientes en Argentina (Koritschoner et al., 2023). Sin embargo, los efectos acumulativos de la fertilización a través de las secuencias de cultivos siguen siendo un tema muy poco estudiado. Explorar los beneficios de una fertilización más intensiva más allá de una sola campaña podría ser útil para reelaborar estrategias y revertir el actual proceso de extracción de nutrientes del suelo en la Pampa argentina.

La Pampa argentina es uno de los principales graneros del mundo, dentro del cual la Pampas Interior contribuye en gran medida a su producción total (Calviño y Monzón, 2009). La Pampa Interior (Occidental y Plana) presenta suelos de textura franco-arenosa, predominantemente Hapludoles y Haplustoles de baja fertilidad (INTA, 1989; Soriano et al., 1991; Oyarzabal et al., 2018). La adopción y expansión de los sistemas de labranza cero y la mayor rentabilidad de los negocios basados en cultivos de grano frente a aquellos basados en la producción ganadera permitieron que esta región pasara de la ganadería pastoril a sistemas de producción agrícola dominados por cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) (Díaz Zorita et al., 2002; Puelo et al., 2005; Manuel-Navarrete et al., 2009, Andrade y Satorre, 2015). Dicha transformación redujo el consumo de agua del sistema y elevó el nivel freático, con una influencia positiva sobre el rendimiento de los cultivos durante la última década (Nosetto et al., 2012; Alsina et al., 2020; Whitworth-Hulse et al., 2023). Al igual que otras regiones agrícolas del mundo, la combinación de texturas arenosas, décadas de agricultura y rendimientos crecientes con altas

exportaciones de nutrientes ha socavado la materia orgánica (MOrg), la capacidad de intercambio catiónica y la capacidad de ciclado de nutrientes del suelo (Wyngaard et al., 2022); Larrea et al., 2023). Este proceso se ha asociado con una mayor respuesta a la fertilización con N, P y S por parte de los cultivos en la Pampa Interior (Carciochi et al., 2020; Ciampitti et al., 2011; Correndo, 2018; Torres Duggan et al., 2012). Por el contrario, el K suele ser no limitante debido a la mineralogía del material parental (Zubillaga y Conti, 1996).

La MOrg promueve la mineralización de N y S durante el ciclo de un cultivo (Scherer, 2001; Eriksen, 2009; Ros, 2012). De hecho, se ha encontrado que el N incubado anaeróbicamente (Nan), un predictor de la mineralización potencial de N y S, se correlaciona positivamente con el contenido de MOrg en suelos templados (Schomberg et al., 2009; Wyngaard y Cabrera, 2015). Por lo tanto, a pesar de que las tasas de recuperación de N y S son típicamente altas, una mayor fertilización en suelos con niveles altos de MOrg y Nan no necesariamente resultaría en mayores rendimientos dentro de una rotación de cultivos. Por el contrario, los valores de P en los suelos no están necesariamente relacionados con el contenido de MOrg. Si bien la respuesta de los cultivos a la fertilización con P depende del P inicial disponible para los cultivos (Sucunza et al., 2018), la adición continua de P a través de la fertilización tiende a aumentar el P extractable en el suelo con el tiempo, principalmente debido a la baja recuperación de P por los cultivos y las bajas pérdidas de P (Ciampitti et al., 2011). Dada la naturaleza compleja de los procesos mencionados, se esperarían efectos diferenciales de una nutrición balanceada con altos aportes de P, N y S en unos pocos ciclos de rotación de cultivos en suelos con diferente textura, P-Bray, contenido de MOrg o niveles de Nan, incluso dentro de la misma región agroclimática.

Experimentos a mediano y largo plazo en diferentes áreas del mundo han revelado efectos positivos de estrategias de fertilización balanceadas dentro de una rotación de cultivos considerando N, P y S (Ciampitti et al., 2011; Melchiori et al., 2014; Singh et al., 2016; Sucunza et al., 2018; Manenti et al., 2023). Sin embargo, rara vez se ha considerado el beneficio económico (Cuvardic et al., 2004; Huang et al., 2010; Zhang et al., 2009; Manna et al., 2007; Zhao et al., 2006) y la mayoría de los experimentos se han realizado en un solo sitio, típicamente en estaciones experimentales de investigación agrícola y con muy pocas excepciones en campos de productores (Lamers et al., 2015; Correndo et al., 2015). Existe poca información sobre el efecto de las estrategias de fertilización a mediano plazo sobre el desempeño agronómico y económico de las

rotaciones típicas de cultivos de grano, y ninguna ha cubierto múltiples sitios dentro de regiones con suelos arenosos e influencia de la napa freática. En este trabajo se evaluaron y contrastaron cuatro estrategias de fertilización con niveles variables de N, P y S en combinaciones no factoriales de estos nutrientes contra un control no fertilizado a lo largo de dos ciclos de una rotación soja - trigo/soja - maíz (6 años). El mismo experimento se repitió en siete sitios con suelos arenosos bajo la influencia positiva de la napa freática. Los objetivos del trabajo fueron: i) evaluar el efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos de cada cultivo a través de los ciclos de rotación y los sitios (y sus interacciones); ii) determinar la relación entre la respuesta del rendimiento del cultivo a la fertilización y las variables físicas y químicas del suelo medidas al inicio de cada experimento; iii) evaluar el beneficio económico de cada estrategia de fertilización; y iv) determinar el efecto residual en un cultivo de soja sembrado luego de cumplidos los dos ciclos de rotación siguiendo diferentes estrategias de fertilización.

2. Materiales y métodos

2.1. Sitios experimentales y condiciones ambientales

Se realizaron siete experimentos entre 2014 y 2020 en la Cuenca "A" del Salado, la sección noroeste de la Cuenca del Salado en la Pampa Interior (Fig. 1). La superficie actualmente destinada a cultivos dentro de la Cuenca "A" del Salado se estima en 3,8 millones de ha y entre el 50% y el 90% se encuentra bajo la influencia de la napa freática, con variaciones interanuales (García et al., 2019). Los experimentos se establecieron en campos de productores pertenecientes a la organización sin fines de lucro CREA Oeste (Consortios Regionales de Experimentación Agrícola Zona Oeste; <http://www.crea.org>). CREA Oeste lleva a cabo un programa experimental agrícola para generar información y adoptar nuevas prácticas basadas en evidencia científica a partir de experimentos a campo (Lacoste et al., 2022). Expertos científicos y empresas comercializadoras de insumos agrícolas (semillas, fertilizantes, etc.) trabajan junto a los productores y asesores de CREA Oeste para ayudarlos en el diseño, ejecución y análisis experimental.

La región es subhúmeda con precipitaciones predominantemente concentradas en otoño y finales de

primavera. La precipitación media anual aumenta de oeste a este y la temperatura es mayor en el norte, especialmente debido a temperaturas nocturnas invernales más elevadas. Se obtuvieron registros diarios de fotoperíodo, radiación solar global, temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa y evapotranspiración potencial del Centro de Investigación Langley (LaRC) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) Financiado por el Proyecto "Prediction of Worldwide Energy Resource" (POWER) a través del Programa de Ciencias Aplicadas/Ciencias de la Tierra de la NASA (NASA Power). Las medias mensuales de las variables meteorológicas mensuales durante los seis años fueron muy similares entre los sitios, excepto en General Pinto, donde las temperaturas fueron ligeramente más elevadas. Además, ocurrieron eventos de temperatura mínima extrema (helada) durante el final del verano de la campaña 2018-2019 en Casbas y Carlos Casares, lo que provocó daños por heladas en los cultivos de soja de 2a. Los valores diarios de precipitación se obtuvieron de pluviómetros instalados a menos de 10 km de cada sitio experimental. Durante los años que duraron los experimentos, la precipitación anual promedio entre todos los sitios fue de 888 mm (sd = 162 mm), un 8 % menos que el promedio de 30 años (1990-2020). Casbas (774 mm, sd = 129 mm) y General Pinto (925 mm, sd = 132 mm) fueron los sitios más secos y húmedos, respectivamente. En todos los sitios, las lluvias se concentraron predominantemente al final de la primavera y el otoño, excepto en la campaña 2017/2018, cuando la primavera, el verano y el otoño fueron anormalmente secos.

Todos los lotes donde se establecieron los experimentos habían sido manejados con agricultura continua en siembra directa durante al menos quince años. Se tomaron y analizaron muestras de suelo al inicio de cada experimento (Tabla 1). Aunque todos los suelos eran Hapludoles o Haplustoles con alto contenido de arena, los sitios diferían en características físicas (textura), biológicas (M_{Org}) y químicas (pH, porcentaje de sodio intercambiable - PSI -, concentración de nutrientes). En cada sitio, se monitoreó la profundidad del nivel freático cada vez que se plantó un cultivo con un freatómetro ubicado cerca del borde del lote. En todos los sitios, la profundidad del nivel freático siempre estuvo dentro del rango de valores donde se minimiza el estrés hídrico y se maximiza el potencial de rendimiento limitado por agua para soja, trigo y maíz (Nosetto et al., 2009) (Tabla 1).

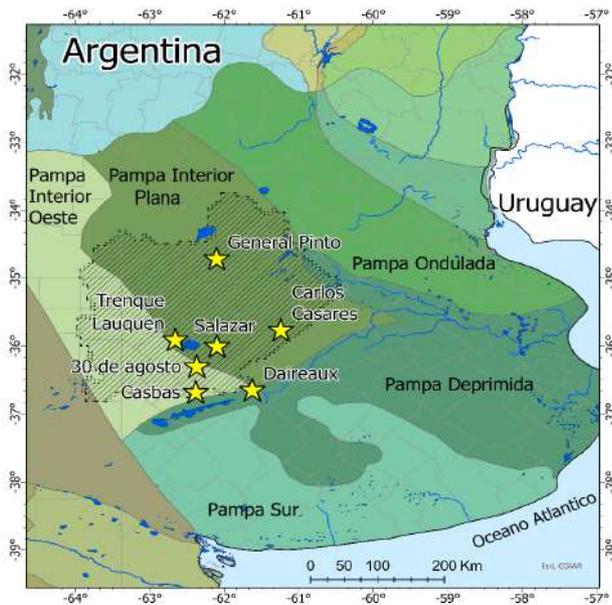


Figura 1. Ubicación de los siete experimentos de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) (indicados con estrellas amarillas) dentro de la Cuenca "A" del Salado (área sombreada con rayas negras) de la Pampa Interior argentina (Oyarzabal et al., 2018).

| Sitio | | Daireaux | Casbas | Salazar | 30 de Agosto | Carlos Casares | Trenque Lauquen | General Pinto |
|--------------------------------|-----|-----------|---------------|-----------|--------------|----------------|-----------------|---------------|
| Arena | % | 80.9 | 78.6 | 63.1 | 70.2 | 68.1 | 69.2 | 64.7 |
| Limo | % | 8.9 | 13.2 | 22 | 17.4 | 21.2 | 18.1 | 22.9 |
| Arcilla | % | 10.2 | 8.2 | 14.8 | 12.4 | 10.6 | 12.7 | 12.4 |
| Antecesor | | Soja | Trigo/Soja 2ª | Maíz | Soja | Maíz | Soja | Soja |
| Variación napa freática* | m | (0.7-1.7) | (0.6-2.2) | (1.0-2.4) | (1.2-2.4) | (1.3-1.5) | (1.0-2.0) | (0.8-1.6) |
| MOrg | % | 1.9 | 1.9 | 2.9 | 3.2 | 3.1 | 2.4 | 2.7 |
| pH | | 5.9 | 5.9 | 6 | 6.1 | 5.7 | 6 | 5.7 |
| Nan | ppm | 21.6 | 22.7 | 52.1 | 39.8 | 34.4 | 27.3 | 36.5 |
| N-NO ₃ ⁻ | ppm | 16.8 | 15.8 | 24.8 | 40.3 | 20.1 | 20.1 | 22.8 |
| P-Bray | ppm | 7.6 | 7.9 | 7.8 | 7.6 | 4.5 | 6.3 | 11.38 |
| S-SO ₄ ⁻ | ppm | 5.1 | 4.9 | 5.6 | 4.4 | 4.7 | 4.5 | 5.1 |
| PSI | % | 0.5 | 0.63 | 0.47 | 0.44 | 0.49 | 1.04 | 0.71 |

*Rango de valores de la profundidad de la napa freática a la siembra de cada cultivo a lo largo de los seis años de duración del experimento.

Tabla 1. Ubicación de cada sitio experimental y valores de las variables del suelo al inicio del primer año experimental para siete experimentos de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina. Todos los valores de las variables del suelo corresponden a una profundidad de 0-20 cm excepto N-NO₃⁻ (0-60 cm).

2.2. Diseño experimental y tratamientos

Se estableció una rotación de cultivos típica a nivel regional consistente en soja-trigo/soja 2a-maíz durante dos ciclos (3 años por ciclo), desde la campaña 2014/2015 hasta la 2019/2020. Todos los experimentos se realizaron utilizando la tecnología aplicada por los productores en términos de maquinaria (sembradoras, pulverizadoras y cosechadoras), protección de cultivos (dosis de agroquímicos y fechas de aplicación) y manejo de cultivos aparte de la fertilización (fecha de siembra, genotipo

y densidad). Las semillas de soja se inocularon con *Bradyrhizobium japonicum*. La distancia entre surcos varió ligeramente dependiendo de la sembradora disponible en cada sitio. La soja 2a se sembró inmediatamente después de la cosecha de trigo. En cada sitio se realizó un experimento de diseño de bloques completos con tres repeticiones (bloques). Los tratamientos se asignaron al azar dentro de los bloques. Cada experimento abarcó 4 ha, conformadas por 12 parcelas de 3080 m² cada una para los tratamientos (14 m de ancho y 220

m de largo), más una franja extra de 3080 m² para la franja sin fertilizar (ver abajo). Finalmente, en cinco sitios, se sembró un cultivo adicional de soja en el año siete (campaña 2020-2021) para determinar la influencia residual sobre este cultivo de los tratamientos de fertilización impuestos previamente (Tabla S4).

Los tratamientos consistieron en estrategias de fertilización a mediano plazo que diferían en la selección de nutrientes y dosis para cada cultivo (Tabla 2). Los tratamientos se eligieron en base a posibles planteos generales de fertilización por parte de los productores, luego de varios talleres de discusión en los que participaron científicos, productores de CREA Oeste y asesores. Brevemente, (i) "Típico (NP)" era el esquema de fertilización regional típico en el momento en que se establecieron los experimentos con dosis regulares de N y P en trigo y maíz y sin fertilización de cultivos de soja (en adelante, TYP); (ii) "Suficiencia (N+P+)" siguió los modelos utilizados en el percentil 20 superior de los lotes de productores regionales en términos de rendimiento de cada cultivo, cuyo manejo surge principalmente a partir de la experimentación local previa de los productores de CREA Oeste (se pueden encontrar varios informes técnicos en español en www.creaoeste.org.ar) e incluyó dosis más altas de N y P para trigo y maíz sumadas a una fertilización con P de soja (en adelante SUFF); (iii) "Suficiencia+S (N+P+S)" incluía las mismas dosis de N y P que SUFF, pero también incluía la fertilización con S en trigo, maíz y soja (en adelante SUFF+S); (iv) "Intensificado (N+P+S)" consideró un programa de fertilización balanceado y de dosis intensiva con dosis de N aún más altas para asegurar la maximización de los rendimientos de trigo y maíz, con una alta disponibilidad de S, más dosis de P más altas para el trigo y el maíz después un criterio general de reposición y reconstrucción de P. Cabe señalar que la reposición de P y la reconstrucción no se siguieron estrictamente mediante la estimación de los rendimientos de cada cultivo y la extracción de nutrientes, sino que la dosis se estimó como la extracción de cultivos que alcanzaron los rendimientos máximos (el 20 por ciento superior) de los lotes de los productores y se corroboró con la información local a partir de experimentos de CREA Oeste

y concentraciones típicas de nutrientes en base a Tablas IPNI (IPNI, 2013). Este tratamiento (en adelante denominado INT) también incluía la fertilización con P de los cultivos de soja y la fertilización con S a las mismas dosis que el tratamiento SUFF+S. Por lo tanto, el principal nutriente incrementado en todos los cultivos al pasar de TYP a SUFF fue P (también N en trigo y maíz), de SUFF a SUFF+S fue S, y de SUFF+S a INT fue P (también N en trigo y maíz). La soja 2a no se fertilizó a la siembra, siguiendo prácticas típicas de la región en las que el suelo se fertiliza con S y/o P a la siembra del cultivo de trigo en una secuencia trigo/soja 2a (Correndo et al., 2015). Además, se incluyó una franja sin replicar sin fertilizar (en adelante denominada ZERO) al lado de cada experimento como referencia de la provisión ambiental de nutrientes (evidenciada como el rendimiento de cada cultivo sin fertilizar). El objetivo de incluir la franja sin fertilizar fue evaluar las respuestas de los tratamientos a través del índice ambiental de los rendimientos del control sin fertilizar y calcular el beneficio adicional de los tratamientos versus el beneficio del control sin fertilizar.

Las fuentes de fertilizantes fueron urea (46N-0P-0K-0S), fosfato monoamónico (12N-52P-0K-0S), superfosfato triple (0N-46P-0K-0S) y sulfato de calcio (0N-0P-0K-23.5S). Las fuentes se mezclaron previo a la fertilización para obtener la concentración de nutrientes deseada en cada tratamiento. Para todos los tratamientos, los fertilizantes se incorporaron inmediatamente previo a la siembra de cada cultivo utilizando la máquina sembradora del productor.

2.3. Mediciones de rendimiento

Cada parcela se cosechó con la cosechadora utilizada por el productor en el lote y luego se transfirió a una tolva con báscula para obtener el peso húmedo del grano cosechado. Para cada parcela se tomó una submuestra de 400 g de granos para estimar la humedad relativa utilizando un higrómetro de mano. Los rendimientos de todos los cultivos se expresaron como Mg ha⁻¹ corregido a los valores de humedad relativa comercial de referencia de 13,5 % para soja y soja 2a, 14 % para trigo y 14,5 % para maíz.

| Tratamiento | ZERO | | | TYP | | | SUFF | | | SUFF+S | | | INT | | |
|---|------|---|---|-----|----|---|------|----|---|--------|----|----|-----|----|----|
| Dosis de nutriente (kg ha ⁻¹) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cultivo | N | P | S | N | P | S | N | P | S | N | P | S | N | P | S |
| Soja | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 | 15 | 0 | 10 | 15 |
| Trigo | 0 | 0 | 0 | 50 | 14 | 0 | 70 | 20 | 0 | 70 | 20 | 15 | 80 | 35 | 15 |
| Soja 2 ^a | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maíz | 0 | 0 | 0 | 50 | 14 | 0 | 70 | 20 | 0 | 70 | 20 | 15 | 80 | 35 | 15 |

Tabla 2. Dosis de nutrientes aplicadas mediante fertilización en cada cultivo de dos rotaciones de cultivos de tres años (soja-trigo/soja 2^a-maíz) para cada tratamiento (TYP, SUFF, SUFF+S e INT, más la franja sin fertilizar ZERO) para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina.

2.4. Análisis de datos

2.4.1. Efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de cultivo

Los rendimientos relativos de cada cultivo para las franjas control en cada sitio se calcularon como el rendimiento de cada cultivo en cada ciclo de rotación relativo al rendimiento promedio de ese cultivo en ese ciclo de rotación considerando todos los sitios. Cada sitio se caracterizó a través de un índice ambiental de la franja testigo sin fertilizar calculado como el rendimiento relativo promedio de todos los cultivos a lo largo de los dos ciclos de rotación.

El rendimiento de los cultivos individuales dentro de la rotación completa se analizó utilizando modelos de efectos mixtos (paquete 'sommer') en el software R (R Core Team, 2020) siguiendo a Onofri et al. (2016). El modelo ajustado fue:

$$\text{Rendimiento} = \text{Ciclo} + \text{Tratamiento} + \text{Sitio} + \text{Sitio:Bloque} + \text{Sitio:Tratamiento:Ciclo} + \text{Error}$$

Donde Rendimiento es el vector de las observaciones fenotípicas, Ciclo y Tratamiento son los efectos fijos, Sitio, Bloque dentro del Sitio, la interacción entre Sitio, Tratamiento y Ciclo y el Error son aleatorios. La varianza del error residual se modeló con una estructura de simetría compuesta. Se utilizó el mismo modelo, pero con todos los efectos aleatorios, para estimar los componentes de la varianza. Se estimó la contribución de los factores y sus interacciones a la varianza total del rendimiento. Los rendimientos de cada cultivo en cada ciclo y en cada sitio se compararon entre tratamientos de fertilización utilizando la media estimada y el error estándar de la media (considerando la estructura de efectos aleatorios del modelo).

Para comprender mejor el efecto de los tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de cada cultivo a través del ambiente, se representó el rendimiento de cada tratamiento en cada sitio y en cada ciclo respecto al rendimiento de la franja ZERO. Para conocer si hubo un efecto positivo de la fertilización sobre el rendimiento a través de los ambientes, se evaluó si la ordenada al origen de la regresión lineal de cada tratamiento fue diferente de 0 a través de una prueba F (alfa = 0.05). Para determinar si el efecto de la fertilización siguió a la oferta de ambiental de recursos o si, en cambio, fue mayor en ambientes de bajo o alto rendimiento, se comparó la pendiente de la regresión lineal versus la relación 1:1 (pendiente = 1) también mediante una prueba F (alfa = 0,05). Además, se evaluó la posibilidad de ajustar un modelo único para evaluar las diferencias en las respuestas entre los tratamientos.

Se utilizó GraphPad Prism (GraphPad Prism versión 8.0.1 para Windows) para trazar las regresiones y realizar las comparaciones estadísticas de los modelos lineales.

2.4.2. Relaciones entre las variables edáficas y los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de secuencia completa

Se evaluó la respuesta relativa del rendimiento a los incrementos de fertilización consecutivos. En cada sitio, el rendimiento relativo de cada cultivo de (i) el tratamiento TYP se relativizó con la franja ZERO (TYP/ZERO), (ii) el tratamiento SUFF se relativizó con el tratamiento TYP (SUFF/TYP), (iii) el tratamiento SUFF+S se relativizó con el tratamiento SUFF (SUFF+S/SUFF), y (iv) el tratamiento INT se relativizó con el tratamiento SUFF+S (INT/SUFF+S). Luego, los efectos relativos de los tratamientos sobre el rendimiento a lo largo de los dos ciclos de rotación se consideraron como el rendimiento relativo promedio entre cada par de tratamientos consecutivos.

Para evitar los efectos de la multicolinealidad entre las variables edáficas, se realizó un análisis de correlación múltiple entre todas las variables edáficas. Esto permitió seleccionar las variables ambientales con baja o nula correlación con otras variables (pH, ESP, S SO₄⁻ y P-Bray), así como las variables más correlacionadas con el mayor número de otras variables (%Arena y MOrg), mientras que se pudo descartar el resto de las variables que presentaron alta multicolinealidad, pero con menor correlación que Arena% y MOrg (%Limo, %Arcilla, Nan, N NO₃⁻). Luego, se evaluó la relación entre los efectos relativos de cada tratamiento sobre el rendimiento y las variables edáficas mediante un análisis de correlación usando el paquete "corrplot" en R y un análisis de componentes principales usando la función incorporada "prcomp" en R y los paquetes "ggfortify" y "factoextra" en R para la visualización.

Se realizó un análisis gráfico de burbujas para dilucidar aún más la relación entre los efectos relativos de los tratamientos sobre el rendimiento y las variables edáficas. P-Bray y %Arena fueron las variables edáficas seleccionadas ya que no estaban correlacionadas entre sí y contribuyeron en gran medida a la varianza total dentro de los dos primeros componentes principales del análisis de componentes principales. Los efectos relativos de los tratamientos sobre el rendimiento para cada comparación entre tratamientos consecutivos se cuantificaron según los diámetros de las burbujas y se graficaron en un gráfico de dos ejes que combinaba P-Bray (ppm) y Arena (%).

2.4.3. Efectos de los tratamientos sobre el beneficio económico

Los precios mensuales de granos y fertilizantes de octubre de 2012 a octubre de 2022 se obtuvieron de Agroseries CREA (www.crea.org.ar/agroseries-app/), que resume los precios promedio de los principales proveedores de fertilizantes y compradores de granos de Argentina. Para estimar el precio de cada nutriente se consideraron los fertilizantes N, P y S más utilizados en Argentina (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio). Los impuestos a la exportación (retenciones) se descontaron del precio de cada grano para reflejar el precio de venta real para los productores. En promedio, para la soja, el trigo y el maíz, durante el período considerado, las retenciones representaron aproximadamente el 20% del precio del grano. Los precios de granos y fertilizantes calculados fueron el promedio, el percentil 5 (P5), el percentil 50 (P50) y el percentil 95 (P95).

El beneficio adicional de cada tratamiento frente al ZERO sin fertilizar se calculó como el beneficio adicional promedio de todos los cultivos a lo largo de los dos ciclos de rotación. Para cada parcela en cada cultivo, el ingreso adicional se calculó como la diferencia de rendimiento por hectárea versus la franja ZERO multiplicada por el precio promedio del grano y el costo adicional se calculó como la masa de nutrientes aplicada por hectárea multiplicada por el costo promedio de los nutrientes. Se estimó la ganancia adicional promedio de cada tratamiento, y se compararon los tratamientos mediante un análisis de varianza en cada sitio (considerando el diseño de bloques completos al azar en cada sitio). Se realizó una comparación adicional a nivel regional, considerando cada sitio como un bloque y las repeticiones dentro de cada sitio como sub-réplicas. Los análisis de varianza se realizaron utilizando InfoStat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020). Se realizó un análisis de sensibilidad del beneficio adicional para cada tratamiento considerando escenarios de valores relativos de precios de granos versus precios de fertilizantes en lugar de precios promedio; los escenarios considerados (percentiles de precios Grano_Fertilizantes) fueron P95_P5, P95_P50, P95_P95, P50_P50, P5_P5, P50_P95 y P5_P95. Se realizaron escenarios para cada sitio y también a nivel regional.

2.4.4. Efecto residual de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de soja luego de los dos ciclos de rotación

En cada uno de los cinco sitios en los que se sembró y cosechó un cultivo de soja manejado homogéneamente en las parcelas de cada tratamiento, se calculó el rendimiento promedio para cada tratamiento. Se realizó un análisis de varianza para analizar el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel regional (incluyendo ZERO como tratamiento) considerando cada sitio como un bloque y utilizando InfoStat versión 2020. Se realizó una prueba de comparación múltiple de medias para evaluar diferencias entre tratamientos.

3. Resultados

3.1. Efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de cultivo

A través de todos los sitios y ciclos, el rendimiento de ZERO varió de 2,5 a 5,8 Mg ha⁻¹ para soja, de 1,8 a 4,7 Mg ha⁻¹ para trigo, de 2,2 a 5,3 Mg ha⁻¹ para soja DC y de 5,6 a 12,0 Mg ha⁻¹ para maíz (Tabla 3). Existió una amplia variación de rendimiento de ZERO entre los sitios, con un sitio (General Pinto) mostrando rendimientos considerablemente más altos que el resto (reflejados en el índice ambiental).

El tratamiento de fertilización, el sitio y la interacción entre sitio x tratamiento x ciclo explicaron la mayor parte de la variación del rendimiento en los cultivos (Fig. 2). Sin embargo, la influencia relativa de los factores que explicaron la variación del rendimiento difirió entre cultivos (Fig. 2). Si bien el tratamiento de fertilización explicó el 27 % de la variación del rendimiento de trigo, su influencia sobre el rendimiento fue considerablemente menor en el maíz (5 %), la soja (6 %) y la soja 2a (3 %). Por el contrario, estos otros cultivos presentaron mayor influencia del sitio sobre el rendimiento del cultivo (34% para maíz, 61% para soja y 62% para soja 2a) que para el caso del trigo (18%). Finalmente, la interacción múltiple sitio x tratamiento x ciclo fue importante en todos los cultivos, pero sobre todo en maíz (50%), seguido de trigo (35%) y con menor magnitud para soja y soja 2a (19% y 30%, respectivamente). En la mayoría de los casos, con algunas excepciones, los rendimientos fueron mayores para el INT y menores para el TYP que para el resto de los tratamientos, aunque las diferencias de rendimiento entre tratamientos variaron entre sitios y ciclos (Tabla 4).

| Campaña | Año | Ciclo | Cultivo | Daireaux | Casbas | Salazar | 30 de Agosto | Carlos Casares | Trenque Lauquen | General Pinto |
|-------------------------------|-----|-------|---------------------|----------|--------|---------|--------------|----------------|-----------------|---------------|
| 2014/2015 | 1 | 1 | Soja | 3.6 | 4.0 | 3.7 | 4.5 | 3.4 | 2.7 | 5.8 |
| 2015/2016 | 2 | 1 | Trigo | 2.5 | 2.7 | 3.9 | 3.6 | 3.5 | 4.2 | 4.7 |
| 2015/2016 | 2 | 1 | Soja 2 ^a | 2.2 | 2.5 | 2.5 | 2.6 | 2.9 | 2.2 | 5.3 |
| 2016/2017 | 3 | 1 | Maíz | 7.1 | 8.4 | 9.7 | 9.9 | 7.6 | 7.8 | 7.1 |
| 2017/2018 | 4 | 2 | Soja | 2.7 | 3.3 | 2.5 | 3.5 | 2.8 | 3.5 | 5.3 |
| 2018/2019 | 5 | 2 | Trigo | 1.8 | 3.7 | 2.3 | 2.3 | 2.6 | 2.0 | 3.3 |
| 2018/2019 | 5 | 2 | Soja 2 ^a | 3.8 | Frost | 3.1 | 2.7 | Frost | 2.7 | 4.0 |
| 2019/2020 | 6 | 2 | Maíz | 6.6 | 5.6 | 5.8 | 6.6 | 6.6 | 5.8 | 12 |
| Índice ambiental [†] | | | | 0.86 | 0.98 | 0.93 | 1.00 | 0.93 | 0.88 | 1.41 |

[†]Estimado como el promedio del Rendimiento de ZERO en cada sitio dividido por el promedio de los Rendimientos de ZERO a través de los siete sitios a lo largo de los seis años de duración del experimento.

Tabla 3. Rendimiento de franja ZERO sin fertilizar (Mg ha⁻¹) de cada cultivo e índice ambiental a través de los sitios para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con la influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina.

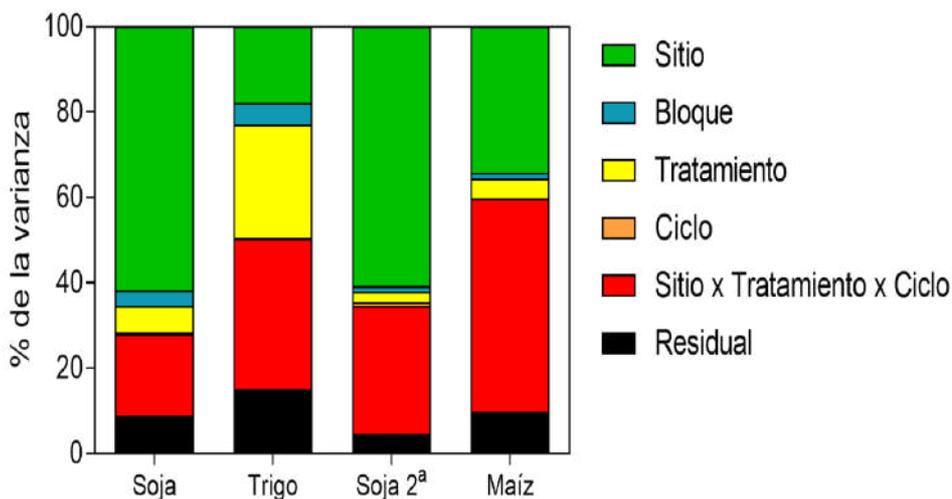


Figura 2. Contribución del sitio, bloque, tratamiento, ciclo y su interacción, y la contribución residual a la varianza total del rendimiento para soja, soja 2^a, trigo y maíz para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina. Solo se muestra la interacción en la que existió contribución a la varianza.

| Cultivo | Ciclo | Tratamiento | Daireaux | Casbas | Salazar | 30 de Agosto | Carlos Casares | Trenque Lauquen | General Pinto |
|---------------------|-------|-------------|------------|------------|------------|--------------|----------------|-----------------|---------------|
| Soja | 1 | TYP | 3.6 (0.1) | 4.2 (0.1) | 4.0 (0.2) | 4.4 (0.1) | 3.6 (0.1) | 2.8 (0.4) | 5.7 (0.1) |
| | | SUFF | 3.8 (0.2) | 4.1 (0.1) | 4.2 (0.3) | 4.5 (0.1) | 4.2 (0.1) | 3.1 (0.5) | 5.9 (0.1) |
| | | SUFF+S | 4.3 (0.2) | 4.6 (0.1) | 3.8 (0.2) | 4.7 (0.1) | 3.8 (0.1) | 3.4 (0.2) | 5.8 (0.1) |
| | | INT | 4.2 (0.1) | 4.6 (0.1) | 4.5 (0.2) | 4.8 (0.1) | 4.3 (0.1) | 3.7 (0.4) | 5.8 (0.1) |
| | 2 | TYP | 2.7 (0.1) | 3.4 (0.1) | 3.3 (0.1) | 3.6 (0.2) | 3.2 (0.1) | 4.3 (0.1) | 5.8 (0.1) |
| | | SUFF | 3.4 (0.4) | 3.6 (0.1) | 3.6 (0.1) | 4.1 (0.2) | 3.9 (0.5) | 4.6 (0.1) | 5.9 (0.1) |
| | | SUFF+S | 3.2 (0.2) | 3.7 (0.1) | 3.6 (0.4) | 4.1 (0.2) | 4.3 (0.5) | 4.7 (0.1) | 5.9 (0.1) |
| | | INT | 3.2 (0.1) | 3.9 (0.1) | 4.2 (0.1) | 4.3 (0.1) | 4.5 (0.2) | 5.0 (0.1) | 6.2 (0.1) |
| Trigo | 1 | TYP | 3.6 (0.2) | 3.8 (0.2) | 5.1 (0.3) | 4.6 (0.2) | 4.8 (0.1) | 5.7 (0.4) | 5.5 (0.3) |
| | | SUFF | 3.8 (0.1) | 3.6 (0.2) | 5.6 (0.1) | 4.7 (0.1) | 4.9 (0.1) | 5.7 (0.6) | 5.8 (0.3) |
| | | SUFF+S | 4.6 (0.1) | 5.3 (0.2) | 5.8 (0.5) | 4.9 (0.1) | 5.6 (0.1) | 6.1 (0.6) | 5.0 (0.4) |
| | | INT | 5.0 (0.1) | 6.5 (0.3) | 5.9 (0.1) | 5.2 (0.1) | 6.3 (0.1) | 7.0 (0.5) | 5.2 (0.2) |
| | 2 | TYP | 4.2 (0.1) | 5.2 (0.2) | 5.5 (0.1) | 3.9 (0.1) | 3.8 (0.1) | 4.4 (0.1) | 4.9 (0.1) |
| | | SUFF | 4.4 (0.1) | 6.2 (0.2) | 5.5 (0.1) | 4.5 (0.1) | 4.5 (0.3) | 4.8 (0.2) | 5.2 (0.1) |
| | | SUFF+S | 4.8 (0.1) | 6.6 (0.1) | 5.7 (0.2) | 4.8 (0.1) | 5.0 (0.1) | 5.1 (0.1) | 5.2 (0.1) |
| | | INT | 5.0 (0.1) | 7.3 (0.6) | 5.6 (0.3) | 5.3 (0.2) | 5.7 (0.1) | 5.7 (0.1) | 5.4 (0.3) |
| Soja 2 ^a | 1 | TYP | 2.1 (0.1) | 2.4 (0.1) | 2.5 (0.1) | 2.7 (0.1) | 2.9 (0.1) | 2.6 (0.1) | 5.4 (0.1) |
| | | SUFF | 2.0 (0.1) | 2.3 (0.1) | 2.5 (0.1) | 2.8 (0.1) | 3.1 (0.2) | 2.8 (0.3) | 5.2 (0.1) |
| | | SUFF+S | 3.1 (0.1) | 3.0 (0.1) | 2.7 (0.1) | 2.8 (0.1) | 2.9 (0.2) | 2.9 (0.2) | 5.4 (0.2) |
| | | INT | 3.0 (0.1) | 3.1 (0.1) | 2.6 (0.1) | 3.0 (0.1) | 2.9 (0.2) | 3.0 (0.2) | 5.3 (0.1) |
| | 2 | TYP | 1.9 (0.1) | Helada | 3.1 (0.1) | 3.1 (0.1) | Helada | 2.6 (0.1) | 3.3 (0.1) |
| | | SUFF | 1.7 (0.3) | Helada | 3.1 (0.2) | 3.2 (0.1) | Helada | 2.7 (0.3) | 3.6 (0.1) |
| | | SUFF+S | 1.9 (0.2) | Helada | 3.5 (0.1) | 3.2 (0.2) | Helada | 3.1 (0.2) | 3.8 (0.1) |
| | | INT | 2.1 (0.1) | Helada | 3.6 (0.1) | 3.4 (0.2) | Helada | 3.4 (0.2) | 3.9 (0.1) |
| Maíz | 1 | TYP | 8.3 (0.7) | 10.4 (0.1) | 10.7 (0.1) | 11.3 (0.5) | 7.8 (0.4) | 8.1 (0.2) | 8.7 (0.1) |
| | | SUFF | 9.7 (0.9) | 10.9 (0.2) | 11.3 (0.1) | 11.8 (0.1) | 7.7 (0.3) | 9.1 (0.1) | 9.5 (0.2) |
| | | SUFF+S | 9.5 (1.1) | 11.1 (0.3) | 11.1 (0.1) | 11.9 (0.5) | 7.8 (0.4) | 9.7 (0.3) | 9.8 (0.3) |
| | | INT | 10.1 (0.4) | 11.0 (0.2) | 11.2 (0.1) | 11.6 (0.1) | 7.9 (0.4) | 9.9 (0.5) | 10. (0.3) |
| | 2 | TYP | 8.1 (0.2) | 5.9 (0.1) | 9.6 (0.2) | 9.4 (0.1) | 8.6 (0.1) | 9.1 (0.2) | 13.3 (0.1) |
| | | SUFF | 8.5 (0.5) | 6.6 (0.5) | 10.3 (0.1) | 9.4 (0.5) | 9.1 (0.5) | 10.0 (0.1) | 13.3 (0.2) |
| | | SUFF+S | 8.6 (0.3) | 6.9 (0.2) | 10.4 (0.5) | 11.0 (0.9) | 9.6 (0.2) | 11.4 (0.4) | 14.9 (0.6) |
| | | INT | 9.5 (0.2) | 7.2 (0.4) | 10.6 (0.2) | 12.8 (0.3) | 9.7 (0.5) | 12.4 (0.2) | 14.2 (0.1) |

Tabla 4. Rendimiento promedio y error estándar de la media en cada cultivo de dos rotaciones de cultivos de tres años (soja-trigo/soja 2^a-maíz) para cada tratamiento (TYP, SUFF, SUFF+S e INT, más la franja sin fertilizar ZERO) para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina.

En general, el rendimiento aumentó con la fertilización respecto a ZERO en todos los cultivos y ambientes, independientemente del tratamiento considerado (Fig. 3; todos los casos con ordenada al origen > 0; p < 0,05). Sin embargo, la magnitud de la respuesta del rendimiento a la fertilización aumentó con los tratamientos más intensivos (soja: INT > SUFF+S = SUFF > TYP; DC soja: INT = SUFF+S > SUFF = TYP; trigo: INT > SUFF+S > SUFF > TYP, maíz: INT > SUFF+S > SUFF > TYP) (Fig. 3). Por lo general, la respuesta del

rendimiento a la fertilización fue mayor en los ambientes con los rendimientos ZERO más bajos y viceversa, con algunas excepciones (Fig. 3, la mayoría de los casos con pendientes de regresión < 1; p < 0,05). Además, también hubo diferencias en la magnitud de las respuestas al pasar de ZERO a INT entre cultivos, siendo mayor para trigo (promedio = +75%, rango = +11% a +145%) y maíz (promedio = +47%, rango = +4% a +116%) que para soja (promedio = +27%, rango = +1% a +70%) y soja 2a (promedio = +27%, rango = 0 a + 76%).

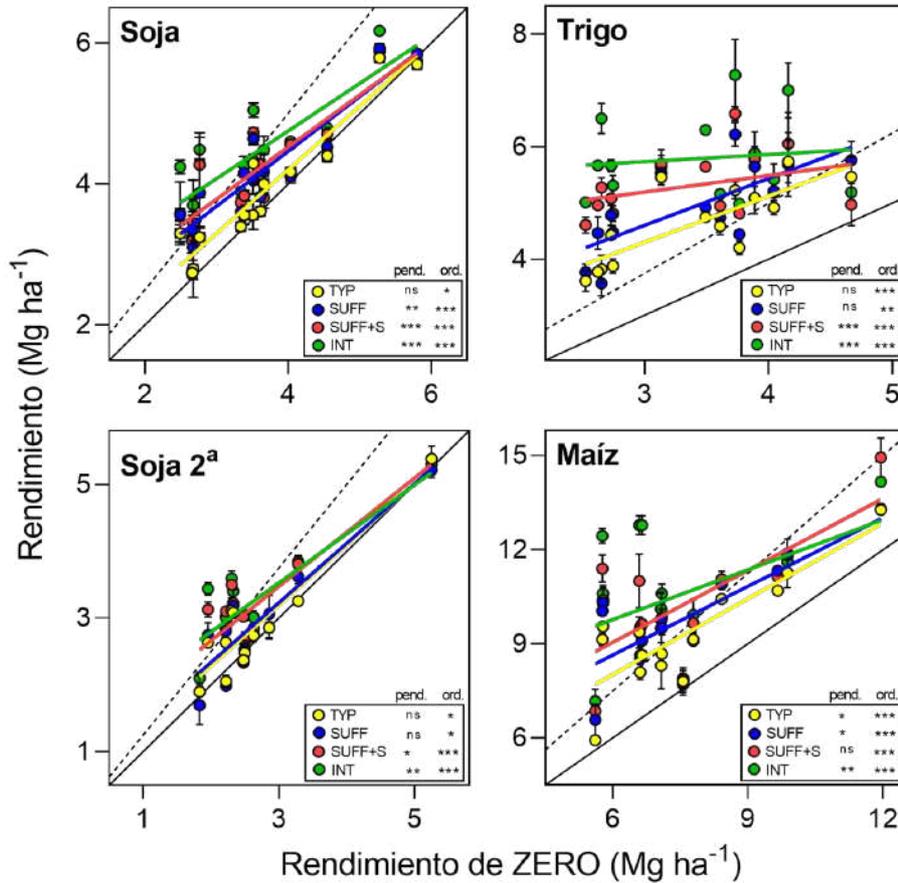


Figura 3. Rendimiento de grano de cada tratamiento de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) en función del rendimiento de las franjas ZERO no fertilizadas para soja, soja 2ª, trigo y maíz para un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en siete sitios con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior argentina. Cada punto representa la media de un sitio en un ciclo de rotación. Las barras de error muestran el error estándar de la media. Las líneas finas completas representan la relación 1:1. Las líneas punteadas finas representan la relación 1,25:1. Para todos los cultivos se muestran líneas independientes para cada tratamiento, ya que no fue posible ajustar un modelo único para todos los tratamientos ($p < 0.001$ para todos los cultivos). Para cada tratamiento en cada cultivo se muestra el resultado de la prueba F (alfa = 0.05) para la pendiente (H_0 : pendiente = 1) y la ordenada al origen (H_0 : intercepto = 0) (ns: no significativo; *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$).

3.2. Relaciones entre las variables edáficas y los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento a nivel de secuencia completa

El % Arena, MORG y P-Bray explicaron la mayor parte de la variabilidad en el rendimiento de ZERO y la respuesta del rendimiento a la fertilización entre sitios, con una menor contribución a la varianza de S-S04-, pH y ESP (63 % de la varianza explicada por los dos primeros componentes principales, Fig. 4 y Tabla S5). El análisis de componentes principales separó Arena

(%) y MORG (Fig. 4), dos variables que estaban elevada y negativamente correlacionadas ($r = -0.78$, $p < 0.05$). Por el contrario, Arena (%) y MORG estaban separados de P-Bray en el análisis de componentes principales (un ángulo de casi 90 grados con ambas variables) (Fig. 4), y no estaban correlacionados con esta variable ($p > 0.05$ en ambos casos). El rendimiento promedio de ZERO a lo largo de los dos ciclos de rotación se agrupó cerca de P-Bray en el análisis de componentes principales (Fig. 4) y estas dos variables se asociaron positivamente entre ellas ($r = 0.81$, $p < 0.05$).

Las respuestas relativas del rendimiento de los tratamientos de fertilización también se relacionaron con las variables ambientales. El rendimiento relativo de cada tratamiento respecto al del inmediatamente menos intensificado (es decir, TYP/ZERO, SUFF/TYP, SUFF+S/SUFF, INT/SUFF+S) se agruparon por separado del Rendimiento de ZERO en el análisis de componentes principales (Fig. 4), pero solo INT/SUFF+S se correlacionó negativamente con el Rendimiento de ZERO ($r = -$

0.82, $p < 0.05$) (Fig. S4). Además, SUFF+S/SUFF se agrupó cerca de Arena (%) (Fig. 4) con una correlación positiva muy alta ($r = 0,95$; $p < 0,05$) y, por el contrario, se agrupó de forma opuesta y se asoció negativamente con MOrg ($r = -0,84$, $p < 0,05$). Finalmente, TYP/ZERO, SUFF/TYP e INT/SUFF+S se agruparon en sentido opuesto a P-Bray (Fig. 4), pero solo SUFF/TYP ($r = -0.81$, $p < 0.05$) e INT/SUFF+S ($r = -0.78$, $p < 0.05$) se asociaron negativamente con esta variable edáfica.

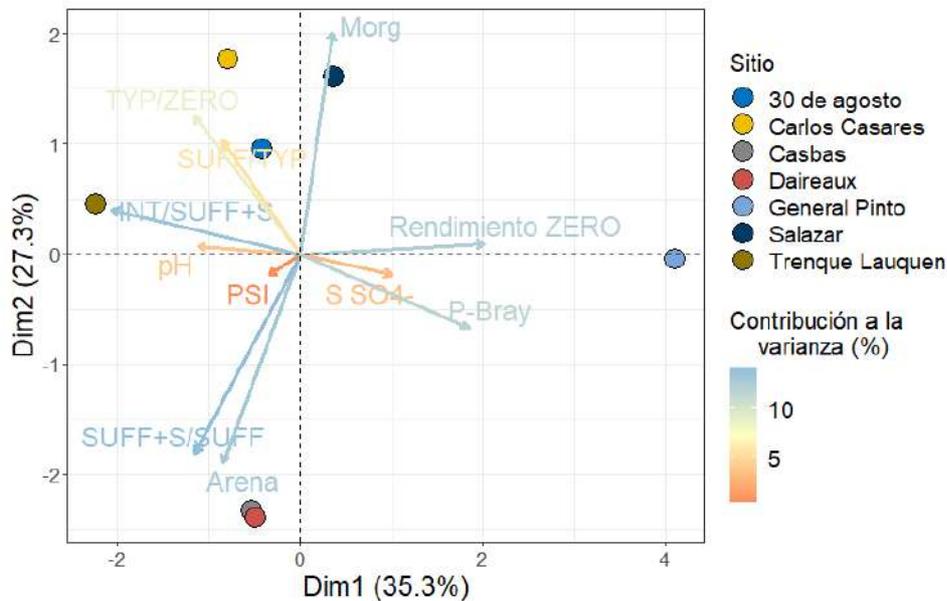


Figura 4. Análisis de componentes principales. Los experimentos en siete sitios (colores punteados) a lo largo de seis años (2014/2015 – 2019/2020) en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior de Argentina están representados a través de vectores según variables edáficas (MOrg, Arena, P-Bray, pH, S SO₄ y ESP), el índice ambiental determinado por el rendimiento relativo de las franjas no fertilizadas a lo largo de los seis años (Rendimiento ZERO) y el aumento relativo del rendimiento entre tratamientos de fertilización consecutivos a lo largo de los seis años (TYP/ZERO, SUFF/TYP, SUFF+S/SUFF, INT/SUFF+S). La longitud y los colores de los vectores representan la contribución a la varianza de cada variable con respecto a la varianza total de los dos primeros componentes principales (Dim1, Dim 2).

Se analizó el aumento relativo del rendimiento entre tratamientos con niveles de fertilización cada vez más altos frente a la variación de P-Bray y Arena (%) entre sitios (Fig. 5). Los aumentos de rendimiento relativo fueron considerablemente mayores para TYP/ZERO (rango 10-32 %, promedio 20 %) que para las otras comparaciones de tratamientos (rango 1-15 %,

promedio 6 %). El aumento relativo del rendimiento fue mayor en los sitios con una combinación de bajo % Arena y bajo P-Bray para TYP/ZERO, SUFF/TYP e INT/SUFF+S, pero se observó lo contrario para SUFF+S/SUFF, donde los aumentos de alto rendimiento se especialmente en sitios con altos valores de Arena (%).

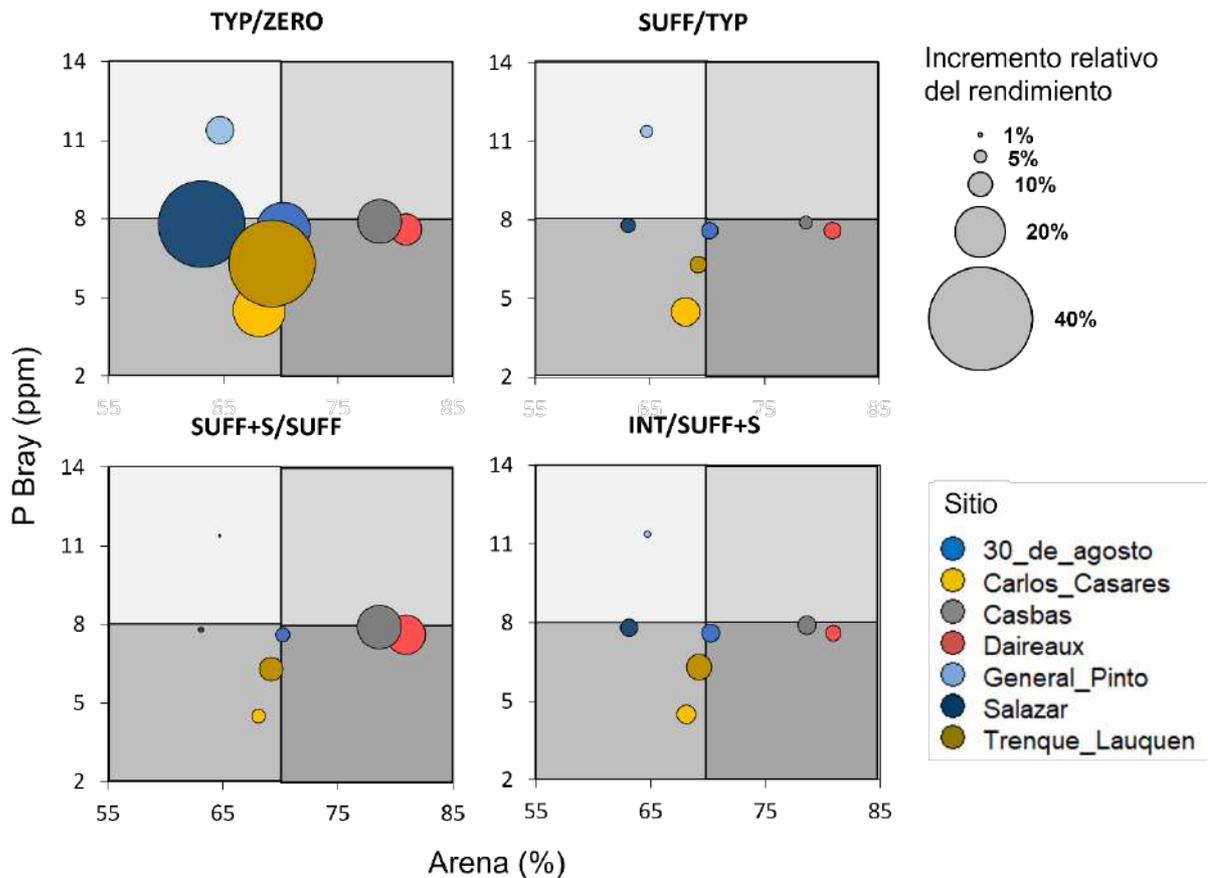


Figura 5. Gráficos de burbujas para el aumento relativo del rendimiento entre dos tratamientos de fertilización consecutivos (TYP/ZERO, SUFF/TYP, SUFF+S/SUFF, INT/SUFF+S) para sitios con diferentes combinaciones de P-Bray (ppm) y Arena (%) para un experimento de seis años de duración (2014/2015 – 2019/2020) en la Cuenca “A” del Salado de la Pampa Interior Argentina. Todos los sitios tuvieron la influencia de la napa freática. El aumento relativo del rendimiento se expresa como el diámetro de la burbuja y se consideraron los dos ciclos de tres años de una rotación típica de soja-trigo/soja 2^a-maíz para cada estrategia de fertilización. Los cuadrantes separan grupos de sitios con valores contrastantes de P-Bray (ppm) y Arena (%).

3.3. Efectos de los tratamientos sobre el beneficio económico

En todos los sitios, todas las estrategias de fertilización tuvieron beneficios positivos versus el “Control” no fertilizado ($p < 0.001$). Además, el beneficio económico aumentó a medida que se intensificó la fertilización, aunque las diferencias no siempre fueron significativas entre los tratamientos dentro de los sitios. Sin embargo, en seis de los siete sitios, el beneficio económico de SUFF+S fue mayor que el obtenido con TYP ($p < 0,05$) y el mismo efecto fue

evidente para INT versus TYP ($p < 0,01$). A pesar de una clara tendencia que indica mayores beneficios para INT versus SUFF+S, solo un sitio presentó diferencias significativas entre estos dos tratamientos (Fig. 6). Sin embargo, al considerar la escala regional, aumentar los niveles de fertilización incrementó significativamente el beneficio económico (INT > SUFF+S > SUFF > TYP) ($p < 0.05$), rindiendo hasta 360 U\$S ha⁻¹ año⁻¹ adicionales para INT cuando comparado con el “Control” sin fertilizar y 187 U\$S ha⁻¹ año⁻¹ en comparación con el tratamiento TYP.

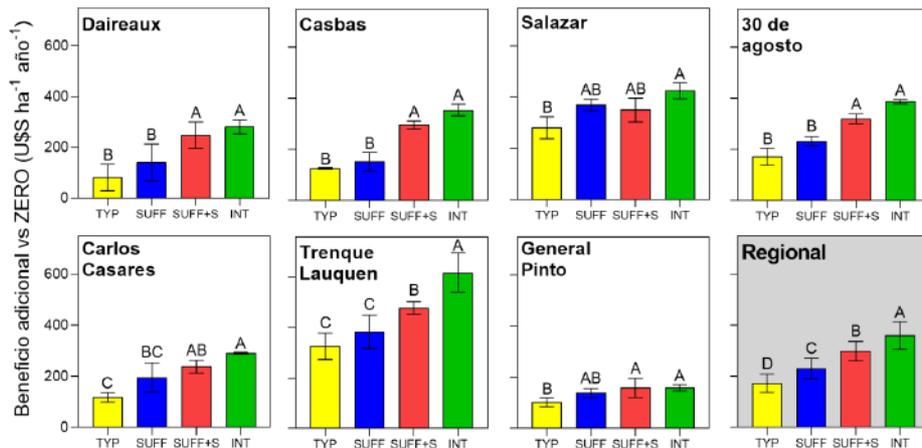


Figura 6. Beneficio económico adicional después de dos ciclos de rotación de cada tratamiento de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) versus las franjas ZERO no fertilizadas para cada sitio de un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior Argentina y el promedio regional (promedio de todos los sitios). Todos los sitios tuvieron la influencia de la napa freática. Cada barra muestra el beneficio adicional total después de dos ciclos de rotación (soja-trigo/soja 2^a-maíz). Las barras de error muestran el error estándar de la media. En cada sitio y para el promedio regional, letras diferentes muestran diferencias entre el valor medio para la prueba LSD Fisher ($p < 0.05$). Se consideraron los promedios de diez años (2012-2022) de los precios de los granos (soja, trigo y maíz; incluidos los impuestos a la exportación) y los precios de los fertilizantes (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio) en Argentina.

A pesar de que el beneficio adicional fue sensible a los precios relativos de los cereales y los fertilizantes, casi ninguna combinación de precios resultó en una respuesta negativa a la fertilización (Fig. 7). Con precios de granos versus fertilizantes relativamente favorables (es decir, P95_P5 y P95_P50) e incluso con altos precios tanto de granos como de fertilizantes (P95_P95), el beneficio económico aumentó con niveles de fertilización más intensivos (INT > SUFF+S > SUFF > TYP). Por el contrario, con

precios de granos versus fertilizantes relativamente desfavorables (es decir, P5_P95 y P50_P95) en general no existieron diferencias, pero en ciertas ocasiones los beneficios fueron menores con intensidades de fertilización más altas. Aunque la dirección de las respuestas mencionadas fue consistente entre los sitios y se reflejó a escala regional, las magnitudes de las respuestas difirieron y siguieron las respuestas promedio de los sitios descritas anteriormente (Fig. 6).

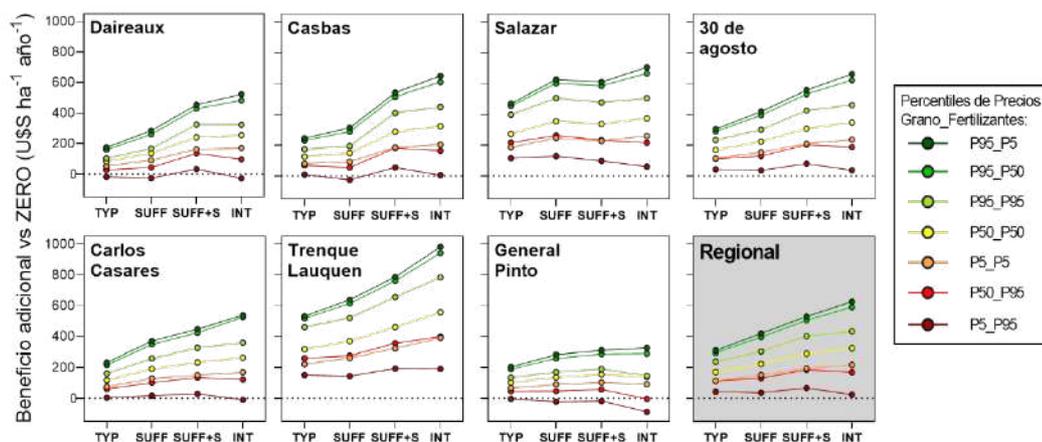


Figura 7. Análisis de sensibilidad del beneficio adicional después de dos ciclos de rotación de cada tratamiento de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) versus las franjas ZERO no fertilizadas para cada sitio de un experimento de seis años de duración (2014/2015 - 2019/2020) en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior de Argentina y el promedio regional (promedio de todos los sitios). Todos los sitios tuvieron la influencia de un nivel freático. La línea punteada muestra el umbral de beneficio adicional cero. Se consideraron diferentes situaciones de precios relativos de granos y fertilizantes en base a los percentiles de los datos de diez años (2012-2022) de los precios de los granos (soja, trigo y maíz; incluidos los impuestos a la exportación) y los precios de los fertilizantes (urea, fosfato monoamónico y sulfato de calcio) en Argentina. Los puntos muestran la ganancia adicional para los percentiles de precios de granos seleccionados (primer número) y fertilizantes (segundo número)

3.4. Efecto residual de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de soja luego de los dos ciclos de rotación

A escala regional, fue evidente el efecto residual de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo de soja subsiguiente a los dos ciclos de rotación (Fig. 8; $p < 0,05$). Los tratamientos de fertilización crecientemente intensivos durante los dos ciclos de rotación anteriores se tradujeron en mayores rendimientos de la soja subsiguiente, ya que INT mostró el rendimiento más alto (4,5 Mg ha⁻¹), seguido de SUFF+S (4,3 Mg ha⁻¹), SUFF (4,3 Mg ha⁻¹), TYP (3,9 Mg ha⁻¹) y ZERO (3,6 Mg ha⁻¹). Aunque el rendimiento de soja de SUFF y SUFF+S no fue estadísticamente diferente de INT, este último tuvo los valores de rendimiento de soja más altos en la mayoría de los sitios y fue el único tratamiento con rendimientos de soja siempre superiores a 4,0 Mg ha⁻¹.

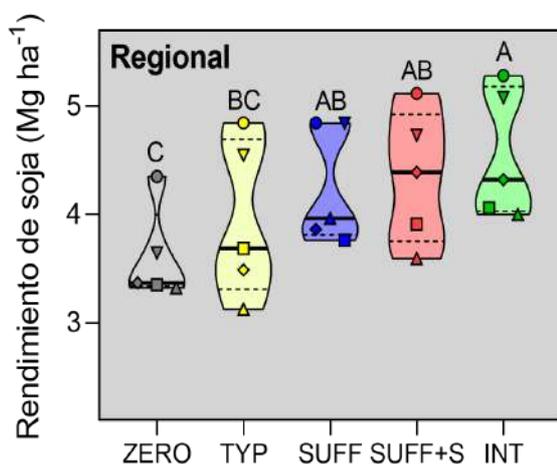


Figura 8. Gráfico de violín que muestra el efecto a escala regional en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior Argentina de los cuatro tratamientos de fertilización (TYP, SUFF, SUFF+S, INT) y las franjas ZERO sin fertilizar después de dos ciclos de rotación (seis años, 2014/2015 - 2019/2020) sobre el rendimiento de un cultivo de soja sembrado en el año subsiguiente (2020/2021) y con igual fertilización para todos los tratamientos. Cada punto representa la media de un sitio. Todos los sitios tuvieron la influencia de la napa freática. Para cada tratamiento, la línea recta llena indica la mediana del rendimiento y las líneas punteadas indican los percentiles 25 y 75 del rendimiento.

4. Discusión

Este trabajo analizó el impacto de las estrategias de fertilización a mediano plazo sobre la productividad, el beneficio económico y el efecto residual de largo plazo en

varios ambientes con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior. Una fertilización equilibrada e intensificada con N, S y P (INT) aumentó los rendimientos y maximizó el beneficio económico para los productores a escala regional. De hecho, una adopción masiva de INT por parte de los productores representaría un aumento general del rendimiento del 19 % con un beneficio adicional que oscilaría entre US\$ 356 y US\$ 641 millones anuales en comparación con los esquemas de fertilización típicos (TYP) implementados (considerando que entre el 50 y el 90 % de los 3,8 millones de hectáreas actuales de tierras de cultivo en el área de la Cuenca "A" del Salado están bajo la influencia de una capa freática; García et al., 2019). Sin embargo, muchos productores aún adoptan un esquema de fertilización menos intensificado (TYP) debido a una gran aversión al riesgo (Bocquého et al., 2013; Gonzalez-Ramirez et al., 2018; Monjardino et al., 2015; Pellegrini et al., 2022). Aquí argumentamos que, de acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado, hay muy poco riesgo económico derivado de la adopción de estrategias de fertilización más intensivas en sistemas de cultivo con la influencia de la napa freática (Fig. 7). El trabajo colaborativo de científicos y productores para establecer experimentos a campo con la tecnología agrícola disponible permite una transferencia instantánea de información valiosa a los sistemas de producción de cultivos (Lacoste et al., 2022). De hecho, los productores de CREA Oeste ya han adoptado estrategias de fertilización más equilibradas tras los resultados de estos experimentos. En comparación con el inicio de este experimento de mediano plazo, la fertilización S (SUFF+S) en sus cultivos aumentó del 6% al 60% del área, mientras que la reposición de P (INT) aumentó del 1% al 10% del área (basado en encuestas realizadas en 2014 y 2020 en fincas que cubren aproximadamente 150.000 hectáreas).

Aunque la fertilización tuvo una influencia importante sobre el rendimiento, hubo un gran efecto de la interacción sitio \times tratamiento \times ciclo (Fig. 2), lo que evidencia la importancia de comprender el ambiente de producción para orientar las decisiones de manejo (Meynard et al., 1981; Monzón et al., 2018). Esta interacción fue, en parte, explicada por diferencias en las variables edáficas entre los sitios analizados. En el área de estudio sería relevante caracterizar la textura, la MOrg y el P-Bray para decidir la estrategia de fertilización a mediano plazo (Fig. 4 y 5). No es sorprendente que los valores bajos de P-Bray se asociaran con mayores respuestas a la fertilización con P (Sucunza et al., 2018), ya sea después de aumentar la dosis hasta un nivel de suficiencia (SUFF) o incluso en niveles cercanos a la reposición (INT). Además, altos valores de % de arena y

bajos valores de M_{Org} determinaron respuestas significativas a la fertilización con S (al comparar los tratamientos SUFF+S y SUFF). Estas características del suelo determinan una baja capacidad de mineralización del S y, por lo tanto, aumentan la respuesta al S agregado por la fertilización. Por el contrario, S^{SO4}- por sí solo no fue un buen predictor de esta respuesta como ya se ha encontrado en estudios previos (Carciochi et al., 2019; Pagani y Echeverría, 2011; Salvagiotti et al., 2012; Tisdale et al., 1986).

A pesar de los efectos generales discutidos anteriormente, la influencia de una estrategia de fertilización intensificada y equilibrada (INT) difirió entre cultivos específicos a lo largo de la secuencia, siendo mayor en trigo y maíz que en soja (Fig. 3) y obedeciendo a las respuestas esperadas de los cereales versus las leguminosas (Xiu et al., 2011). Siempre que la limitación hídrica sea muy baja o nula (Cossani y Sadras, 2018), el trigo y el maíz son cultivos que presentan una elevada respuesta a los diferentes nutrientes (Chuan et al., 2013; Salvagiotti y Miralles, 2008; Setiyono et al., 2010; Carciochi et al., 2020; Manenti et al., 2023); pero más aún a un programa de fertilización balanceado siguiendo la "ley del óptimo" donde todos los nutrientes se utilizan más eficientemente cuando se incrementa la disponibilidad del más limitante (Liebscher, 1895). Los cultivos de soja fijan nitrógeno de forma simbiótica y suelen estar limitados por la disponibilidad de P y S (Ferraris et al., 2002; Salvagiotti et al., 2004; Manenti et al., 2023). Finalmente, los cultivos de soja 2a suelen explorar una estación de crecimiento más acotada debido a la siembra tardía después de la cosecha del trigo. Esta situación reduce el rendimiento del cultivo (Andrade et al., 2015; Hansel et al., 2019) y disminuye los requerimientos generales de nutrientes (Salvagiotti et al., 2021). Es importante señalar que, en todos los cultivos, la respuesta a estrategias de fertilización más equilibradas e intensificadas (INT) disminuyó a medida que aumentó el rendimiento de la franja no fertilizada (ZERO) (Fig. 3). Esto sugiere que (i) la fertilidad del suelo fue el principal factor definitorio del rendimiento en los sitios explorados en el trabajo, y (ii) en la Pampa Interior, una fertilización equilibrada puede satisfacer la mayoría de los requisitos cuando la fertilidad del suelo es reducida. Teniendo esto en cuenta, comprender la fertilidad intrínseca de un lote a través del rendimiento, las relaciones entre los índices espectrales y/o la concentración de nutrientes en franjas de cultivos de trigo o maíz no fertilizados versus fertilizados podría ayudar a predecir la respuesta a las estrategias de fertilización y contribuir a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes (Mahajan et al., 2014; Carciochi et al., 2019).

Es importante resaltar algunas limitaciones de este estudio para comprender hasta qué punto los resultados de

este estudio pueden extrapolarse a otras situaciones de campo. Primero, todos los sitios estudiados tuvieron la influencia de la napa freática, reduciendo las limitaciones de agua y aumentando el rendimiento potencial limitado por agua (Nosetto et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013). Las respuestas del rendimiento en ambientes con limitaciones hídricas probablemente difieran de las descritas en este trabajo (Manenti et al., 2023). En segundo lugar, evaluamos el efecto de las estrategias de fertilización sobre la productividad y el resultado económico de la principal rotación de cultivos en la región. A la luz de los resultados obtenidos aquí para cada cultivo específico en la secuencia, podemos especular que las rotaciones basadas en cereales tendrían una mayor respuesta a la intensificación, mientras que rotaciones con mayor preponderancia de soja mostrarían lo contrario. Además, otras tecnologías de cultivo, como la fecha de siembra, la densidad o la elección del genotipo, podrían ayudar a ajustar el manejo para optimizar las respuestas a los fertilizantes (Foulkes et al., 1998; Boomsma et al., 2009; Ciampitti y Vyn, 2011; Bastidas et al., 2008; Batten y Khan, 1987; Bosaz et al., 2019; Cerrudo et al., 2017). Finalmente, si bien pudimos detectar un efecto residual en un cultivo de soja manejado de manera idéntica después de seis años de aplicar diversas estrategias de fertilización (un aumento del 15% para INT versus TYP; Fig. 8), se podrían esperar mayores respuestas residuales en cultivos de cereales (Andrade et al., 2017). Estas respuestas residuales deben considerarse de alguna manera para evaluar adecuadamente el beneficio adicional derivado de la intensificación. Además, también se debería considerar el valor económico de un mayor nivel de P extractable disponible en el suelo por enriquecimiento (Correndo et al., 2015).

En general, los resultados de este trabajo sugieren la importancia de estudiar las variables del suelo (fertilidad física y química) afectadas por las diferentes estrategias de fertilización en el mediano plazo para comprender las causas de las respuestas observadas. No obstante, incluso al considerar todos estos aspectos significativos desde el punto de vista agronómico, es probable que las futuras mejoras de productividad para cerrar las brechas de rendimiento al nivel del cultivo individual y al nivel de secuencia de cultivos a partir de la adopción de prácticas de manejo adicionales (Guilpart et al., 2017), lograrían beneficios cada vez más marginales al compararlos con los observados en este trabajo. Sin embargo, sostenemos que la identificación de oportunidades para mejorar el rendimiento y el beneficio económico considerando el mediano y largo plazo que caracteriza la naturaleza de la producción agrícola debe basarse en la evaluación de prácticas en experimentos a campo adecuadamente diseñados.

5. Conclusión

En conclusión, esta investigación analizó el impacto a mediano plazo de las estrategias de fertilización sobre la productividad de los cultivos, el beneficio económico y los efectos residuales de largo plazo en varios ambientes con influencia de la napa freática en la Cuenca "A" del Salado de la Pampa Interior. Los resultados indican que un programa de fertilización equilibrado e intensificado con N, S y P (INT) aumentó los rendimientos y maximizó el beneficio económico para los productores a escala regional. Sin embargo, muchos productores aún adoptan esquemas de fertilización menos intensificados debido a la aversión al riesgo, algo no respaldado por el análisis de sensibilidad realizado. Debido a las respuestas diferenciales de la productividad de los cultivos entre los sitios, el estudio destaca la importancia de comprender el ambiente de producción para guiar las decisiones de manejo. En este sentido, resulta fundamental caracterizar las propiedades del suelo, como la textura, la MORG y el P-Bray, para decidir sobre la estrategia de fertilización adecuada en regiones con suelos arenosos. El impacto de una estrategia de fertilización intensificada y equilibrada (INT) difirió entre cultivos a lo largo de la secuencia, siendo mayor en trigo y maíz que en soja. En general, este trabajo brinda información valiosa para que los productores y los encargados de formular políticas adopten estrategias de fertilización más equilibradas e intensificadas que conduzcan a aumentar el rendimiento y el beneficio económico de los sistemas de cultivo a mediano y largo plazo.

Agradecimientos

Los autores reconocen la predisposición de los productores y asesores de "CREA Oeste" para participar en los talleres y discusiones de resultados de este proyecto, y su ayuda en los experimentos de campo. Asimismo, los autores agradecen a los técnicos a cargo de los experimentos de campo: Cecilia Justo, Diego Mendoza y Santiago Algorta.

Referencias

- Alsina S, Nosetto MD, Jobbágy EG. 2020. Database "napa": first synthesis of the pampean water-table dynamic since 1950 to the present. *Ciencia de Suelo* 38: 262-273.
- Andrade JF, Satorre EH. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research* 177: 137-147.
- Andrade JF, Poggio SL, Ermácora M, Satorre EH. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy* 67: 37-51.
- Bastidas AM, Setiyono TD, Dobermann A, Cassman KG, Elmore RW, Graef GL, Specht JE. 2008. Soybean sowing date: The vegetative, reproductive, and agronomic impacts. *Crop Science* 48: 727-740.
- Batten GD, Khan MA. 1987. Effect of time of sowing on grain yield, and nutrient uptake of wheats with contrasting phenology. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 27: 881-887.
- Bocquého G, Jacquet F, Reynaud A. 2013. Expected utility or prospect theory maximisers? Assessing farmers' risk behaviour from field-experiment data. *European Review of Agricultural Economics* 41: 135-172.
- Boomsma CR, Santini JB, Tollenaar M, Vyn TJ. 2009. Maize Morphophysiological Responses to Intense Crowding and Low Nitrogen Availability: An Analysis and Review. *Agronomy Journal* 101: 1426-1452. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0082>
- Bosaz LB, Gerde JA, Borrás L, Cipriotti PA, Ascheri L, Campos M, Bergallo S, Rotundo JL. 2019. Management and environmental factors explaining soybean seed protein variability in central Argentina. *Field Crops Research* 240: 34-43.
- Cakmak I. 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and soil* 247: 3-24.
- Calviño P, Monzon JP. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. In: Sadras VO, Calderini D, eds. *Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy*. San Diego, California: Elsevier Academic Press. pp 51-70.
- Carciochi WD, Reussi Calvo NIR, Wyngaard N, Divito GA, Eyherabide M, Echeverría HE. 2019. Prognosis and diagnosis of sulfur status in maize by plant analysis. *European Journal of Agronomy* 108: 1-10.
- Carciochi WD, Salvagiotti F, Pagani A, Reussi Calvo NI, Eyherabide M, Sainz Rozas HR, Ciampitti I A. 2020. Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize. *European Journal of Agronomy* 116: 126045.
- Cerrudo A, Martínez D, Izquierdo NG, Cirilo AG, Laserna MP, Reinoso L, Valentinuz O, Balbi C, Andrade FH. 2017. Environment, Management, and Genetic Contributions to Maize Kernel Hardness and Grain Yield. *Crop Science* 57: 2788-2798. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.12.0997>
- Chuan L, He P, Jin J, Li S, Grant C, Xu X, Qiu S, Zhao S, Zhou W, Estimating nutrient uptake requirements for wheat in China. *Field Crops Research* 146: 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.02.015>.
- Ciampitti IA, Vyn TJ. 2011. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research* 121: 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.009>
- Ciampitti IA, García FO, Picone LI, Rubio G. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 75: 131-142.

- Correndo AA, Boxler M, García FO. 2015. Economic analysis of fertilization management with focus on the long term. *Ciencia del Suelo* 33: 197-212.
- Correndo A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. MSc. Thesis, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. (in Spanish)
- Cossani CM, Sadras VO. 2018. Water–nitrogen colimitation in grain crops. *Advances in Agronomy* 150: 231-274.
- Cuvardic M, Tveitnes S, Krogstad T, Lombnæs P. 2004. Long-term effects of crop rotation and different fertilization systems on soil fertility and productivity. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 54: 193-201.
- Díaz-Zorita M, Duarte GA, Grove JH. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 65: 1-18.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2020. Infostat version 2020. Centro de Transferencia Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. (<http://www.infostat.com.ar>).
- Eriksen, J. 2009. Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Advances in Agronomy* 102: 55-89.
- Ferraris G, Gutierrez Boem FH, Echeverria HE. 2002. Soybean crop response to fertilization. *IDIA XXI*, 3: 52-58. (in Spanish)
- Foulkes M, Sylvester-Bradley R, Scott R. 1998. Evidence for differences between winter wheat cultivars in acquisition of soil mineral nitrogen and uptake and utilization of applied fertilizer nitrogen. *The Journal of Agricultural Science* 130: 29-44. doi:10.1017/S0021859697005029
- García GA, García PE, Rovere SL, Bert FE, Schmidt F, Menéndez AN, Noretto MD, Verdin A, Rajagopalan B, Arora P, Podestá GP. 2019. A linked modelling framework to explore interactions among climate, soil water, and land use decisions in the Argentine Pampas. *Environmental Modelling & Software* 111: 459-471. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.013>.
- Gonzalez-Ramirez J, Arora P, Podesta G. 2018. Using insights from prospect theory to enhance sustainable decision making by agribusinesses in Argentina. *Sustainability* 10: 2693. <https://doi.org/10.3390/su10082693>
- GraphPad Prism version 8.0.1 for Windows, GraphPad Software, San Diego, California USA, (www.graphpad.com).
- Guilpart N, Grassini P, Sadras VO, Timsina J, Cassman KG. 2017. Estimating yield gaps at the cropping system level. *Field Crops Research* 206: 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.008>.
- Hansel DSS, Schwalbert RA, Shoup DE, Holshouser DL, Parvej R, Prasad PVV, Ciampitti IA. 2019. A Review of Soybean Yield when Double-Cropped after Wheat. *Agronomy Journal* 111: 677-685. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.06.0371>
- Huang S, Zhang W, Yu X, Huan Q. 2010. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 44-50.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.
- IPNI. 2013. 4R de la Nutrición de Plantas: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. Eds: Bruulsema TW, Fixen P, Sulewski G. 1st Ed. Acaassu. International Plant Nutrition Institute. 140 pp. (In Spanish).
- Koritschoner JJ, Hulse JIW, Cuchiatti A, Arrieta EM. 2023. Spatial patterns of nutrients balance of major crops in Argentina. *Science of The Total Environment* 858: 159863.
- Lacoste M, Cook S, McNeen M, Gale D, Ingram J, Bellon-Maurel V, MacMillan T, Sylvester-Bradley R, Kindred D, Bramley R, Tremblay N, Longchamps L, Thompson L, Ruiz J, García FO, Maxwell B, Griffin T, Oberthür T, Huyghe C, Zhang W, McNamara J, Hall A. 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture. *Nature Food* 3: 11–18. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00424-4>
- Lamers JP, Bruentrup M, Buerkert A. 2015. Financial performance of fertilization strategies for sustainable soil fertility management in Sudano–Sahelian West Africa. 2: Profitability of long-term capital investments in rockphosphate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 102: 149-165.
- Larrea G, Wyngaard N, Eyherabide M, Reussi Calvo N, Puricelli M, Barbieri P, Angelini H, Salvaggiotti F, Sainz Rosas H. 2023. Cation nutrient reserves decline markedly under intensive cropping of Pampas Mollisols. *CATENA* 223: 206916.
- Liebscher G. 1895. Untersuchungen über die Bestimmung des Düngerbedürfnisses der Ackerböden und Kulturpflanzen. *Journal für Landwirtschaft* 43: 49-125. (In German).
- Mahajan GR, Sahoo RN, Pandey RN, Gupta VK, Dinesh K. 2014. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agric* 15: 499–522. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9348-7>
- Manenti L, Macholdt J, Garcia FO, Rubio G. 2023. Resilience of maize, wheat and soybean cropping systems as affected by fertilization: Analysis of a long-term field network. *Agronomy Journal*, In press. <https://doi.org/10.1002/agj2.21325>
- Manna MC, Swarup A, Wanjari RH, Mishra B, Shahi, DK. 2007. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research* 94: 397-409.
- Melchiorri RJ, Novelli LE, Gregorutti VC, Caviglia, OP. 2014. Stover Quality and Soil Organic Carbon in Long-Term Nitrogen-Fertilized Maize. *Agronomy Journal*, 106: 1709-1716.
- Meynard JMJ, Boiffin J, Caneill J, Sebillotte M. 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d’hiver en Champagne crayeuse. II.-Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1: 795-806. (In French).
- Monjardino M, McBeath T, Ouzman J, Llewellyn R, Jones B. 2015. Farmer risk-aversion limits closure of yield and profit gaps: a study of nitrogen management in the southern Australian wheatbelt. *Agricultural Systems* 137: 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.006>.
- Monzón JP, P.A. Calviño PA, V.O. Sadras VO, J.B. Zubiurre JB, F.H. Andrade FH. 2018. Precision agriculture based on crop physiological principles improves whole-farm yield and profit: A case study. *European Journal of Agronomy* 99: 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.011>.
- Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, Foley JA. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490: 254-257.

- NASA Power. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program. NASA Power Project hourly 2.0.0 version. (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). (Accessed 08 March 2023).
- Nosetto MD, Jobbágy EG, Jackson RB, Sznaider GA. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113: 138-148.
- Nosetto MD, Jobbágy EG, Brizuela AB, Jackson RB. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154: 2-11.
- Onofri A, Seddaiu G, Piepho HP. 2016. Long-term experiments with cropping systems: case studies on data analysis. *European Journal of Agronomy* 77: 223-235.
- Pagani A, Echeverría HE. 2011. Performance of Sulfur Diagnostic Methods for Corn. *Agronomy Journal* 103: 413-421. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0265>
- Paruelo JM, Guerschman JP, Verón SR. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15: 14-23.
- Pellegrini P, Alvarez Prado S, Monzon JP, Oesterheld M, Sadras VO. 2022. Spatial and temporal variation in drought types for wheat in Argentina and its association with actual yield and fertilization rate. *Field Crops Research* 280: 108469.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. (<https://www.R-project.org/>).
- Rodriguez D, Sadras VO. 2011. Opportunities from integrative approaches in farming systems design, *Field Crops Research* 2: 137-141. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.022>
- Ros GH. 2012. Predicting soil N mineralization using organic matter fractions and soil properties: A re-analysis of literature data. *Soil Biology and Biochemistry* 45: 132-135.
- Salviaggiotti F, Miralles DJ. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy* 28: 282-290.
- Salviaggiotti F, Gerster G, Bacigalupo S, Castellarin J, Galarza C, González N, Gudelj V, Novello O, Pedrol H, Vallone P. 2004. Residual and fresh effects of phosphorous and sulphur on soybean following wheat. *Ciencia del Suelo* 22: 92-101.
- Salviaggiotti F, Ferraris G, Quiroga A, Barraco M, Vivas H, Prystupa P, Echeverría H, Gutiérrez Boem FH. 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research* 135: 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.011>
- Salviaggiotti F, Magnano L, Ortez O, Enrico J, Barraco M, Barbagelata P, Condori A, Di Mauro G, Manlla A, Rotundo J, García FO, Ferrari M, Gudelj V, Ciampitti I. 2021. Estimating nitrogen, phosphorous, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. *European Journal of Agronomy* 127, 126289. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126289>
- Scherer HW. 2001. Sulphur in crop production. *European Journal of Agronomy* 14: 81-111.
- Schomberg HH, Wietholter S, Griffin TS, Reeves DW, Cabrera ML, Fisher DS, Endale DM, Novak JM, Balkcom KS, Raper RL, Kitchen NR. 2009. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. *Soil Science Society of America Journal* 73: 1575-1586.
- Setiyono TD, Walters DT, Cassman KG, Witt C, Dobermann A. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research* 118: 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.006>
- Singh J, Brar BS, Sekhon BS, Mavi MS, Singh G, Kaur G. 2016. Impact of long-term phosphorous fertilization on Olsen-P and grain yields in maize-wheat cropping sequence. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 106: 157-168.
- Soriano A, León RJC, Sala OE, Lavado RS, Deregibus VA, Cahupé MA, Scaglia OA, Velázquez CA, Lemcoff JH. 1991. Río de la Plata grasslands. In: R. T. Coupland, ed. *Ecosystems of the world 8A. Natural grasslands. Introduction and western hemisphere*. Elsevier, New York. Pp 367-407.
- Spiertz JHJ. 2010. Nitrogen, sustainable agriculture and food security. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 43-55. <https://doi.org/10.1051/agro:2008064>
- Sucunza FA, Gutiérrez Boem FH, García FO, Boxler M, Rubio G. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy* 96: 87-95.
- Tisdale SL, Reneau Jr RB, Platou JS. 1986. Atlas of sulfur deficiencies. *Sulfur in agriculture* 27: 295-322.
- Torres Duggan M, Melgar RJ, Rodríguez MB, Lavado RS, Ciampitti IA. 2012. Sulfur fertilization technology in the Argentine Pampas region: A review. *Agronomía y Ambiente* 32: 61-73.
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
- Manuel-Navarrete D, Gallopín GC, Blanco M. et al. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ Dev Sustain* 11, 621-638 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10668-007-9133-0>
- Wyngaard N, Cabrera ML. 2015. Measuring and estimating sulfur mineralization potential in soils amended with poultry litter or inorganic fertilizer. *Biology and Fertility of Soils* 51: 545-552.
- Wyngaard N, Crespo C, Angelini H, Eyherabide M, Larrea G, Reussi Calvo N, Carciochi W, Sainz Rosas H. 2022. The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. *CATENA* 212: 106126.
- Zhang W, Xu M, Wang B, Wang X. 2009. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China. *Nutrient cycling in agroecosystems* 84: 59-69.
- Zhao RF, Chen XP, Zhang FS, Zhang H, Schroder J, Römheld V. 2006. Fertilization and Nitrogen Balance in a Wheat-Maize Rotation System in North China. *Agronomy Journal* 98: 938-945. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0157>
- Zubillaga MM, Conti ME. 1996. Availability of exchangeable and non-exchangeable K in Argentine soils with different mineralogy. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159: 149-153.



FERTILIZAR

ASOCIACION CIVIL



FERTILIZAR.ORG.AR