



SIMPOSIO **FERTILIDAD 2025**

Nutrir el suelo, alimentar el futuro

7 y 8 de mayo

Metropolitano, Rosario

ACTAS

ÍNDICE

CONFERENCIAS

→ Impacto de la agricultura sobre la fertilidad de los suelos	3
→ La fertilización de cultivos anuales en la Argentina:	4
Brechas de aplicación	
→ Bases de la relación entre el fósforo del suelo y las plantas	5
→ ¿Por qué una campaña “Suma P”?	6
→ Bases de la relación entre el fósforo del suelo y las plantas	9
→ El manejo de fósforo en sistemas agrícolas	11
de la región pampeana argentina	
→ Degradación de suelos y salud humana	14
→ La situación nutricional. Una mirada Global y Regional	15
→ Salud física del suelo y nutrición	17
→ Sistemas de Producción. Influencia del manejo sobre los suelos	20
→ Huella de carbono en sistemas de producción agropecuarios	21
→ Avanzando el Uso de Agricultura Digital:	44
Estado Presente y Futuro	
→ Agronomía Aumentada. Gemelos Digitales para aprender	45
y decidir mejor la nutrición en sistemas complejos	
→ Manejo sitio-específico de nutrientes:	46
experiencias de 12 años de aprendizaje	
→ Manejo de Nutrientes de Precisión en EE.UU.:	65
Tendencias Actuales y Oportunidades Futuras	
→ Una mirada agronómica en el uso de biológicos para	67
la nutrición de los cultivos	
→ De la teoría a la práctica: Fertilizantes de Eficiencia Mejorada	75
→ ¿Cómo aprovechar los beneficios de los bioestimulantes	85
vegetales?	
→ Fertilización de recursos forrajeros en la ganadería argentina 2025	87
→ Fertilización de forrajeras anuales de invierno y verano:	96
estrategias para maximizar rendimiento y calidad	
→ Nutriente estratégico para mejorar productividad de pasturas	100
en suelos en la región pampeana	

ÍNDICE

POSTER

- 102 Calibración de métodos de diagnóstico de potasio basados en el análisis de suelo
- 110 Modelos para apoyar el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en trigo en el centro oeste bonaerense
- 124 Gestión del nitrógeno en maíz: balance entre productividad y sostenibilidad
- 135 Estrategias de largo plazo para mejorar la nutrición
- 137 Nutrición en la Rotación: La experiencia de la región CREA Córdoba Norte
- 152 Producción de materia seca, cambios en la condición de acidez y absorción de nutrientes del raigrás perenne (*Lolium perenne* L) en suelos tratados con "Spanish River Carbonatite" (SRC) bajo condiciones controladas
- 166 Dosis y disponibilidad óptima económica para N en maíz en el NEA
- 173 Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe: 25 años de experimentación e investigación en lotes de producción
- 192 Actividad de enzimas β -glucosidasas como indicador de cambios en el uso y la fertilidad de los suelos
- 200 Fertilización con diferentes dosis y fuentes nitrogenadas durante V6 del maíz en la región NOA
- 205 Beneficios y desafíos agronómicos del uso de purines porcinos estabilizados en lagunas anaeróbicas (Córdoba, Argentina)
- 206 Identificación y manejo de nutrientes limitantes en el cultivo de alfalfa en Entre Ríos
- 212 Evaluación física y económica de la fertilización con fósforo en experimentos de largo plazo
- 221 Potasio: Explorando deficiencias y respuestas a la fertilización en las regiones pampeana y mesopotámica argentinas
- 222 Evaluación de uso agronómico de efluente porcino en cultivo de soja (Campaña 2023-2024)
- 228 Un Nuevo Enfoque para la Fertilización en Maíz: Predicción de la Demanda de Nitrógeno con Curvas de Absorción Crítica
- 230 Maíz en el NEA: ajuste de la fertilización nitrogenada
- 231 ¿Mejoramos el rendimiento y calidad de maíz y soja con el encalado?
- 238 Evaluación de fertilizantes orgánico y biológico aplicados en el cultivo de trigo
- 244 Incorporación de nitrógeno en trigo. Moda actual o necesidad? Nitrogen incorporation in wheat: current trend or necessity?
- 251 Producción de forraje y eficiencia en el uso del agua en pastura fertilizada con fósforo y azufre
- 256 El manejo nutricional como clave para la salud del suelo y la maximización de la productividad
- 263 Evaluación económica del uso de vicia previa a maíz tardío en la región pampeana
- 273 Respuesta del maní a la fertilización: efectos sobre el rendimiento y la absorción de boro y zinc
- 275 Evaluación de metodologías para la delineación de zonas de manejo de fósforo
- 290 Residualidad de la fertilización azufrada en el doble cultivo trigo/soja: ¿castrojo o suelo? ▲
- 291 Cultivos de cobertura mezclas: ¿La proporción de especies modifica la respuesta a la fertilización nitrogenada en el maíz posterior? ▲
- 297 Volatilización y retorno económico de las principales fuentes nitrogenadas para maíz en el NOA ▲

Impacto de la agricultura sobre la fertilidad de los suelos de la Región Pampeana Argentina

► ► **Sainz Rozas, H.** ^{1,2,3}, **Reussi Calvo, N.** ^{2,3}, **Wyngaard, N.** ^{2,3},
Eyherabide, M. ¹, **Angelini, H.** ¹, **Larrea, G.** ¹, **Garello, F.** ⁴, **Avila Manotoba, O.** ¹,
Orcellet, J.M. ⁵, **González San Juan, F.** ⁶, **Ciarlo, E.** ⁶

¹ IPADS EEA INTA Balcarce-CONICET, Balcarce, Buenos Aires, Argentina

² Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina

⁴ AER Maipú-EEA Cuenca del Salado ⁵ Nidera Semillas ⁶ Fertilizar Asociación Civil

✉ sainzrozas.hernan@inta.gob.ar

RESUMEN

La producción de granos se ha incrementado durante los últimos años en la Argentina, pasando de aproximadamente 39 millones de toneladas en 1993 a casi 140 millones de toneladas en la actualidad. Si bien el consumo de fertilizantes se incrementó, la reposición de nutrientes es menor a su extracción en los granos. Este panorama sumado a la falta de rotaciones con pasturas y su impacto negativo en la materia orgánica (MO) de los suelos pone en riesgo la sostenibilidad de los sistemas productivos. Desde el 2011 se comenzó a realizar un muestreo georeferenciado en 570 lotes de la región pampeana Argentina (RPA) con el propósito de evaluar la dinámica de variables edáficas relacionadas con la fertilidad. El muestreo realizado en 2018 mostró caídas importantes de todas las variables edáficas relacionadas con la fertilidad respecto a la condición prístina. Sin embargo, se desconoce cómo estas han evolucionado desde el 2018 a la actualidad. Durante el invierno del 2024 se tomaron un total de 570 muestras de la capa superficial del suelo (0 a 20 cm) en los mismos sitios y se determinó el contenido de MO, P extractable (P-Bray), pH (1:2,5), calcio, magnesio y potasio intercambiable (Ca_i , Mg_i y K_i), cinc extractable con DTPA (Zn-DTPA) y boro extractable con acetato de amonio (B- AcNH_4). Se realizaron mapas utilizando el método de interpolación más apropiado para cada variable. El contenido de MO en general fue similar respecto al del 2018, aunque mostró una disminución hacia el oeste de la RPA. Los valores actuales varían del 2,25 al 3,97% y son del 15 al 34% más bajos que aquellos de suelos prístinos. El pH en general fue similar al del 2018, aunque mostró una disminución hacia el oeste de la RPA. Los valores actuales varían de 5,99 a 6,4 y son del 5 al 9% más bajos que aquellos de suelos prístinos. Los valores de P-Bray variaron de 13 a 18 mg kg^{-1} y son del 36 al 82% más bajos que aquellos de suelos prístinos. Los valores más bajos ($< 10 \text{ mg kg}^{-1}$) se observaron al este de la RPA. Casi el 60% de los suelos cultivados de la Argentina (aproximadamente 18.200.000 h) muestran valores limitantes de P-Bray. Los valores de Ca_i y Mg_i se redujeron respecto al 2018. Los valores de Ca_i y Mg_i varían de 1000 a 3000 mg kg^{-1} y de 200 a 380 mg kg^{-1} , respectivamente. Las zonas con valores más bajos de ambos nutrientes se ubican al centro-oeste de la RPA. Los valores de Ca_i y Mg_i son casi un 50% más bajos que aquellos de suelos prístinos. Por el contrario, los valores de K_i fueron similares a los del 2018, excepto al este de la RPA. Los valores de K_i variaron de 266 a 656 mg kg^{-1} y son de un 27 al 61% inferiores que aquellos de suelos prístinos. Aproximadamente 4.500.000 h, casi 22% del área cultivada, tiene valores bajos a medios de K_i . Los valores de Zn-DTPA se incrementaron al norte de la RPA respecto al 2018, no obstante, el 32% de la superficie total cultivada de la Argentina (9.500.000 h) tiene valores muy bajos a bajos (0,40 a 0,80 mg kg^{-1}). Los valores actuales de B- AcNH_4 fueron inferiores que los del 2018 y varían de menos de 0,5 a 1 mg kg^{-1} . Los valores actuales de Zn-DTPA y B- AcNH_4 son de un 46 al 76% más bajos que aquellos de suelos prístinos. La situación actual de los suelos bajo agricultura en Argentina sugiere que es indispensable mejorar el balance de carbono e incrementar el uso responsable de los nutrientes.

La fertilización de cultivos anuales en la Argentina: Brechas de aplicación

► ► **Díaz-Zorita, M.**

Facultad de Agronomía UNLPam, CONICET, Santa Rosa (La Pampa, Argentina)

✉ mdzorita@agro.unlpam.edu.ar

En gran parte del área agropecuaria argentina, la baja fertilidad actual de los suelos representa una limitación significativa para la producción de cultivos. Numerosos estudios muestran una expansión de la superficie cultivada sobre suelos con disponibilidad insuficiente de nutrientes para el desarrollo adecuado de las plantas. Frente a esta restricción, el uso de fertilizantes se ha convertido en una práctica agronómica generalizada, especialmente en los cultivos de cereales. La fertilización se implementa mediante diversas estrategias de manejo, cuya revisión permite identificar decisiones que optimicen sus resultados sobre los cultivos y los sistemas productivos. Esta presentación tiene como objetivo describir y analizar el uso habitual de fertilizantes en la producción agrícola argentina, las brechas en su aplicación y algunas prácticas que podrían reducirlas. Una aplicación eficiente y responsable de fertilizantes requiere conocer la fertilidad del suelo y establecer decisiones de manejo coherentes con objetivos específicos a distintas escalas. En este marco, desde 2016 la asociación Fertilizar AC, junto a investigadores del sector público e independientes, desarrolla una red de ensayos con secuencias agrícolas continuas. El objetivo es evaluar el impacto de cuatro esquemas de manejo nutricional sobre los rendimientos y la sustentabilidad del sistema productivo. Las estrategias evaluadas son: i) control sin fertilización, ii) fertilización frecuente según el uso habitual en la región, iii) fertilización ajustada para alcanzar rendimientos medios regionales, y iv) fertilización para lograr rendimientos potenciales altos. En un total de 95 ensayos realizados en 7 campañas, 16 sitios y 9 cultivos, se observó una pérdida de rendimiento del 32 % en promedio cuando no se fertiliza, con un deterioro anual cercano al 1 %. Las prácticas frecuentes, aunque mejoran los rendimientos, aún presentan un 17 % de brecha respecto al manejo orientado a altos rendimientos, y un 7 % respecto a las recomendaciones para producción media. Recientemente, se incorporaron sitios de evaluación en las regiones del NOA y NEA, cuyos resultados preliminares reflejan patrones similares a los de la región pampeana. En todos los casos, las recomendaciones medias se basan en el diagnóstico de las limitaciones edáficas, el ajuste de dosis según el rendimiento esperado, y la aplicación anticipada a la demanda máxima de los cultivos, respetando las condiciones que favorecen la disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo. Una fertilización balanceada, oportuna, accesible y adecuada a los requerimientos del cultivo permite reducir las brechas entre la práctica habitual y el uso preciso de herramientas de diagnóstico y manejo disponibles localmente. En Argentina, es posible mejorar la eficiencia de la fertilización mediante la implementación de diagnósticos de suelos y de expectativas productivas ambientadas, seleccionando fertilizantes y estrategias de aplicación en función de las condiciones específicas de cada región productiva.

Bases de la relación entre el fósforo del suelo y las plantas

► ► Rotondaro, R. ^{1 2}

^{1 2} Fertilizar Asociación Civil, Asociación de Cooperativas Argentinas

✉ rotondaro@acacoop.com.ar

Los fertilizantes juegan un rol fundamental en los sistemas de producción contribuyendo a la sostenibilidad, produciendo cantidad y calidad a lo largo del tiempo. En Argentina el uso de fertilizantes es relativamente reciente en el tiempo a partir de la década del 90. Del total de fertilizantes que se utiliza en el país un tercio se produce localmente: urea, superfosfato simple y tiosulfato de amonio que se mezcla con el UAN. Se importa Urea, Fosfato monoamónico, fosfato diamónico y UAN. En los últimos 5 años la Urea se trae fundamentalmente de Egipto, Argelia Nigeria y el UAN de EE.UU y Rusia. En cuanto a los fosfatados, Marruecos, China, EE.UU y Rusia son los países proveedores más relevantes. La mitad de los fertilizantes llegan al país a puerto San Nicolas y la otra mitad a San Lorenzo, Necochea, Rosario y Bahía Blanca. El ritmo de importación y uso no es parejo en el año, siendo el segundo semestre el que marca el ritmo de utilización de la tecnología. La cadena de valor del fertilizante empieza en las fábricas, las mismas se abastecen de la materia prima para poder producir el fertilizante que, en la otra punta, utiliza el productor. En el medio estan los depósitos portuarios de origen, el barco con bodegas, el puerto local, los depósitos, el camión, el depósito del distribuidor y finalmente, el contratista o productor que aplica los nutrientes en tiempo y forma para el cultivo. Todo un proceso que tiene que funcionar de manera sincronizada. Cabe destacar que toda la cadena ha realizado importantes inversiones a lo largo del tiempo, para poder abastecer a los productores de un insumo donde la logística y la planificación son pilares fundamentales. El consumo de fertilizantes en Argentina ha experimentado un crecimiento sostenido a lo largo de los últimos 30 años. Si tomamos periodos de 10 años, del 95 al 2004, el uso aumento a una tasa anual de 14 %. Los siguientes 10 años, hasta el 2014, esa tasa disminuyo, siendo solo 3,5 %. Finalmente, en el periodo 2015 al 2024, la tasa anualizada fue del 6,1 %. Podemos decir que el ritmo de uso de la tecnología del fertilizante creció un 7,9 % en promedio los últimos 30 años. Es un buen ritmo de crecimiento que estuvo influenciado por distintas condiciones ambientales, económicas y políticas. Si tomamos los cultivos principales, hay 3 que explican el 80 % del uso de fertilizantes. Ellos son, de mayor a menor importancia, el maiz, el trigo y la soja. Los fertilizantes especiales son una amplia variedad de productos y tecnologías que vienen creciendo fuertemente en su adopción. Los podemos clasificar en: Biofertilizantes, Bio estimulantes, fertilizantes minerales (solidos complejos, foliares y semilla) y por ultimo los fertilizantes de liberación lenta o controlada. El crecimiento del uso de fertilizantes que tuvimos no pudo compensar la extracción de nutrientes que realizaron los 6 cultivos principales. La diferencia entre la extracción de nutrientes cosechados y la reposición por fertilizantes la llamamos brecha de nutrientes. Si tomamos los últimos 30 años y cuatro nutrientes como el nitrógeno, fosforo, potasio y azufre, hemos repuesto solo un 30 %. Esto nos plantea un desafío hacia adelante que es lograr un mayor equilibrio entre lo cosechado y el aporte que hacemos por fertilización. Para ello Fertilizar y las empresas que la componen tienen el compromiso de seguir trabajando para difundir conocimiento sobre la nutrición y el cuidado del suelo para una producción sostenible.

¿Por qué una campaña “Suma P”?

► ► **Ciarlo E. ^{12*}, González Sanjuan, MF ¹**

¹ FERTILIZAR ASOCIACIÓN CIVIL

² Facultad de Agronomía de la UBA

✉ eciarlo@fertilizar.org.ar

RESUMEN EXPANDIDO

>. INTRODUCCIÓN

Hace mucho tiempo, el entrañable Hamlet con una masa de fosfatos de calcio en la mano, lleno de ira y desesperación por el asesinato de su padre a manos de su tío, se preguntaba a sí mismo sobre la relevancia de la existencia. Sesenta y nueve años después, un químico alemán descubría el fósforo elemento. Henning Brandt, un alquimista que buscaba la piedra filosofal, ese material fantástico que podía transformar el plomo en oro, se puso a hervir orina y descubrió el fósforo en un residuo blanco fosforescente.

Hoy, cuatrocientos años después de estos eventos surge entre los que tenemos que ver de alguna manera u otra con el manejo de los suelos y la nutrición de cultivos, un dilema casi tan trascendental que el de La trágica historia de Hamlet, aunque menos trágica por supuesto, que es: ¿qué queremos ver y qué no queremos ver con lo que le pasa en nuestros suelos a uno de los nutrientes clave, ese que conocemos todos, el fósforo?

>. SER O NO SER, VALORES VS REALIDAD

Ser o no ser, o en este caso ver o no ver, es una de las preguntas fundamentales de la experiencia humana que, surge cuando los valores y la realidad entran en conflicto, y este parece ser el caso del fósforo en los suelos productivos de Argentina.

Lo primero que deberíamos “ver” (y también entender e incorporar) es que los suelos de Argentina están perdiendo fósforo, año tras año, campaña tras campaña. Los datos que se presentaron en este Simposio nos lo confirman. Esta situación no parece ser exclusiva de la zona tradicionalmente agrícola de Argentina, la gran Pampa Húmeda; estudios publicados en el 2024 de las zonas del NOA y NEA del Dr Sainz Rozas y su equipo muestran las mismas tendencias: los colores verdes se van transformando en amarillos, los amarillos en naranjas y los naranjas en rojos. Adicionalmente, hay que considerar que esas pérdidas están moviendo los valores de P hacia situaciones de deficiencia: los colores que van ganando lugar en los mapas se relacionan con valores menores a 10 y 15 ppm de P bray, es decir a valores que pueden (y suelen hacerlo) limitar los rendimientos de los cultivos

>. CULPABLE: LA BAJA REPOSICIÓN

El responsable de esta situación tiene poco para defenderse...la producción argentina, como derivado de la herencia de unos suelos de altísima calidad, se ha caracterizado por una reposición de nutrientes en general, y de P en particular, mucho menor a la extracción por los cultivos. Esto se repite y amplifica incluso en elementos como el K o el S. Y esto no es algo nuevo, no empezó esta campaña, es una tendencia que vemos desde que empezamos a relevar los números en serio.

Sin embargo, si bien el promedio de los últimos 30 años apenas supera el 50% de reposición de nutrientes, por suerte parece haber una tendencia a la mayor reposición.

Entonces lo que está pasando en cada campaña, y para decirlo con claridad es que se están vendiendo las joyas de la abuela, el futuro de la producción, porque no se puede producir sin fósforo. Las estimaciones indican que la diferencia media de exportación menos el agregado vía fertilización es de una pérdida neta de 6 kg de P por hectárea por año; en casi 33 millones de hectáreas de trigo, maíz y soja, se están perdiendo alrededor de 200.000 toneladas de P por año, equivalente a un millón de toneladas de fertilizante de alta concentración de P. Y aquí debemos introducir un paréntesis nada menor: Argentina no tiene yacimientos de roca fosfórica, por lo que depende y dependerá de la importación para abastecer la demanda.

Ahora se podría pensar que esta es la situación más común en todos los países que son grandes productores de granos, que la producción requiere el uso de los nutrientes del suelo para que crezcan los cultivos ¿será un dilema del cual ningún país puede salir? La respuesta es definitivamente no, no es una situación común. Lo que vemos es que Argentina en este sentido es muy distinta a lo que ocurre en el mundo: lo que el mundo ve (lo vemos en las publicaciones internacionales) es que Argentina, de los países que tienen peso en la producción de alimentos en el mundo, es el que tiene los balances más negativos en la reposición de P, con lo que implica esto en una superficie productiva tan amplia como la nuestra.

>. ¿ES FÁCIL VER ESTOS DESBALANCES?

Este agotamiento nutricional de los suelos, que se estima cuando hacemos las cuentas entre aporte y extracción de nutrientes, y se evidencia en como cambian en el tiempo los mapas de los diferentes nutrientes, es definitivamente una realidad. Pero inexorablemente surge la pregunta: ¿puede verse esto a escala de lote? ¿Se evidencia directamente en las plantas? La respuesta es que en general NO, no se ve claramente a escala de lote. Cuando vemos las deficiencias (si es que las vemos porque la mayoría muestra deficiencias sub clínicas) ya es tarde la mayoría de las veces, el suelo ya se encuentra en una situación de agotamiento. Con ensayos (a veces) podríamos ver este agotamiento, especialmente cuando son ensayos de largo plazo.

¿Y por el lado del suelo? ¿Con los análisis de suelos? Siempre se insiste con que el análisis de suelos es una herramienta económica que nos brinda mucha información. Y dentro de la batería de análisis de suelos, para el caso del P, el indicador común (y único que se usa), se llama P extractable Bray, debido al nombre del extractante utilizado (Bray & Kurtz 1). El P Bray es muy bueno para predecir los rendimientos y las respuestas en rendimiento al agregado de P, pero, la pregunta es ¿qué tan sensible es el P Bray a este desbalance entre aportes y extracciones? Lo que se suele evidenciar es que la sensibilidad cambia entre niveles de P Bray: el P Bray es sensible y se mueve fuertemente cuando los valores se mueven en niveles altos de P, en condiciones de reposición. Por el contrario, cuando se llega por agotamiento a valores bajos de P las bajadas de P Bray son poco pronunciadas, y no explican con justicia las pérdidas de P: nos vamos chocando contra las fracciones más resistentes de P, menos relacionadas al P Bray (Ej. Sucunza et al., 2018). Por ello con el P Bray no podemos “ver” fácilmente los desbalances, sólo lo vemos con valores de P altos.

>. ENTONCES, ¿SON TODAS MALAS NOTICIAS?

No, hay buenas noticias también. Como el fósforo es un nutriente poco móvil, y el fósforo no tiene muchas más salidas que lo que se exporta con los granos, si se agrega fósforo por encima de los requerimientos, el fósforo que sobra se queda en el suelo, ya que el suelo tiene muchos sitios donde almacenar este nutriente, y además mejora la nutrición porque a valores más altos de P, se incrementan en mayor medida las fracciones de P más disponibles. Las estimaciones indican que para subir 1 ppm de PBray a 0-20 cm de profundidad se requieren entre 3 y 5 kg de P elemento (unos 12-20 kg de fertilizante fosfatado), son solo algunas ideas de números (Sucunza et al., 2018; Rubio et al., 2007; Ciampitti et al., 2011).

>. ¿QUÉ HACEMOS? CAMPAÑA SUMA P

Volviendo al dilema de una realidad (el agotamiento de nuestros suelos) que se choca con nuestros valores (todos queremos suelos más sanos, fértiles, nutridos, productivos), algo hay que hacer. Para ello, se diseñó una campaña que intenta mostrar con datos probados que aplicar P es una buena práctica de manejo, que sumar P hace la diferencia, el programa “SUMA P”

El programa tiene dos herramientas básicas y casi obvias para promover esta idea: la recopilación de un núcleo de conocimientos duros que luego son adaptados, difundidos y amplificados para que puedan llegar a la mayor cantidad de gente posible.

El armado del núcleo de conocimientos se pensó de manera que tenga datos tomados de la investigación científica más rigurosa, con los materiales disponibles de mayor calidad técnica. Para que sea de lectura rápida y de accesibilidad sencilla, se separó el contenido en 64 fichas técnicas independientes, repartidas en 6 secciones, que tratan cuestiones ligadas a la dinámica del P en los suelos, las plantas, el diagnóstico, los requerimientos, y análisis económicos de la herramienta de fertilización con P, haciendo hincapié en esta versión del Programa en el cultivo de soja y de cultivos forrajeros (especialmente la alfalfa), producciones de relevancia productiva y económica, y grandes demandantes de este nutriente.

Estas fichas, además de estar en la web de FERTILIZAR, fueron luego adaptadas y modificadas en su formato para que sus ideas centrales puedan ser comunicadas al medio con una cantidad de herramientas variadas, con centro por supuesto en la difusión por redes sociales. El trabajo de comunicación de este programa fue exhaustivo, y pretende continuar.

Toda la información se encuentra disponible permanentemente en una landing page específica de FERTILIZAR, que cuenta con toda la información y un formulario de contacto: <https://fertilizar.org.ar/suma-fosforo-hace-la-diferencia/>

>. AGRADECIMIENTOS

La puesta a punto del programa fue posible gracias al acompañamiento de la empresa OCP, que con su apoyo económico permitió poner la campaña en valor y funcionar activamente, transformándola en una campaña de alta penetración.

>. BIBLIOGRAFÍA

Ciampitti, I.A., García, F.O., Picone, L.I. & Rubio, G. 2011. Phosphorus Budget and Soil Extractable Dynamics in Field Crop Rotations in Mollisols. Soil Sci. Soc. Am. J., 75: 131-142.

Rubio G., Cabello MJ & Gutiérrez Boem FH. 2007. ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas Sur y Norte de la Región Pampeana. Informaciones Agronómicas #35, 6-10.

Sucunza, FA; FH Gutierrez Boem; FO Garcia; M Boxler & G Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. Eur. J. Agron. 96:87-95.

Bases de la relación entre el fósforo del suelo y las plantas

► ► **Rubio G^{1*}, Manenti L¹**

¹ INBA CONICET UBA - Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, UBA, Av. San Martín 4453 (1417DSE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires

✉ rubio@agro.uba.ar

La misión en este segmento del panel de fósforo (P) es explicar en el lenguaje más accesible posible las bases de la relación entre el P del suelo y las plantas. El P es uno de los 17 nutrientes que necesita la planta para completar su ciclo. Es el octavo en términos de cantidad total requerida pero el segundo o tercero en términos de cantidad de fertilizantes vendidos a nivel global, lo que significa que lo que ofrecen los suelos suele no ser suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos.

El P es clave en el almacenamiento y transferencia de energía y como componente estructural de moléculas y de las membranas y paredes celulares. En la disertación se discutirá el concepto muy difundido que el P es un promotor del desarrollo de las raíces. Se mostrará como las plantas son muy hábiles para detectar que es lo que está limitando su crecimiento y actuar en consecuencia redistribuyendo su biomasa. Se arriba a la conclusión que el agregado de P a una planta con déficit del elemento promueve el crecimiento general de la planta y no particularmente de las raíces

En cuanto al ciclo del P en el agrosistema (que incluye la planta y el suelo hasta el volumen explorado por las raíces) se explicará que el P tiene una serie extensa de procesos internos dentro del agrosistema (ej absorción por la planta, reciclado de residuos al suelo) pero pocos procesos que lo conecten con el exterior. No hay gases de P que se puedan escapar del sistema y la lixiviación es de escasa relevancia, al menos en suelos pampeanos. Para evaluar el balance de P en nuestro lote la cuenta es fácil: P del fertilizante menos P exportado.

En cuanto a las formas que se encuentra el P del suelo, la planta solo puede capturar el P en la solución, pero es una fracción muy pequeña, solamente dura un par de días o menos y tiene que renovarse desde otras fracciones. Estas fracciones se pueden clasificar de acuerdo a su cercanía con el P solución, desde las más lábiles a las más resistentes. Los que quisieron estudiar como diagnosticar la oferta del P para el cultivo hace más de 80 años y viendo que el P solución no predecía nada empezaron a probar en el laboratorio formas de atacar el suelo con extractantes más agresivos que saquen el P solución y las fracciones que lo puedan renovar en el corto plazo. Y uno de esos extractantes es el P Bray que para los suelos pampeanos funciona bien. El P Bray extrae todo el P solución y remueve aquellos P adsorbidos que están más cercanos y que renuevan el P solución. En la disertación se explicará como el P es retenido por la matriz del suelo y como este proceso determina su escasa tendencia a movilizarse en el suelo y que parte del fertilizante no está disponible para el cultivo. Este proceso clave se compara

con lo que ocurre con los nitratos del suelo, que tienen una interacción muy menor con la matriz del suelo. Las diferencias entre ambos nutrientes determinan porque se puede utilizar la variable N suelo + N fertilizante en el diagnóstico del N del suelo y no la variable equivalente para el. La habilidad del P Bray como buen predictor de la fertilidad fosforada, se demostró en distintas redes de ensayo locales, alguna de las cuales se destacarán en la presentación. Se destaca que los umbrales críticos de P (P disponible en el suelo -Bray- para alcanzar el 90-95% del rendimiento potencial y a partir del cual la respuesta al P no es rentable) varían entre cultivos, pero son “relativamente” independientes del rendimiento. Se resalta que la información disponible en la Región Pampeana sobre fertilización fosforada es igual o mayor que en las regiones agrícolas de países competidores (ej. corn belt de EEUU).

Finalmente se brindan las herramientas para definir la dosis de fertilizante necesario para lograr el aumento del P disponible en el suelo hasta un umbral determinado.

El manejo de fósforo en sistemas agrícolas de la región pampeana argentina

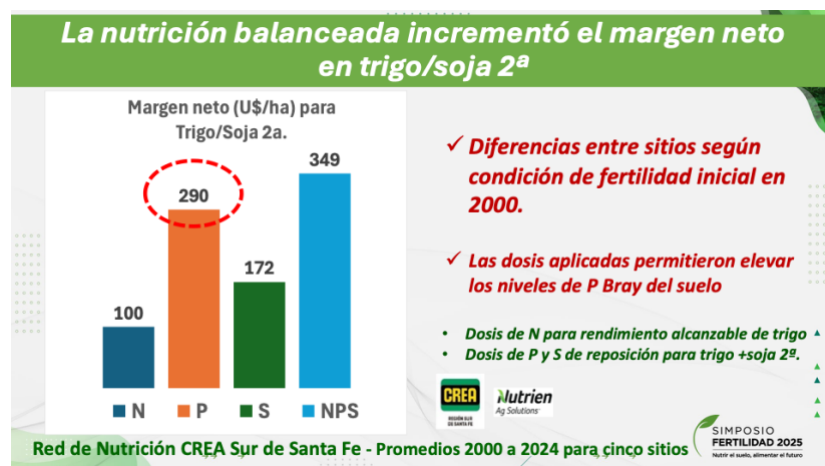
► ► **Fernando O. García¹**

¹Consultor, Profesor Libre Facultad de Ciencias Agrarias Balcarce (UNMdP)

✉ fgarcia1957@gmail.com

El fósforo (P) es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Algunas consideraciones importantes a destacar sobre su manejo en los sistemas de producción de la región pampeana argentina son:

- Dos terceras partes de los suelos de la región pampeana muestran niveles deficientes de P (presentación de Sainz Rozas et al., 2025, en este Simposio).
- El adecuado abastecimiento de P resulta en incrementos en producción y en una mayor rentabilidad. Ejemplo de resultados de 25 años de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe:



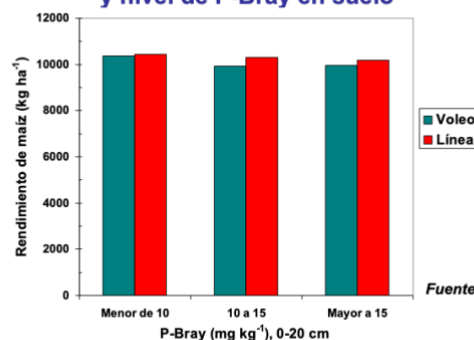
- El análisis de suelo (P Bray) es la herramienta clave para decidir las necesidades de fertilización fosfatada. Las respuestas a la aplicación de P son rentables en lotes o ambientes con niveles de P Bray por debajo del rango crítico estimado para los diferentes cultivos (presentación de Rubio, 2025, en este Simposio).

- El muestreo es la etapa crítica en el proceso de análisis de suelos:



- Las aplicaciones de P deben realizarse a la pre-siembra o siembra de los cultivos dada la importancia de un suministro temprano del nutriente para las plantas.
- Las aplicaciones al voleo pueden alcanzar eficiencias de uso similares a las aplicaciones localizadas en línea cuando se hacen en forma anticipada y con dosis correctas de P. Hay que evitar las aplicaciones en superficie en zonas con pendiente en épocas de alta intensidad de lluvias.

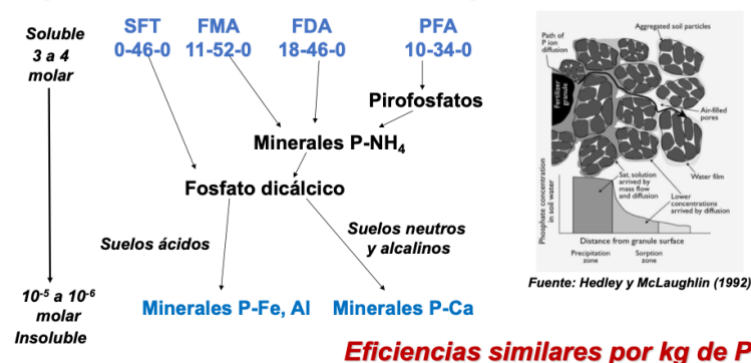
Rendimiento de **maíz** según forma de aplicación del P y nivel de P-Bray en suelo



**Sin diferencias entre aplicaciones en línea y al voleo
OJO con voleos en lotes con pendiente**

- Los fertilizantes convencionales (fosfatos monoamónico o diamónico, superfosfatos simple o triple) presentan eficiencias de uso similares por kg de P. La diferencias suelen presentarse según los nutrientes acompañantes.

Las reacciones de los fertilizantes fosfatados varían entre fuentes, pero finalmente el suelo determina los productos de reacción



- Las alternativas a los fertilizantes fosfatados convencionales son los fertilizantes de eficiencia mejorada, las rocas fosfatadas. Los reciclados orgánicos e inorgánicos y los biofertilizantes. Todos estos productos constituyen alternativas interesantes y promisorias, pero deben ser evaluados según la evidencia científica y técnica disponible y los objetivos y condiciones de cada sistema de producción.

Uso de fuentes alternativas de P
Otras que ortofosfato

- Polifosfatos
- Ácido fosfórico/Fosfitos

Liberación Lenta
Reducción de contacto con el suelo y de área superficial

- Recubrimientos
- Polímeros
- Modificaciones avanzadas y de pH
- Sustratos
- Nanopartículas
- Óxidos de grafeno
- Hidróxidos dobles estratificados
- Matrices orgánicas
- Superabsorbentes
- Estructuras metal orgánicas
- Minerales de solubilidad limitada
- Roca fosfórica
- Productos de la recuperación de aguas residuales
- Nano hidroxiapatita

Bloqueadores
Disrupción de precipitación y de complejo de esfera interna

- Polímero maleico-Itadónico
- Sustancias húmicas

Inductores
Estimulación de adquisición de P planta-microbio

- Nanopartículas de "óxido"

Resumen de los diversos enfoques que se están probando en busca de fertilizantes fosfatados más eficientes
Adaptado de Weeks y Hettiarachchi (2019)



Reciclados

- Estiércol, cama de pollo, efluentes, barros cloacales, otros
- Contribuyen a la circularidad
- Concentraciones variables de nutrientes
- Necesidad de diagnosticar en función de P para evitar excesos
- Posibilidad de combinar con fuentes convencionales

Animal	P total	P inorgánico
Bovinos de carne	0,7-1,2	0,5-0,8
Bovinos de leche	0,5-1,2	0,3-1,0
Porcinos	1,5-2,5	0,8-2,0
Aves	0,9-2,2	0,3-1,2
Equinos	0,4-1,4	0,2-0,8

(Havlin et al., 1999)

Foto: Ing. Edith Weder

Biofertilizantes

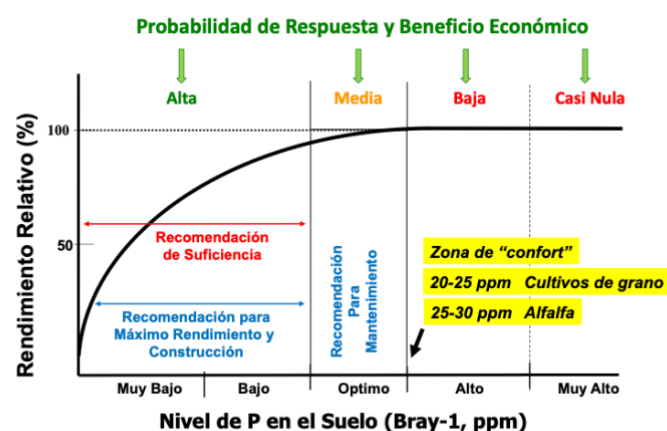
- Microorganismos (bacterias, hongos)
- Oportunidad para agricultura regenerativa
- Efecto acidificante, ¿solubilización?
- Efectos no relacionados a nutrición fosfatada: PGPR, abastecimiento de agua y otros nutrientes, supresión de enfermedades
- Competencia con microflora nativa
- Necesidad de mayor investigación en procesos y de evidencia científica a campo

Raymond et al., 2021; Callaghan et al., 2022; Kumar et al., 2022; Zhu et al., 2024; Barrow, 2025

Vías conceptuales para los microorganismos solubilizadores de fósforo (Raymond et al., 2021)

Representación conceptual de una curva de respuesta del cultivo (liberación de fósforo [P], rendimiento o biomasa) con tres escenarios de productividad (Raymond et al., 2021)

- La dinámica de P en los suelos pampeanos indica que en situaciones de aplicaciones menores que las extracciones en grano o forraje, los niveles de P Bray disminuyen, mientras que cuando se aplican cantidades de P superiores a la remoción, el nivel de P Bray sube. Esta dinámica permite manejar el P en la rotación de cultivos, buscando mejorar niveles de P Bray en suelos deficientes con balances positivos (aplicación > extracción) y reponiendo P para mantener niveles de P inmediatamente superiores a los rangos críticos:



Adaptado de Mallarino, 2007

Degradación de suelos y salud humana

► ► **Taboada MA^{1, 2, *}**

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

² Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria

✉ mtaboada@agro.uba.ar; taboada.miguelangel@gmail.com

>. Una salud: nutriendo suelos, cultivos y humanos

RESUMEN EXPANDIDO

La degradación del suelo es definida como la disminución de la calidad del suelo causada por el inadecuado uso por el ser humano, con consecuencias negativas sobre la productividad del suelo por cambios adversos en el estado de los nutrientes y la materia orgánica de los suelos, los atributos estructurales, y las concentraciones de electrolitos y elementos tóxicos.

La salud de las personas puede ser afectada por efectos directos e indirectos de la degradación de los suelos. Los efectos directos son el resultado inmediato o mediano de la ocurrencia de un proceso de degradación. Por ejemplo, las pérdidas de vidas y bienes por deslizamientos de laderas en montañas y sierras, o las intoxicaciones por ingestión de alimentos de cultivos que crecen en suelos y aguas contaminados. En cambio, los efectos indirectos son a menudo de mediano o largo plazo, no fácilmente identificables, intermediados por otro proceso, como los desequilibrios nutricionales causados por alimentos producidos en suelos con deficiencias en algún micronutriente. Los riesgos de ocurrencia de estos efectos son variables y dependen de los peligros identificados en relación con la degradación de los suelos, la vulnerabilidad de las poblaciones y personas afectadas, y del grado de exposición de estas poblaciones.

La deficiencia de micronutrientes es una gran amenaza para la salud y el desarrollo de la población y afecta especialmente a los niños y las mujeres embarazadas en los países de bajos ingresos. Además de la desnutrición, la deficiencia de micronutrientes también subraya otros problemas de salud como el sobrepeso, la obesidad, las enfermedades cardiovasculares, ciertos tipos de cáncer y la diabetes. En nuestro país, se debe prestar atención especialmente a las deficiencias que se están hallando en contenido de cinc en suelos.

Con respecto a la contaminación de los suelos, las principales fuentes son los productos químicos de actividades industriales, residuos y aguas servidas de origen municipal, doméstico, y de la cría de animales bajo cubierta (incluida las aguas de desecho), los agroquímicos, y los productos derivados del petróleo. Ninguna de ellas es relevante en el sector rural. Sólo el uso inadecuado de pesticidas es de preocupación de en la Argentina.

Como conclusión y síntesis, en la Argentina se produce sobre suelos sanos, pero que presentan problemas incipientes pero que deben ser tenidos en cuenta, pues comprometen la calidad nutricional de los alimentos producidos y de las exportaciones.

La situación nutricional. Una mirada Global y Regional

► ► **Posas Guevara, A¹***

¹ FAO Latinoamérica y el Caribe

✉ Ana.PosasGuevara@fao.org

RESUMEN EXPANDIDO

La idea de esta presentación se centra en el análisis integral de la nutrición y su relación con la salud, la seguridad alimentaria y la gestión de los suelos.

Las cifras de inseguridad alimentaria y malnutrición en América Latina son preocupantes, destacándose situaciones críticas como la alta prevalencia de inseguridad alimentaria en el Caribe: la inseguridad alimentaria moderada y grave afecta aproximadamente al 28% de la población mundial, con el Caribe como la región más crítica.

La malnutrición se presenta en diversas formas: retraso en crecimiento, bajo peso al nacer, sobrepeso infantil y obesidad adulta. El retraso en crecimiento infantil promedio mundial es del 22%, en Latinoamérica es 11% y en Argentina está mejor, con tendencia a la baja (datos de 2022). El bajo peso al nacer afecta al 14% mundialmente, 9.6% en Latinoamérica y algo menos en Argentina. El Sobrepeso infantil es del 5.6% mundial y 8.6% en Latinoamérica, mientras que la obesidad adulta está en 29% mundial y 35% en Argentina. Argentina muestra mejoras en indicadores como el retraso en crecimiento y bajo peso al nacer, pero enfrenta altos niveles de obesidad en niños y adultos.

La deficiencia de micronutrientes como hierro, zinc, yodo y vitamina A representa un problema global conocido como “hambre oculta”, afectando a millones de personas en el mundo. El concepto de “hambre oculta” señala que 2 mil millones de personas sufren deficiencias de micronutrientes, a pesar de consumir suficiente energía.

Más del 95% de los alimentos provienen del suelo, por lo que un manejo integral y saludable del suelo es fundamental para la nutrición humana. Es importante resaltar la importancia de un suelo saludable y fértil, que produzca alimentos nutritivos, subrayando que el manejo integral de la fertilidad del suelo debe ir más allá de la simple aplicación de fertilizantes, considerando aspectos físicos, químicos y biológicos.

La dieta saludable debe ser adecuada, balanceada, diversa, moderada e inocua para garantizar una buena calidad de vida. Hay un desequilibrio en los programas agrícolas, que han priorizado rendimiento sobre valor nutricional de los cultivos. En la actualidad surge el concepto de agricultura sensible a la nutrición, priorizando la calidad nutricional sobre los rendimientos agrícolas tradicionales, aunque no se puede soslayar el alto costo de una dieta sana y balanceada, que limita el acceso en muchas regiones, junto con el desperdicio excesivo de alimentos.

Por último, las sociedades deben replantearse la necesidad de mejorar la biofortificación y el mejoramiento genético orientado no solo a la productividad sino también al valor nutricional de los cultivos, haciendo un llamado a la coordinación multisectorial para enfrentar estos desafíos.

>. CONOCIMIENTOS CLAVE

- **Inseguridad alimentaria regional:** Cuando se analizan las tasas globales, es indispensable observar las disparidades locales, como el elevado porcentaje en el Caribe, que sobrepasa ampliamente la media mundial y latinoamericana.
- **Relación entre nutrición y malnutrición doble:** La conversación ilustra la coexistencia paradójica entre bajo peso y obesidad, reflejando problemas de calidad alimentaria, acceso desigual a nutrientes y hábitos dietéticos desbalanceados en la región.
- **Micronutrientes y hambre oculta:** Aunque se consuman calorías suficientes, la deficiencia en micronutrientes esenciales deteriora la salud general y el desarrollo infantil, lo que llama a reforzar políticas de fortificación, suplementación y educación nutricional.
- **Manejo integral del suelo:** La fertilidad del suelo va más allá del aporte de fertilizantes; implica mantener condiciones físicas, químicas y biológicas óptimas para asegurar la disponibilidad real de nutrientes para las plantas
- **Agricultura sensible a la nutrición:** Implantar un enfoque agrícola que valore el contenido nutricional más allá de la cantidad de producción para mejorar la calidad del alimento desde el origen.
- **Costo y acceso a la dieta saludable:** El alto precio de una dieta balanceada afecta el consumo y la calidad alimentaria, exacerbando la inseguridad alimentaria, especialmente en zonas con menores ingresos, como el Caribe, afectando la equidad y la salud pública.
- **Necesidad de medición y evidencia:** Se enfatiza la urgencia de medir y registrar indicadores nutricionales reales en los alimentos producidos para orientar programas de biofortificación y mejoramiento, garantizando que las políticas y tecnologías se basen en datos científicos y no en suposiciones.

Este análisis invita a un enfoque multisectorial e interdisciplinario que aborde simultáneamente desde la gestión de suelos, mejora genética de cultivos, políticas económicas y sociales, hasta la educación y concienciación de consumidores y productores, con la meta de lograr dietas saludables para toda la población.

Salud física del suelo y nutrición

► ► Imhoff Silvia

ICiAgro Litoral-CONICET-UNL

✉ Imhoff.silvia@gmail.com

>. Sostenibilidad de nuestros sistemas: Suelos y más allá

RESUMEN EXPANDIDO

El suelo es un cuerpo tridimensional complejo constituido por una fracción sólida y por poros, por lo que en general presenta tres fases: la sólida (arcilla, limo, arena y materia orgánica del suelo), la líquida (solución del suelo: agua + nutrientes) y la gaseosa (aire del suelo), siendo que las dos últimas dependen de la fracción porosa.

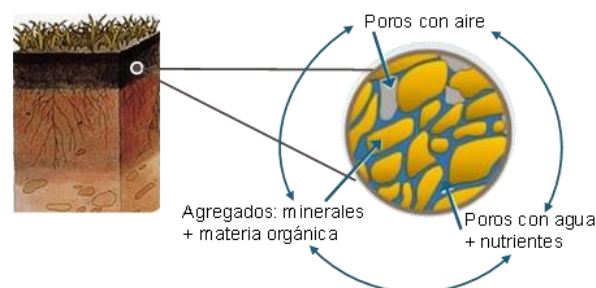


Figura 1. Imagen de un perfil y la ampliación de un sector con las fases del suelo.

A esta complejidad hay que sumar los organismos vivos que habitan el suelo: fauna edáfica, microorganismos y las raíces de las plantas.

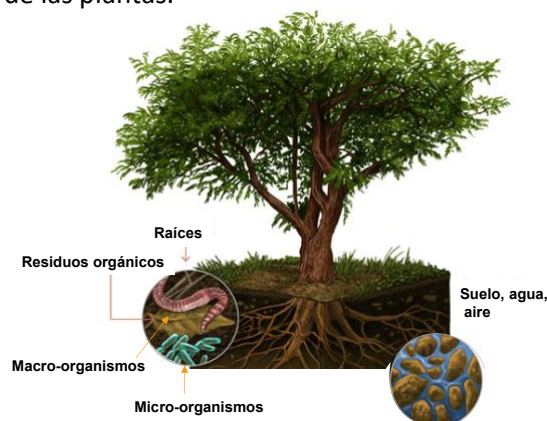


Figura 2. Imagen del suelo con sus fases y componentes vivos y no vivos.

El suelo es un medio biológicamente activo que permanentemente experimenta reacciones físicas, químicas y biológicas condicionadas por el material de origen y factores como el clima, la vegetación, la topografía y el tiempo. Estas interacciones condicionan las diversas características y múltiples funciones que poseen los suelos.

Las interacciones que se establecen entre los componentes de la fracción mineral (arcilla+limo+arena) y la fracción orgánica del suelo definen principalmente su estructura. En general, en suelos prístinos o de buena calidad, la estructura está compuesta por agregados. Estos agregados determinan el espacio poroso, ya sea el volumen total de poros como la diversidad de tamaño. El espacio poroso define el volumen disponible para la fase acuosa y para el aire. Es más, el sistema poroso condiciona la circulación y el intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera, siendo esencial para la respiración de las raíces y la actividad de los microorganismos. También determina el ingreso del agua al suelo, su movimiento y almacenamiento, y por lo tanto la cantidad disponible para los seres vivos que habitan el suelo. Asimismo, el agua en interacción con la fase sólida, a través de numerosas reacciones físico-químicas, condiciona la concentración de nutrientes disponibles en la fase líquida. Por último, el sistema poroso proporciona el hábitat para la fauna y los microorganismos del suelo y el espacio para el desarrollo y la penetración de las raíces de las plantas. Todas estas relaciones marcan la gran importancia que tiene la fracción porosa en el funcionamiento del suelo como soporte de la vida edáfica.

Por otro lado, la composición de la fase sólida, ya sea de la fracción mineral (porcentaje de arcilla, limo y arena, y el tipo de arcilla) como de la fracción orgánica (cantidad total y de las diversas fracciones que la componen), es crucial en la calidad del suelo. Esta fase del suelo condiciona el tipo estructura y su dureza cuando se seca, su fertilidad química, el color y, como consecuencia, su funcionamiento como regulador de factores fundamentales para que se desarrolle la vida en su interior, a saber: la resistencia de la matriz del suelo a la deformación por el crecimiento de las raíces, la disponibilidad de nutrientes y la temperatura.

Inicialmente, los minerales del suelo fueron la única fuente de nutrientes esenciales para los seres vivos que lo habitaban. Las raíces liberan sustancias inorgánicas, como dióxido de carbono al respirar, y orgánicas, como mucílagos, glomalina, hidratos de carbono, entre otras. Estas sustancias, además de reaccionar con la fracción sólida del suelo, son fuente de nutrientes y energía para los microorganismos.

Los microorganismos son esenciales para la salud del suelo dado que son responsables de los procesos de descomposición de los restos de plantas, animales, microorganismos y productos que producen estos seres vivos, liberando durante estas transformaciones los nutrientes que quedan disponibles en la solución del suelo para cubrir las necesidades de las plantas. También son responsables de los procesos de síntesis que conducen a la formación de la materia orgánica del suelo, uno de los principales agentes que intervienen en la formación y estabilización de los agregados del suelo y, como consecuencia, del sistema poroso.

Por otro lado, las raíces ejercen dos tipos acciones: una química por las sustancias agregantes que excretan, y otra mecánica, ya que crecen dentro de los poros existentes o, en ausencia de poros de tamaño adecuado, deben horadar el suelo para desarrollarse. En este último caso, las raíces deben desplazar las partículas sólidas, por lo que comprimen el suelo a su alrededor y, simultáneamente, crean poros y fisuras que constituyen nuevos hábitats para la vida edáfica.

Como resultado, el efecto fundamental de la actividad biológica y radicular es la generación y/o alteración de la estructura del suelo. El tipo de estructura que se genere dependerá principalmente de la especie vegetal, del tipo de raíz (especialmente número de raíces, diámetro, longitud, número de ramificaciones) y del volumen producido, así como del tipo y cantidad de microorganismos (bacterias, hongos). Si las características de la matriz del suelo son tales que su resistencia a deformarse supera la fuerza que puede ejercer la raíz para desplazar las partículas, las raíces no podrán crecer y toda la vida edáfica se restringirá, afectando negativamente el círculo virtuoso que se genera en todo suelo "vivo saludable".

La complejidad y multiplicidad de reacciones que ocurren en el sistema suelo-seres vivos son también responsables de los cambios que ocurren en el ambiente radicular. Estos cambios determinan la variación de pH, el aumento de concentración de nutrientes en la solución del suelo o su reducción por adsorción/fijación a la fracción sólida, la transformación de la materia orgánica y, como consecuencia, la disponibilidad de los nutrientes que dependen de su contenido (N, P, S, entre otros) y el contenido de agentes floculantes (cationes como el Ca) que afectan la estructura del suelo y su porosidad. Todos estos factores, en última instancia, afectan la vida en la rizosfera.

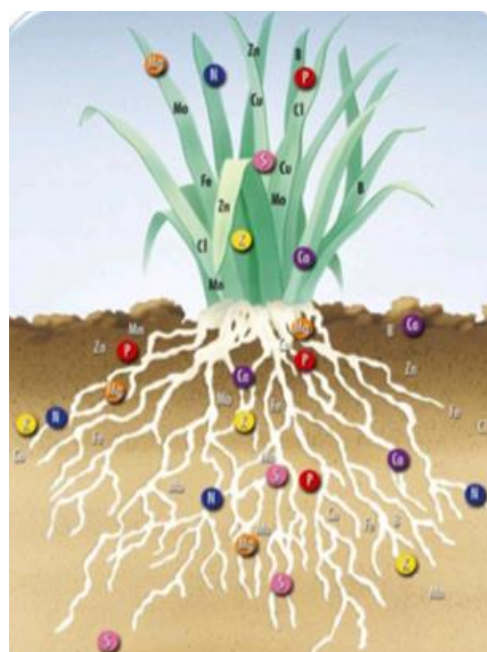


Figura 3. Imagen de la rizosfera con nutrientes (macro y micro) esenciales para las plantas.

Por último, a todas estas relaciones debemos agregar una nueva dimensión: el impacto de la actividad humana. El tipo de sistema productivo (agrícola, ganadero, mixto), su intensificación, el aumento del potencial de rendimiento de los cultivos con el consiguiente aumento de extracción de nutrientes, el nivel de reposición de nutrientes y cationes, el tipo de sistema de cultivo (siembra directa, labranza conservacionista, tradicional), el tipo de maquinaria disponible y el sistema de tránsito en los lotes son factores que afectan la calidad del suelo.

Si la resistencia del suelo a la deformación, que depende de la fase sólida (textura, estructura, cationes agregantes del suelo y materia orgánica) y del contenido hídrico del suelo al momento del tránsito, es superada por el peso de los equipos y de la maquinaria que recorren los lotes se tendrá como resultado su compactación. Este proceso conduce a la densificación con disminución del volumen total de poros y alteración de su tamaño, lo cual altera las relaciones suelo-seres vivos.

Nuevamente queda de manifiesto la complejidad de las interacciones que ocurren entre la fase sólida y la porosa del suelo como consecuencia de la actividad de los seres vivos.

Como corolario se debe resaltar que las relaciones suelo-planta-organismos-hombre son responsables de mantener la vida, tal como la conocemos en la actualidad. Por lo tanto, es esencial desarrollar sistemas productivos que consideren todas estas dimensiones e interacciones para poder mantener y mejorar la salud del suelo, la cual es esencial para lograr una producción agrícola sostenible, respetuosa del ambiente y rentable.

Sistemas de Producción. Influencia del manejo sobre los suelos

► ► **Quiroga AR**

Ex técnico INTA Anguil y docente FA-UNLPam.

✉ aquisrosa@cpenet.com.ar

Un breve análisis sobre las prácticas de manejo que hemos implementado en nuestros sistemas de producción nos permite reconocer que algunas han contribuido a la sostenibilidad y otras con la degradación de los suelos. La materia orgánica (MO) constituye uno de los indicadores más importantes a evaluar esos efectos del manejo que dan lugar a cambios en la calidad de los suelos. Por debajo de ciertos valores umbrales, dependientes de la textura, tienen lugar cambios “no deseados” en las propiedades de los suelos. Algunos suelos han experimentado disminuciones importantes en la MO y asociado a ello presentan dificultades para la captación de agua por pérdida de estructura y macroporosidad; menor desarrollo de raíces por compactaciones que condicionan el uso de nutrientes y la eficiencia de uso del agua. Además, estos cambios en la “salud física de los suelos” requieren para su monitoreo de una serie de indicadores y evaluaciones de campo que normalmente no son realizados por los laboratorios privados. Esta situación plantea un desafío para el productor. Por ejemplo, se dispone de excelentes implementos para descompactar los suelos pero en la medida que no se realice una adecuada caracterización del estrato de suelo compactado (al menos 5 variantes) no se podrá definir la estrategia más adecuada. Es sorprendente el mal uso que se está haciendo de esta práctica. A los fines de facilitar el diagnóstico, se han desarrollado una serie de indicadores visuales “sencillos” que pueden ser evaluados a campo y nos permiten “ajustar” las prácticas y tomar decisiones más adecuadas. Otro aspecto que ha incidido negativamente sobre los suelos es la tendencia al menor aporte de raíces y tiempo de ocupación de las secuencias de cultivos. El índice de rotación (IR) y tiempo de ocupación (TO) son indicadores que pueden contribuir a un análisis más adecuado. El IR representa el aporte anual de biomasa de raíces (promedio de 10 o 20 años), el cual puede variar entre 4 y 8. Por su parte el TO representa el porcentaje del año que las “raíces activas” ocuparon el suelo. Este indicador frecuentemente varía entre 40 y 75%. Por ejemplo, resulta difícil imaginar que un suelo con IR 4,5 y TO 50% pueda recuperar MO o disminuir los problemas de compactación, incluso usando descompactación mecánica. Otra práctica que nos plantea interrogante a futuro es la intensificación ganadera (IG). Por un lado la IG incrementa la eficiencia en el uso del forraje, la ganancia diaria, la producción. Por otro lado se triplica la extracción de algunos nutrientes (exportación a corrales o efluentes) y el suelo queda sin cobertura. También se presentan cuestiones ambientales con mayor concentración de nutrientes, antibióticos generando riesgos de contaminación de napas, por ejemplo. Tanto en la IG como en las secuencias de bajo IR y TO la inclusión de cultivos de cobertura (CC) puede ser una práctica positiva. En los últimos 20 años se ha generado información sobre CC para distintos objetivos (más de 15). Una de las principales dificultades al incluirlos es determinar el momento más adecuado de cortar el ciclo de los mismos. Con frecuencia se comprueba una mala sincronización entre el aporte de nutrientes desde los residuos del CC y los requerimientos del cultivo sucesor. Otro aspecto es tener presente que no todos los años pueden incluirse CC dependiendo principalmente del agua útil remanente al momento de la senescencia del cultivo antecesor, de la cantidad de agua con que debo recargar el perfil pensando en el cultivo sucesor y de los pronósticos climáticos de la campaña. Finalmente, durante el Simposio, se analizarán y ejemplificará sobre estas distintas prácticas que han contribuido de distinta manera sobre la sustentabilidad de los sistemas de producción.

Huella de carbono en sistemas de producción agropecuarios

► ► Bongiovanni, R.B.^{1 2*}; Tuninetti, L.³

¹ INTA Manfredi, ² Universidad Católica de Córdoba
³ INTI Córdoba

✉ Rodolfo_Bongiovanni@yahoo.com

>. INTRODUCCIÓN

La huella de carbono es una herramienta fundamental para evaluar el impacto ambiental de las actividades humanas, especialmente en el contexto de la producción agrícola. Este indicador mide la cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos directa o indirectamente por una actividad, y su análisis es crucial para entender y mitigar el cambio climático.

El cambio climático se define como una variación persistente del clima atribuida, directa o indirectamente, a la actividad humana durante períodos de tiempo comparables, y adicional a la variabilidad climática natural. En este sentido, la agricultura, como uno de los sectores más importantes de la economía argentina, juega un papel significativo en la emisión de estos gases (MAyDS, 2023).

Según la norma ISO 14067, la huella de carbono de un producto (HCP) es la suma de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y remociones de GEI, en un sistema de producción, expresadas como CO₂ equivalente, basadas en una evaluación del ciclo de vida (ACV) utilizando la categoría de impacto única de cambio climático (IRAM-ISO 14067, 2018).

Es crucial aclarar la diferencia entre la **huella de carbono de producto** y el **balance de carbono en suelos**, siendo esta última una medida que evalúa la cantidad neta de carbono que se almacena, libera o se mantiene en el suelo a lo largo del tiempo (AAPRESID, 2025). La huella de carbono incluye el balance de carbono en suelos, pero no a la inversa.

En esta presentación, exploraremos la evaluación de la huella de carbono en diversos sistemas de producción agropecuarios y agroindustriales argentinos, destacando cómo estas mediciones pueden contribuir a la sostenibilidad. Analizaremos los métodos utilizados, los resultados obtenidos y las estrategias de mitigación que pueden implementarse para reducir el impacto ambiental y promover prácticas agrícolas más sostenibles.

>. EL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es uno de los desafíos más importantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el calentamiento global observado desde mediados del siglo XX es principalmente resultado de las actividades humanas, especialmente la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras prácticas que aumentan las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos gases, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), atrapan el calor en la atmósfera y provocan un aumento de la temperatura global. Este calentamiento tiene efectos profundos en los sistemas naturales y humanos, incluyendo el aumento del nivel del mar, cambios en los patrones de precipitación y eventos climáticos extremos más frecuentes e intensos (IPCC, 2021).

El uso del CO_2 equivalente (CO_2e) es fundamental para medir la huella de carbono porque permite comparar el impacto de diferentes gases de efecto invernadero (GEI) en términos de su potencial de calentamiento global (PCG). Cada gas tiene un PCG diferente, que mide la cantidad de calor que un gas puede atrapar en la atmósfera durante un período específico, generalmente 100 años, en comparación con el dióxido de carbono (CO_2), que tiene un PCG de 1. El PCG del metano es 28,9 para y el del óxido nitroso es 273 (IPCC, 2021).

En el mundo, el sector agropecuario tiene un impacto significativo en la huella de carbono global. Las emisiones de GEI provenientes de la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra representan aproximadamente el 18,4% de las emisiones globales, que son de unos 50 mil millones de toneladas de CO_2e (Ritchie, 2020).

El sector agropecuario en Argentina tiene un impacto significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Argentina de 2020, este sector representa aproximadamente el 45% de las emisiones totales de GEI del país. Estas emisiones provienen principalmente de actividades como la fermentación entérica en el ganado, la gestión de estiércol, el uso de fertilizantes y la deforestación (MAYDS, 2023).

Para profundizar en el contexto de las estimaciones de la huella de carbono del sector agropecuario en Argentina, es importante considerar el nivel de producción agrícola y ganadera del país. Según la figura proporcionada, los datos relevantes son una superficie deforestada de 332 mil hectáreas, un stock bovinos de 53 millones de cabezas y una producción agrícola de 164 millones de toneladas.

Estos datos reflejan la magnitud de las actividades agropecuarias en Argentina y su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La deforestación, la producción ganadera y la agricultura intensiva son fuentes significativas de emisiones de CO_2 , metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O).

La producción agrícola de 164 millones de toneladas y la existencia de 53 millones de cabezas de ganado bovino contribuyen significativamente a las emisiones de GEI. La deforestación de 332 mil hectáreas también juega un papel crucial, ya que la pérdida de bosques reduce la capacidad de absorción de CO_2 y aumenta las emisiones de carbono.

Estos datos subrayan la necesidad de implementar prácticas más sostenibles en el sector agropecuario para reducir las emisiones y mitigar el impacto ambiental. La adopción de técnicas de agricultura regenerativa, la mejora en la gestión del estiércol y la reducción de la deforestación son algunas de las estrategias que pueden ayudar a disminuir la huella de carbono del sector.

Para abordar de manera efectiva la reducción de emisiones de GEI en el sector agropecuario, es crucial estudiar la huella de carbono por cadena de valor o sistema de producción agropecuario. Este enfoque permite identificar los puntos críticos de emisión, conocidos como "hotspots", y diseñar estrategias específicas para mitigarlos. Al analizar cada etapa de la cadena de valor, desde la producción hasta la distribución de un producto, se pueden identificar los procesos o actividades que generan la mayor cantidad de GEI. Esto permite focalizar los esfuerzos de mitigación en las áreas de mayor impacto y diseñar intervenciones más eficientes y efectivas, optimizando recursos y maximizando la reducción de emisiones, contribuyendo a un sector agropecuario más sostenible y resiliente.

>. TENDENCIAS DE LOS CONSUMIDORES (DEMANDA) Y DE LA PRODUCCIÓN (OFERTA)

Cada vez más personas buscan productos con menor impacto ambiental. En Argentina y Latinoamérica, el consumo sustentable ha crecido significativamente, con un aumento del 86% en usuarios que eligen productos ecológicos (Reyes, 2021). La demanda de opciones alimentarias sostenibles está en su punto más alto, con un 64% de los consumidores globales buscando activamente productos producidos de manera responsable (Puratos Group, 2024). En la última década, el consumidor ha incrementado la demanda de información sobre los impactos ambientales de los productos. El Eurobarómetro concluyó que más de la mitad de los ciudadanos europeos han visto u oído hablar de al menos una etiqueta ecológica, de los cuales el 30 % afirmó haber comprado un producto con etiqueta ecológica de la UE. Alrededor de un tercio de los encuestados (32 %) informó que las etiquetas ecológicas desempeñan un papel importante en sus decisiones de compra, mientras que una cuarta parte (25 %) asumió lo contrario. Otro punto clave es el hecho de que es más probable que los jóvenes hayan comprado productos con la etiqueta ecológica de la UE (34 % entre 15 - 24 años y 35 % entre 25 - 39 años), en comparación con el 24 % de los mayores de 55 años. En general, en España, el 77% de los consumidores está dispuesto a pagar más por un producto sostenible (Eurobarometer, 2017).

En EE.UU., el Institute for Business Value, de IBM, analizó la influencia de la pandemia sobre la percepción de la sostenibilidad ambiental, en áreas clave: El 54% de los consumidores están dispuestos a pagar más por marcas sostenibles y responsables con el medio ambiente. El 68% de los trabajadores potenciales prefieren postularse y aceptar empleos en empresas con compromiso ambiental, y el 48% aceptaría un salario menor por ello. El 82% de los consumidores elegiría opciones de transporte más ecológicas, incluso si son más caras. El 59% de los inversores personales planea comprar o vender activos en los próximos 12 meses basándose en factores de sostenibilidad. Además, el 93% de los encuestados afirma que la pandemia afectó su visión sobre la sostenibilidad, con un 68% diciendo que su impacto fue significativo (IBM Institute for Business Value (IBV), 2021).

En Europa, las tendencias de los consumidores en relación con la sostenibilidad están evolucionando rápidamente. Según el informe de AZTI, la sostenibilidad se ha convertido en una mega tendencia en el sector alimentario, impulsada por la creciente conciencia ambiental y el impacto del cambio climático. Los consumidores están cada vez más preocupados por el impacto de sus elecciones alimentarias en el medio ambiente. Se observa un mayor interés en reducir el desperdicio de alimentos y en la economía circular. La demanda de opciones de sustitutos de la carne sigue creciendo, aunque el precio y la percepción de sabor siguen siendo barreras para algunos consumidores. Hay una buena aceptación de sistemas de etiquetado ambiental con base científica, lo que ayuda a los consumidores a tomar decisiones más informadas. La mitad de la población está abierta a consumir nuevas fuentes de proteína como algas y hongos, aunque los insectos siguen generando rechazo. Estas tendencias reflejan un cambio en la mentalidad de los consumidores, quienes buscan opciones más sostenibles sin comprometer la calidad y el sabor (Riesco, Picaza, Santa Cruz, & García, 2019).

En el contexto de la transformación del sector agroalimentario hacia 2030, emergen tendencias en el comportamiento de los consumidores que reflejan una preocupación creciente por lo ambiental y lo ético. Los consumidores actuales buscan no solo productos que satisfagan sus necesidades nutricionales y sensoriales, sino también aquellos que incorporen valores sostenibles, lo que se evidencia en la demanda de ingredientes de origen vegetal, alternativas no tradicionales y la transparencia en la trazabilidad de los alimentos. Así, se observa un creciente interés en experiencias culinarias auténticas y en propuestas que invitan a descubrir sabores exóticos, mientras que la digitalización —mediante blockchain y otras tecnologías— se erige como una herramienta clave para garantizar el origen y la integridad de los productos, generando confianza en el mercado. Según el roadmap presentado por Fava-Neves et al. (2020), hacia 2030 estos comportamientos se consolidarán en una revolución en la industria de alimentos y bebidas, donde las exigencias de sostenibilidad se convierten en un diferencial competitivo. Los consumidores valoran cada vez más las propuestas que reducen la huella ambiental, priorizan el bienestar animal y apoyan iniciativas locales, transformando lo que tradicionalmente se veía como barreras proteccionistas en oportunidades para destacar en mercados internacionales. Este cambio de paradigma impulsa a las empresas a ofertar productos gourmet, artesanales o premium que no compitan únicamente por precio, sino que lo hagan basándose en la calidad, el respeto por el medio ambiente y el cumplimiento de altos estándares sociales, lo que, a largo plazo, redundará en una mayor resiliencia y sostenibilidad del sistema alimentario global.

En este contexto, plataformas de difusión de conocimiento científico publican el impacto ambiental de los productos, como Our World in Data (<https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>), que analiza el impacto de los alimentos en términos de huella de carbono, uso de agua y tierra. Su explorador de datos permite comparar diferentes productos según su impacto ambiental. El sitio clasifica los alimentos según su impacto ambiental para ayudar a los consumidores y responsables de políticas a tomar decisiones informadas, en base a dos publicaciones científicas validadas (Poore & Nemecek, 2018). Our World in Data es una fuente de información accesible para todos, desde investigadores hasta consumidores interesados en el impacto ambiental de sus elecciones alimentarias, quienes pueden descubrir qué alimentos tienen menor impacto ambiental, cómo reducir la huella de carbono y qué factores influyen en la sostenibilidad de la producción de alimentos (Figuras 1 y 2).

Figura 1: Huella de carbono de alimentos según (Poore & Nemecek, 2018)

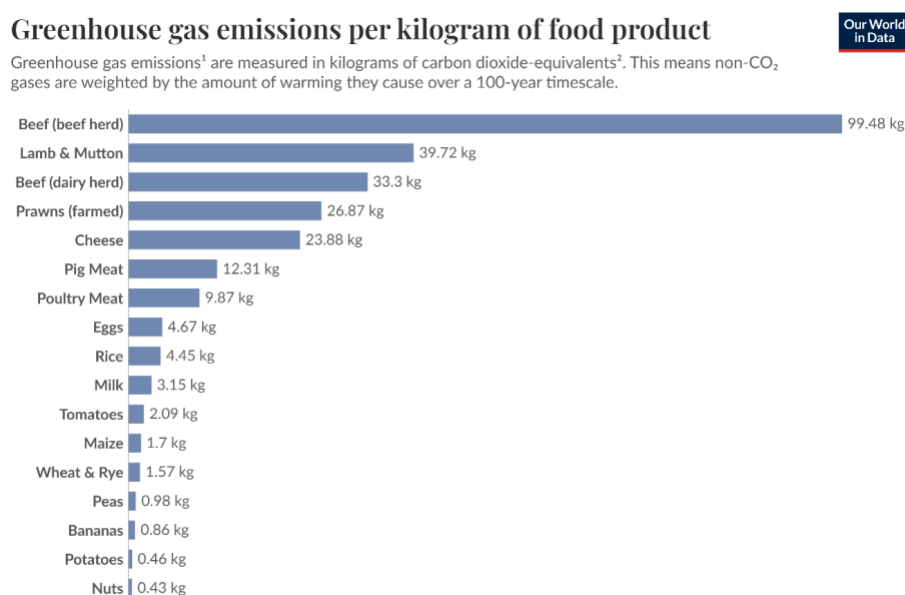
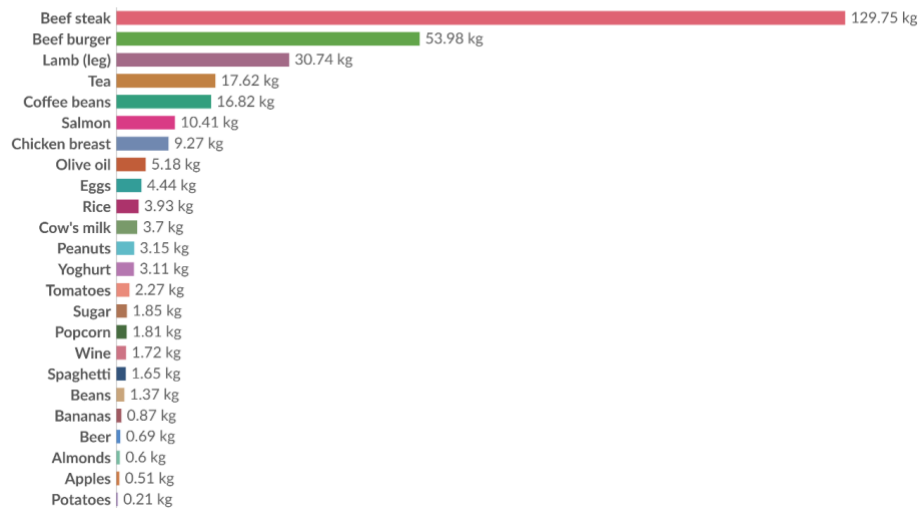


Figura 2: Huella de carbono de alimentos según (Clark, y otros, 2022)

Greenhouse gas emissions per kilogram of food

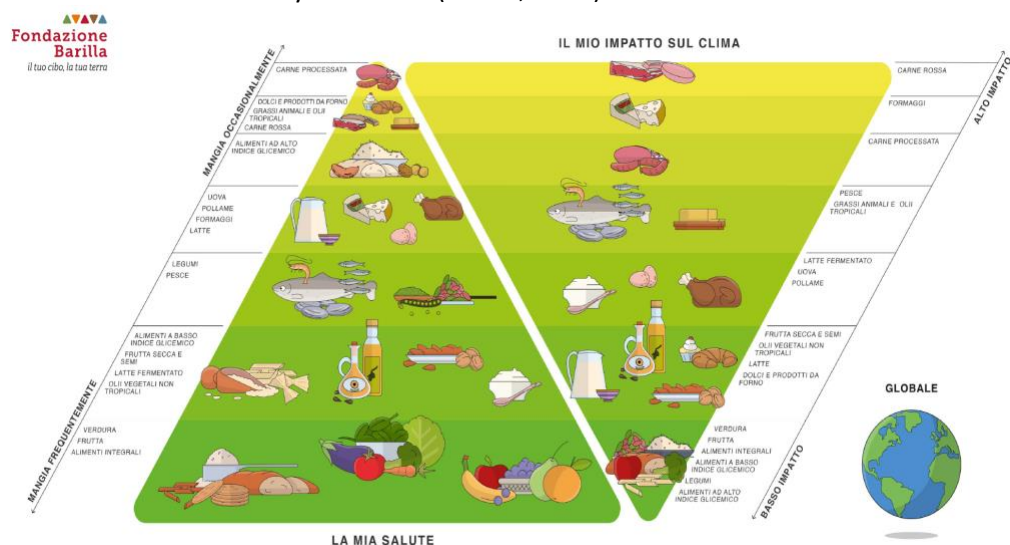
Emissions are measured in carbon dioxide equivalents (CO₂eq). This means non-CO₂ gases are weighted by the amount of warming they cause over a 100-year timescale.

Our World
in Data



Por otro lado, la Figura 3 muestra la Doble Pirámide de Salud y Ambiente, que compara la pirámide alimenticia tradicional con la pirámide ambiental para mostrar cómo los alimentos recomendados para una dieta saludable suelen ser también los más sostenibles (Barilla, 2025). El concepto de la Doble Pirámide lo desarrolló en 2009 el Centro Barilla de Alimentación y Nutrición (BCFN), una organización que investiga la relación entre alimentación, salud y sostenibilidad. La pirámide alimenticia organiza los alimentos según las recomendaciones de consumo. En la base están frutas y verduras, recomendadas en grandes cantidades, mientras que en la cima están productos como dulces y carne roja, que se deben consumir con moderación. La pirámide ambiental clasifica los alimentos según su impacto ambiental. En la base están productos como papas, frutas y verduras, con menor impacto, mientras que en la cima está la carne roja, con un impacto mayor. La imagen muestra la relación entre la alimentación saludable y la sostenibilidad ambiental, ayudando a los consumidores a tomar decisiones más conscientes.

Figura 3: Doble Pirámide de Salud y Ambiente (Barilla, 2025)



Para vincular las huellas ambientales, la doble pirámide y el diseño de estrategias alimenticias globales, la Comisión EAT-Lancet se propuso como objetivo definir una dieta que optimice la salud humana sin sobrepasar los límites planetarios. EAT-Lancet es un grupo de 37 científicos de diversas disciplinas que investigan cómo alimentar a una población mundial creciente de manera saludable y sostenible. El informe de la comisión propone una Dieta de Salud Planetaria, basada en alimentos de origen vegetal como frutas, verduras, legumbres y cereales integrales. Sugiere una reducción del consumo de carne roja y productos ultra procesados para disminuir el impacto ambiental. Y en tercer lugar propone la producción sostenible de alimentos, promoviendo buenas prácticas agrícolas que reduzcan emisiones de gases de efecto invernadero. La meta y los objetivos para reconfigurar la dieta global, según la Comisión EAT-Lancet (EAT-Lancet, 2019) (EAT-Lancet, 2019), se centran en lograr una alimentación saludable dentro de los límites planetarios. La meta es transformar el sistema alimentario global para garantizar dietas saludables y sostenibles para una población en crecimiento, sin comprometer el medio ambiente. El primer objetivo es definir una dieta saludable universal basada en alimentos de origen vegetal, con un consumo reducido de productos de origen animal y ultra procesados. El segundo objetivo es garantizar la producción sostenible de alimentos, reduciendo el impacto ambiental de la agricultura y promoviendo prácticas regenerativas. Estos principios buscan equilibrar la salud humana con la sostenibilidad del planeta.

La Comisión EAT-Lancet, la Doble Pirámide de Barilla y los datos de Our World in Data sobre la huella de carbono de los alimentos están estrechamente relacionados en la búsqueda de una alimentación más sostenible: La Comisión EAT-Lancet propone una dieta basada en alimentos de origen vegetal con un consumo reducido de productos de origen animal, lo que coincide con la Doble Pirámide de Barilla. Ambos modelos destacan que los alimentos más saludables suelen ser también los más sostenibles. Según Our World in Data, la producción de alimentos representa aproximadamente un cuarto de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Los productos de origen animal, especialmente la carne bovina, tienen una huella de carbono significativamente mayor que los alimentos vegetales. Esto refuerza la recomendación de EAT-Lancet y Barilla de priorizar alimentos con menor impacto ambiental. Our World in Data también señala que, si no se reducen las emisiones del sistema alimentario, se podría sobrepasar el límite de emisiones de gases de efecto invernadero, necesario para mantener el calentamiento global por debajo de 1.5°C o 2°C. Esto subraya la urgencia de adoptar dietas más sostenibles.

Resumiendo las tendencias que provienen del lado de la demanda y del lado de la oferta, los enfoques de EAT-Lancet, Barilla y Our World in Data convergen en la necesidad de transformar la dieta global hacia opciones más sostenibles, reduciendo el consumo de alimentos con alta huella de carbono y promoviendo una alimentación basada en proteínas vegetales.

>. PUBLICACIONES DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y HUELLA DE CARBONO REALIZADOS POR EL EQUIPO DE TRABAJO INTA - INTI

Siguiendo las tendencias globales de consumo y producción, en el INTA y el INTI asumimos el compromiso de liderar el desafío de la producción sostenible de alimentos y bio productos en Argentina. A través de la medición de la huella de carbono y otros impactos ambientales de las cadenas de valor agroalimentarias, buscamos aportar datos precisos y herramientas concretas para la transformación del sistema productivo.

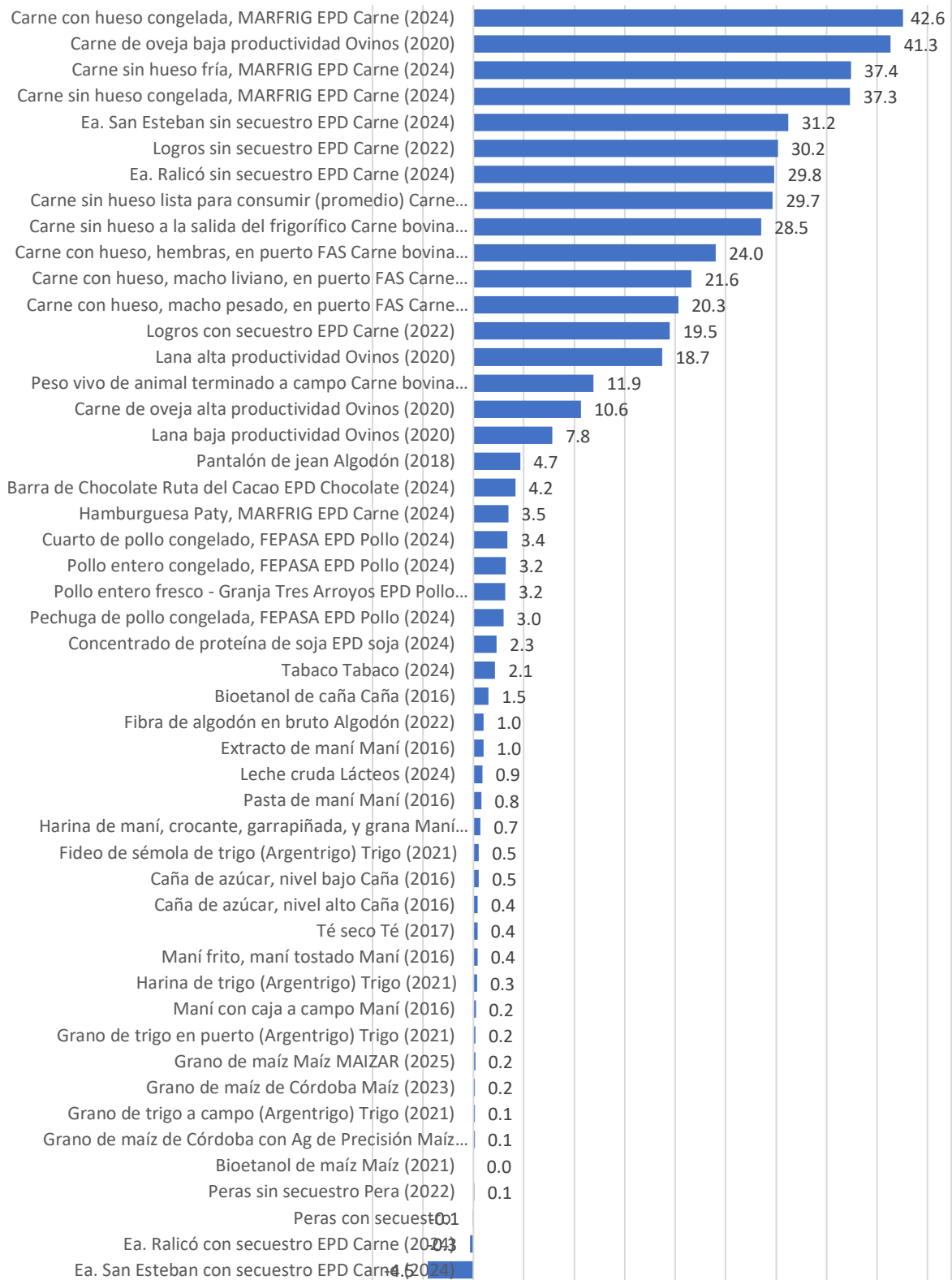
La Tabla 1 y la Figura 4 reflejan más de una década de trabajo conjunto entre INTA e INTI, en colaboración con empresas, cámaras, bolsas de cereales y diversas organizaciones del sector. Las citas incluyen la información completa de los estudios realizados, disponibles en la sección de Bibliografía. Para mantener coherencia con el enfoque de Our World in Data, los resultados de la Figura 4 están presentados en orden descendente, facilitando su análisis y comparación.

Tabla 1: Huella de carbono de productos analizados y publicados por INTA – INTI

	Producto	kg CO ₂ e/kg	kg CO ₂ e/MJ
Caña (Nishihara-Hun, Mele, & Pérez, 2016)	Caña de azúcar, nivel alto	0,430	
	Caña de azúcar, nivel bajo	0,540	
	Bioetanol de caña	1,500	
Maní (Bongiovanni, Tuninetti, & Garrido, 2016)	Maní con caja a campo	0,237	
	Maní frito, maní tostado	0,400	
	Harina de maní, crocante, garrapiñada, y grana	0,700	
	Pasta de maní	0,800	
	Extracto de maní	1,000	
Té (Lysiak, 2018)	Té seco	0,405	
Algodón (Bongiovanni & Tuninetti, 2018)	Pantalón de jean	4,650	
Ovinos (Peri, Rosas, Ladd, Díaz-Delgado, & Martínez-Pastur, 2020)	Carne de oveja alta productividad	10,640	
	Carne de oveja baja productividad	41,320	
	Lana alta productividad	7,830	
	Lana baja productividad	18,700	
Trigo (Bongiovanni & Tuninetti, 2021)	Grano de trigo a campo (Argentrigo)	0,148	
	Grano de trigo en puerto (Argentrigo)	0,186	
	Harina de trigo (Argentrigo)	0,345	
	Fideo de sémola de trigo (Argentrigo)	0,543	
Maíz (Bongiovanni & Tuninetti, 2021)	Bioetanol de maíz		0,020
Algodón (Bongiovanni & Tuninetti, 2020)	Fibra de algodón en bruto	1,004	
EPD Carne (Logros S.A., 2022)	Logros sin secuestro	30,160	
	Logros con secuestro	19,470	
Pera (Romagnoli, Thomas, & Bongiovanni, 2022)	Peras sin secuestro	0,091	
	Peras con secuestro	-0,084	
Maíz (Bongiovanni R. , y otros, 2023)	Grano de maíz de Córdoba	0,157	
	Grano de maíz de Córdoba con Ag de Precisión	0,124	
Carne bovina Hilton (Bongiovanni R. , Tuninetti, Charlón, & Minaglia, 2023)	Peso vivo de animal terminado a campo	11,910	
	Carne sin hueso a la salida del frigorífico	28,500	
	Carne sin hueso lista para consumir (promedio)	29,653	

Carne bovina congelada (Bongiovanni & Tuninetti, 2023)	Carne con hueso, macho liviano, en puerto FAS	21,600	
	Carne con hueso, hembras, en puerto FAS	24,000	
	Carne con hueso, macho pesado, en puerto FAS	20,300	
EPD Carne (Tuninetti & Bongiovanni, 2024)	Ea. San Esteban sin secuestro	31,200	
	Ea. San Esteban con secuestro	-4,510	
EPD Carne (Tuninetti & Bongiovanni, 2024)	Ea. Ralicó sin secuestro	29,800	
	Ea. Ralicó con secuestro	-0,310	
Lácteos (Bongiovanni, Tieri, & Nardi, 2024)	Leche cruda	0,890	
Tabaco (Arce, 2024)	Tabaco	2,147	
EPD soja (Tuninetti, Bongiovanni, & Cavagnaro, 2024)	Concentrado de proteína de soja	2,300	
EPD Chocolate (Casañas, Bilbao, & Del Castillo, 2024)	Barra de Chocolate Ruta del Cacao	4,160	
EPD Carne (Tuninetti & Garcia, 2024)	Carne con hueso congelada, MARFRIG	42,600	
EPD Carne (Tuninetti & Garcia, 2024)	Carne sin hueso congelada, MARFRIG	37,300	
EPD Carne (Tuninetti & Garcia, 2024)	Carne sin hueso fría, MARFRIG	37,400	
EPD Pollo (Lirio, García, & Tuninetti, 2024)	Cuarto de pollo congelado, FEPASA	3,390	
EPD Pollo (Lirio, García, & Tuninetti, 2024)	Pechuga de pollo congelada, FEPASA	2,970	
EPD Pollo (Lirio, García, & Tuninetti, 2024)	Pollo entero congelado, FEPASA	3,220	
EPD Hamburguesa (Tuninetti & Garcia, 2024)	Hamburguesa Paty, MARFRIG	3,450	
EPD Pollo (Barrera, Lirio, & Tuninetti, 2024)	Pollo entero fresco - Granja Tres Arroyos	3,170	
Maíz MAIZAR (2025)	Grano de maíz	0,178	

Figura 4: Huella de carbono de productos analizados y publicados por INTA - INTI (kg CO₂e/kg)



>. SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA

Frente a estos problemas, es necesario identificar las posibles soluciones. El Informe Especial 2019 del IPCC sobre Cambio Climático y Tierra (Shukla, y otros, 2019) destaca que las soluciones basadas en la naturaleza son esenciales para limitar el calentamiento global a 1,5°C. Estas soluciones incluyen prácticas como la reforestación, la restauración de ecosistemas y la gestión sostenible de tierras agrícolas y forestales. Estas estrategias no solo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también aumentan el secuestro de carbono en los suelos, contribuyendo al almacenamiento de carbono a largo plazo. El informe subraya que el manejo sostenible de la tierra puede mejorar la resiliencia climática, reducir la desertificación y degradación del suelo, y garantizar la seguridad alimentaria. Sin embargo, también advierte que estas soluciones deben implementarse junto con reducciones drásticas en las emisiones de otros sectores para alcanzar los objetivos climáticos.

En la misma búsqueda de soluciones basadas en la naturaleza, el trabajo de la Universidad de Purdue (Thompson, y otros, 2021) propone una serie de prácticas agrícolas elegibles para pagos de bonos de carbono, como ser: 1. Siembra Directa. 2. Cultivos de cobertura. 3. Pasturas perennes. 4. Cultivos perennes. 5. Forestación. 6. Incorporación de materia orgánica al campo. 7. Biocarbón (biochar) y 8. Otros. Este trabajo destaca que, si bien estas prácticas son prometedoras para contribuir a la mitigación del cambio climático, su efectividad está condicionada por la capacidad real de cada suelo para almacenar carbono. Es fundamental reconocer que el potencial de secuestro de carbono en los suelos es finito, lo que significa que la capacidad del suelo para almacenar carbono está limitada por sus propiedades intrínsecas, las cuales dependen de su estado, manejo histórico, composición orgánica y condiciones ambientales. En otras palabras, aunque los suelos pueden acumular carbono en sus fases iniciales de manejo regenerativo, a medida que se acerca a un equilibrio o "saturación", su capacidad adicional para almacenar carbono se reduce. Este límite natural subraya la necesidad de implementar estas estrategias de forma adaptada a las características particulares de cada región y tipo de suelo, sin asumir que el secuestro de carbono puede incrementarse indefinidamente.

Como punto de partida, FAO dispone de un mapa de potencial de secuestro de C de los suelos a nivel mundial (FAO & ITPS, 2020) que puede ser consultado como referencia. En Argentina, AAPRESID publicó los mapas de carbono de suelos, con su respectivo potencial de secuestro de carbono (AAPRESID, Mapas de carbono, 2024). En dicho estudio, concluyen que los suelos en Argentina se encuentran a sólo el 46% de su capacidad de secuestro de carbono orgánico del suelo (COS), y que la adopción masiva de prácticas como siembra directa continua, rotaciones con gramíneas, cultivos de servicios y manejo balanceado de nutrientes ayudarían a cerrar la brecha entre lo actual y lo alcanzable.

El protocolo MRV (Medición, Reporte y Verificación) propuesto por la FAO es una herramienta integral y estandarizada para cuantificar los cambios en el carbono orgánico del suelo agrícola. Este protocolo se desarrolló mediante un extenso proceso de investigación y consulta en el que participaron científicos, responsables de políticas y miembros de la FAO, con el objetivo de crear una metodología robusta, confiable y rentable. Es un marco estandarizado que permite medir, monitorear y reportar de forma consistente los incrementos o disminuciones en las reservas de carbono del suelo, facilitando así la implementación de prácticas agrícolas sostenibles que contribuyan a la mitigación del cambio climático. La metodología se fundamenta en procedimientos que abarcan desde la toma de muestras in situ y su análisis de laboratorio hasta la aplicación de modelos que extrapolen los resultados a escalas más amplias. Este enfoque integral permite evaluar de manera precisa el potencial de secuestro de carbono de los suelos, un potencial que es finito y depende del estadio de desarrollo y las características propias de cada terreno. Al integrar mediciones directas y herramientas de monitoreo adaptadas a diversas condiciones agroecológicas, el protocolo MRV se posiciona como un recurso clave para la toma de decisiones y para

el desarrollo de mecanismos de pago por servicios ambientales en el ámbito de la gestión y mejora de la salud del suelo (FAO, 2020). Cabe aclarar que esta es la opción por excelencia, que brinda la verdad de campo sobre el cambio en el stock de carbono en el suelo, sin incurrir en los errores propios de los modelos de estimación. En ese sentido, no hay opción más verdadera que medir antes y medir después.

Otra posibilidad es estimar la remoción o secuestro de carbono a través del Nivel 1 (Tier 1) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). De los tres niveles que propone el IPCC, el nivel 1 es el básico, el nivel 2 es intermedio y el nivel 3 el más exigente en términos de complejidad y datos. El Nivel 1 se basa en la ecuación 2.25, que requiere conocer el stock de carbono en el suelo a los 30 cm, algo que se puede obtener de datos de laboratorio, o bien del mapa de carbono orgánico del suelo de FAO (FAO & ITPS, 2020).

EQUATION 2.25
ANNUAL CHANGE IN ORGANIC CARBON STOCKS IN MINERAL SOILS

$$\Delta C_{Mineral} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC_{Mineral} = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i})$$

Los demás factores, FLU, Fmg y Fi se obtienen de la Tabla 5.5 del IPCC para el caso de cultivos, o bien de la Tabla 6.2 del IPCC para el caso de pastizales (IPCC, 2019). Sin perjuicio de que se puedan usar las tablas del IPCC, se recomienda usar valores publicados para Argentina, como por ej. el valor de FLU=0,86 propuesto para la pampa húmeda (Villarino, Studdert, Laterra, & Cendoya, 2014).

A pesar de que el Informe Especial 2019 del IPCC destaca la importancia de las soluciones basadas en la naturaleza, un informe de la consultora McKinsey (McKinsey, 2020) indica que, aunque el potencial de reducción de emisiones mediante estas prácticas es importante, se trata de una contribución finita y dependiente de las características específicas de cada terreno y de su estadio de manejo. En otras palabras, la capacidad del suelo para secuestrar carbono tiene límites naturales, y estas prácticas deben implementarse de forma coordinada y a escala para maximizar sus beneficios. El análisis de McKinsey ofrece, por tanto, una hoja de ruta detallada que no solo identifica el volumen de reducción requerido (en GtCO₂e), sino que también enfatiza la necesidad de políticas, inversiones y colaboraciones entre los actores del sector para transformar la agricultura hacia un modelo más sostenible y resiliente.

McKinsey plantea un "camino de reducción de emisiones" en el que se cuantifica, en gigatoneladas de CO₂ equivalente (GtCO₂e), la disminución de emisiones que debe lograrse en el sector agrícola para sostener el calentamiento global por debajo de 1,5°C. Este camino se articula a partir de la implementación de prácticas agrícolas mejoradas, que incluyen medidas como la optimización del manejo de fertilizantes y estiércol, la adopción de técnicas de siembra directa y cultivos de cobertura, además de mejoras en el manejo del ganado y en la captura de carbono a través de prácticas que aumentan la estabilidad y la materia orgánica del suelo. La idea central es que, mediante la aplicación de estas estrategias de bajo carbono, se puede cerrar la brecha de emisiones del sector agrícola y contribuir a la meta climática global, reduciendo de manera significativa el impacto del sistema agroalimentario sobre el clima.

>. CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

En el camino de reducción de emisiones, con soluciones basadas en la naturaleza, resulta fundamental calcular la huella de carbono de los productos del sector bio agro industrial de Argentina. La huella de carbono se estima llevando a cabo un inventario de emisiones de GEI o un análisis de ciclo de vida según la tipología de huella, siguiendo normativas internacionales reconocidas, tales como ISO 14067 (IRAM-ISO 14067, 2018), que la define como la suma de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo el ciclo productivo y de consumo de un producto (Ciclo de Vida). Los gases de efecto invernadero (GEI) se acumulan en la atmósfera, aumentando su concentración por encima de los niveles naturales, contribuyendo al Cambio Climático. La huella de carbono se expresa en toneladas de CO₂e (dióxido de carbono equivalente).

Para calcular la huella de carbono de un producto según la norma ISO 14067, en primer lugar es necesario identificar todas las **fuentes de emisión** a lo largo del ciclo de vida del producto. En el caso de los cultivos, estas fuentes se extraen, por ejemplo, de los planteos técnicos que definen las etapas productivas. Esto implica reconocer todas las **actividades** que generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) desde el cultivo hasta el procesamiento, distribución y uso final del producto. Es esencial delimitar el alcance y fronteras del sistema de análisis para asegurar que se incluye toda la información relevante de cada etapa.

El siguiente paso consiste en determinar la **magnitud** de las actividades, lo que implica cuantificar los consumos y procesos involucrados. Por ejemplo, se puede medir el consumo de gas natural en metros cúbicos o el consumo de gasoil en litros en las actividades agrícolas o de procesamiento. Finalmente, es fundamental conocer y aplicar los factores de emisión, que expresan las emisiones de GEI (por ejemplo, en kg CO₂) por unidad de actividad (como kg CO₂/m³ o kg CO₂/l). Multiplicando la magnitud de cada actividad por su correspondiente factor de emisión, se obtiene la contribución de cada fuente a la huella total, la cual se suma para obtener el valor global de emisiones del producto.

Además, según la norma ISO 14067 se debe considerar el balance neto de GEI, lo que implica restar aquellas absorciones o remociones de carbono que actúan como sumideros en el sistema. Por ello, si existen procesos o prácticas que capturan carbono—por ejemplo, la absorción, secuestro o remoción en suelos debido a ciertas técnicas de manejo regenerativo—estos valores deben ser restados del total de emisiones calculado. Este enfoque neto permite obtener una huella de carbono final que refleje tanto las emisiones como las remociones, proporcionando así una evaluación más completa y realista del impacto ambiental del producto. Es decir, la huella de carbono incluye el **balance de carbono en suelos**, o la cantidad neta de carbono que se almacena, libera o se mantiene en el suelo a lo largo del tiempo (AAPRESID, 2025). El resultado de ese balance se suma o se resta a las emisiones GEI por unidad de producto.

También existen calculadores online, siendo **Cool Farm Tool** el más conocido (CoolFarmTool, 2025). Es una herramienta en línea diseñada para calcular y analizar la huella de carbono en el sector agrícola, considerando también otros indicadores ambientales como el uso de agua y el impacto sobre la biodiversidad. Basada en metodologías científicas y en datos validados (incluyendo estándares del IPCC), esta herramienta ofrece métricas cuantificables, creíbles y estandarizadas que permiten evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero y estimar el potencial de secuestro de carbono en los sistemas productivos agrícolas. Su interfaz interactiva y sencilla facilita la realización de "qué pasaría si" o análisis de escenarios, ayudando a los usuarios a identificar oportunidades para reducir las emisiones y, al mismo tiempo, mejorar la sostenibilidad de sus prácticas.

El Cool Farm Tool es una herramienta muy valiosa para diagnosticar y evaluar la huella de carbono y otros indicadores ambientales en la agricultura. Su fortaleza radica en ofrecer a los usuarios diagnósticos detallados, identificar oportunidades de mejora en las prácticas agrícolas y facilitar el seguimiento continuo del desempeño ambiental. Sin embargo, una limitación importante es que la herramienta se centra únicamente en la evaluación interna y el análisis diagnóstico, ya que los datos generados no se hacen abiertos o accesibles para verificadores externos. Debido a esta falta de transparencia en el acceso a los datos, el Cool Farm Tool no cumple con los requisitos necesarios para la certificación por terceros. Esto significa que, si bien es excelente para impulsar mejoras internas y fomentar la toma de decisiones sostenibles, no puede ser utilizado como base para certificaciones oficiales o validaciones independientes, pues los verificadores no pueden confirmar la veracidad de la información reportada por la herramienta.

En cambio, el **Programa Argentino de Carbono Neutro (PACN)** cuenta con calculadores de huella de carbono diseñados no solo para evaluar el desempeño ambiental de los productos agroindustriales, sino también para certificar la huella de carbono a través de un proceso estandarizado y validado por organismos independientes. Estos calculadores se fundamentan en un análisis del ciclo de vida local, incorporando factores de emisión y datos específicos que se ajustan a las condiciones agroclimáticas y productivas de Argentina. De esta manera, el PACN permite a los actores del sector obtener diagnósticos precisos de sus impactos y usar esos resultados como base para la certificación de la huella de carbono, otorgando mayor credibilidad y transparencia en el mercado.

Además, el sistema del PACN está acompañado de un conjunto de manuales y herramientas sectoriales que documentan la metodología, facilitando el acceso y la verificación de los datos. Esto contrasta con otras herramientas, como el Cool Farm Tool, que, aunque efectivas para el diagnóstico interno, no comparten abiertamente la información necesaria para procesos de verificación externa y, por ende, no permiten la certificación. Con estos calculadores y el acompañamiento metodológico, el PACN no solo mide el impacto ambiental de los productos, sino que crea un marco confiable para comunicar y certificar los avances en sostenibilidad, abriendo oportunidades en mercados que requieren transparencia en las emisiones. El INTA y el INTI han participado como consultores para el desarrollo de algunos de estos calculadores (PACN, 2022).

El INTA y el INTI también han colaborado con el **programa Pro Carbono de Bayer** para desarrollar calculadores específicos que permiten medir de forma precisa la huella de carbono en las actividades agrícolas de Argentina. Estas herramientas se basan en metodologías científicas reconocidas internacionalmente y están diseñadas para cuantificar tanto las fuentes de emisiones—como el consumo de combustibles, insumos y la aplicación de fertilizantes—como las capacidades de absorción o remoción de carbono, considerando las particularidades de cada cultivo y región. Al integrar datos técnicos y parámetros específicos provenientes de la experiencia en campo, los calculadores ofrecen un diagnóstico detallado y personalizado, facilitando la identificación de oportunidades para la mejora en la gestión ambiental y el desarrollo de estrategias más sostenibles. Además, estos instrumentos permiten un seguimiento riguroso y la validación de los resultados de forma estandarizada, lo cual es fundamental para la transparencia y la comparabilidad en procesos de certificación de huella de carbono. Al estar alineados con estándares internacionales, tales como la norma ISO 14067, facilitan la verificación por parte de terceros y abren la posibilidad de acceder a mercados de carbono y certificaciones oficiales. En este sentido, el trabajo conjunto de INTA e INTI, a través del Pro Carbono, no solo respalda la toma de decisiones informadas en la gestión agrícola, sino que también impulsa la transformación hacia un modelo productivo más sostenible e innovador, con un enfoque claro en la mitigación del cambio climático.

>. CERTIFICACIÓN DE HUELLAS A TRAVÉS DEL ECO ETIQUETADO

Para certificar la huella de carbono de un producto mediante eco etiquetado (según la norma ISO 14025), es fundamental comenzar con un estudio detallado del impacto ambiental. Este estudio se puede llevar a cabo de dos formas, ya sea mediante la evaluación de la huella de carbono del producto conforme a la norma ISO 14067 o realizando un análisis completo del ciclo de vida (ACV) utilizando las Reglas de Categoría de Producto (PCR) del sistema de Declaración Ambiental de Producto (EPD) ofrecido por Environdec.com (Environdec, 2023). Estas evaluaciones permiten identificar y cuantificar las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero (GEI) en todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, garantizando que la información resultante sea robusta, comparable y transparente.

Una vez obtenido este análisis exhaustivo, se procede a la certificación del producto a través del eco etiquetado basado en ISO 14025, considerado un estándar de declaración ambiental de tipo III. Este proceso implica la verificación por parte de un tercero independiente, lo cual aporta objetividad y credibilidad a la declaración ambiental del producto. La ecoetiqueta certificada no solo valida las afirmaciones ambientales realizadas, sino que también mejora la competitividad en el mercado al ofrecer a los consumidores y a los compradores institucionales una herramienta confiable para adoptar decisiones sostenibles. De esta manera, la integración de un estudio de huella de carbono o ACV con la certificación mediante eco etiquetado crea un marco integral para la gestión ambiental responsable, alineándose con las mejores prácticas y estándares internacionales.

Uno de los tantos ejemplos de EPD es el de la carne del frigorífico Logros (Logros S.A., 2022), que publicó una huella de carbono de la carne al consumidor de 30,16 kg CO₂e / kg y una remoción de 10,69 kg CO₂e / kg, dejando un balance neto de 19,47 kg CO₂e / kg de carne sin hueso lista para ser consumida.

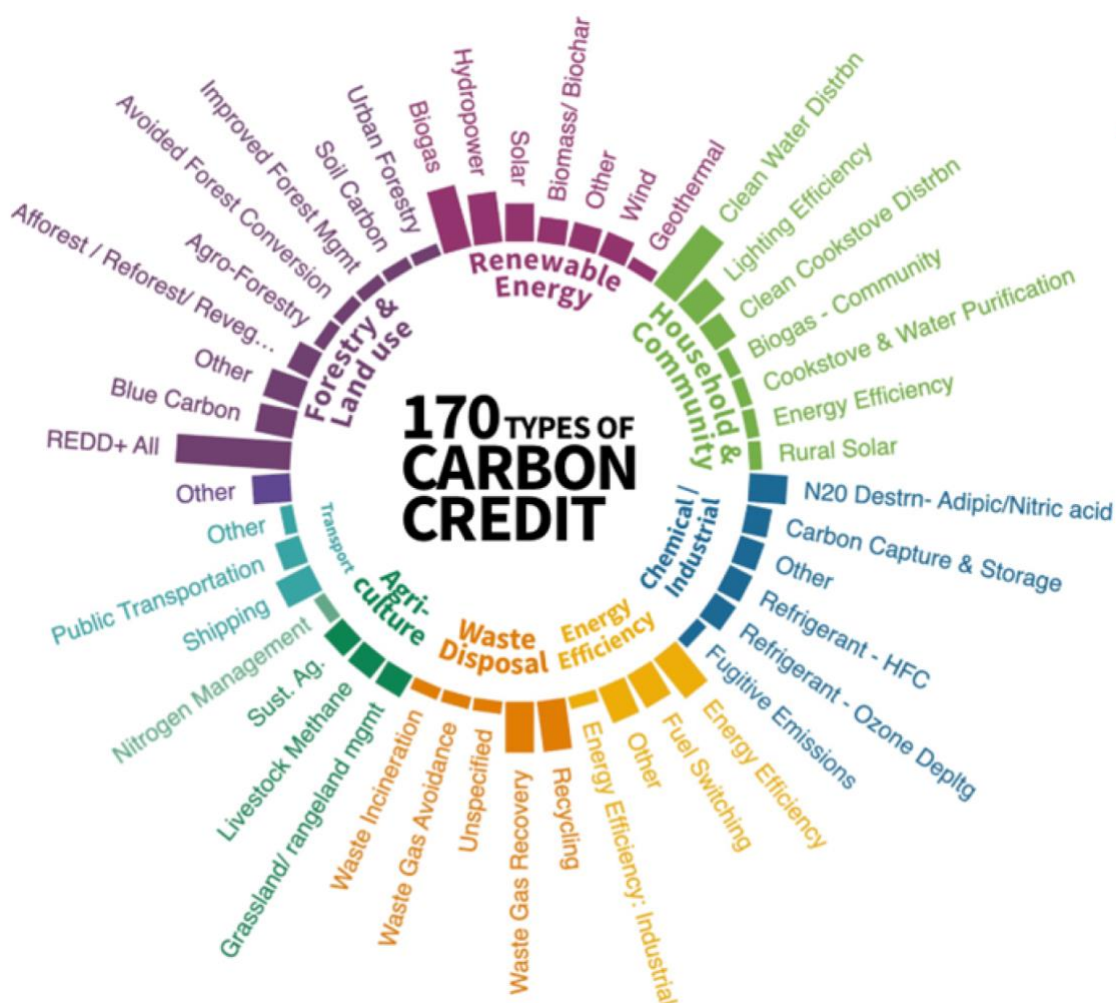
Después de obtener la ecoetiqueta o la eco-certificación, cada empresa cuenta con un activo estratégico que le permite resaltar de forma transparente su desempeño ambiental. Esta certificación valida de manera rigurosa la huella de carbono y otros indicadores ambientales, lo que genera confianza en los consumidores cada vez más preocupados por el impacto ambiental de sus compras. Al comunicar eficazmente estos datos, la empresa puede posicionarse en nichos de mercado premium, atraer a un público que está dispuesto a pagar más por productos sostenibles y, en consecuencia, monetizar el valor agregado ambiental.

Sin embargo, capitalizar este valor depende fundamentalmente de la estrategia de cada empresa. Se requiere integrar estos datos en la comunicación de marca, en el desarrollo de propuestas de valor diferenciadas y en la implementación de políticas de precios que reflejen la inversión realizada en sostenibilidad. Además, esta transparencia no solo mejora la reputación corporativa, sino que también abre puertas a alianzas estratégicas, a participar en programas de incentivos gubernamentales o en mercados de créditos de carbono. En síntesis, si bien la eco-certificación proporciona una base sólida, es responsabilidad de cada empresa aprovechar y potenciar ese trabajo de huellas de carbono para generar ventajas competitivas y beneficios económicos.

>. BONOS DE CARBONO Y MERCADOS VOLUNTARIOS

Por otro lado, y en forma simultánea a la medición de huella de carbono de producto, se vienen desarrollando los mercados voluntarios de bonos de carbono. A grandes rasgos, un bono de carbono es un certificado comercializable que representa la reducción o eliminación de una tonelada de dióxido de carbono (o su equivalente en otros gases de efecto invernadero) de la atmósfera. Estos bonos se generan a partir de proyectos que, ya sea evitando emisiones o secuestrando carbono, contribuyen a mitigar el cambio climático. Su adquisición permite que empresas, organizaciones e incluso particulares compensen sus propias emisiones, apoyando así iniciativas ambientales verificadas y, en ciertos casos, generando co-beneficios adicionales en términos de biodiversidad, desarrollo social y conservación de ecosistemas.

Figura 5: 170 tipos de proyectos de bonos de carbono, agrupados en 7 categorías: Basados en la naturaleza (forestación, uso de tierra, agricultura, etc.), Energía renovable, Eficiencia energética, Gestión de residuos, Eficiencia en hogares y comunidad, Químico e Industrial, Transporte.



Los mercados voluntarios de carbono son plataformas en las que se negocian bonos de carbono sin que la participación sea obligatoria por mandato gubernamental. Estos mercados permiten a los actores involucrados comprar, vender o intercambiar créditos de carbono para compensar sus emisiones de manera voluntaria y demostrar su compromiso ambiental. La Figura 5 (Ecosystem Marketplace, 2022) ilustra la tipología de proyectos que generan estos bonos, mostrando cómo se agrupan en diversas categorías y subtipos. En concreto, el esquema de tipología clasifica los proyectos en amplios grupos—por ejemplo, Forestal y Uso de la Tierra, Energías Renovables, Procesos Químicos, Gestión de Residuos, Eficiencia Energética, Dispositivos para el Hogar y la Comunidad, Transporte y Agricultura—que a su vez se subdividen en más de 170 tipos específicos organizados en clústeres o grupos homogéneos. Esta clasificación no solo refleja la diversidad de enfoques para la reducción o remoción de carbono, sino que también permite identificar de manera rigurosa los atributos y co-beneficios de cada proyecto, facilitando la comparación, la verificación y, en última instancia, una mejor valoración en el mercado.

Verra es una de las principales certificadoras de bonos de carbono en el mercado voluntario a nivel mundial (<https://verra.org/>). Su programa Verified Carbon Standard (VCS) es el más utilizado para la acreditación de proyectos que reducen o eliminan emisiones de gases de efecto invernadero. Desde su fundación en 2007, Verra ha gestionado más de 2,000 proyectos en más de 88 países, logrando capturar más de un billón de toneladas de CO₂ equivalente. Además de garantizar la calidad y transparencia de los créditos de carbono, Verra promueve beneficios sociales y ambientales, como el acceso a servicios de salud y educación en las comunidades donde se desarrollan los proyectos. En Argentina, Verra se unió a la Mesa Argentina de Carbono (<https://mesacarbono.org.ar/>), una iniciativa que busca fortalecer el mercado de carbono en el país mediante la promoción de marcos regulatorios y la certificación de mecanismos de medición, reporte y verificación (MRV). Este esfuerzo incluye la colaboración con más de 45 empresas e instituciones para desarrollar estrategias que posicionen a Argentina como líder en los mercados de carbono. Además, Verra ha certificado proyectos en Sudamérica relacionados con la conservación forestal y la agricultura regenerativa, promoviendo soluciones basadas en la naturaleza.

Gold Standard (GS) (<https://www.goldstandard.org/>), por su parte, es otra certificadora líder en el mercado voluntario de carbono, reconocida por su enfoque en proyectos que generan beneficios adicionales para las comunidades y el medio ambiente. Fundada en 2003 por el World Wildlife Fund (WWF) y otras organizaciones, GS establece estándares rigurosos para garantizar la adicionalidad, transparencia y trazabilidad de los proyectos. Los créditos emitidos bajo Gold Standard son altamente valorados por su impacto positivo en el desarrollo sostenible, incluyendo iniciativas de acceso a agua potable y eficiencia energética.

En Argentina, recientes publicaciones en medios como *La Nación* (Arias, 2025), *Ovis21* (Ovis21, 2025) y el programa POA de la plataforma *Ruuts* (Ruuts, 2025) han resaltado un importante avance en el ámbito de los mercados voluntarios de carbono. Ruuts es una plataforma digital y programa que busca promover la regeneración de tierras y ecosistemas productivos en Sudamérica. A través de prácticas de ganadería regenerativa, la plataforma facilita la captura de carbono en el suelo, la mejora de la biodiversidad y la infiltración de agua, generando ingresos para los productores.

En estas noticias se informa que, por primera vez, productores agropecuarios han recibido pagos derivados de la monetización de créditos de carbono generados a partir de prácticas regenerativas. Proyectos pioneros, como el Programa POA, permiten a los productores transformar su modelo de gestión mediante la implementación de prácticas holísticas de manejo, que mejoran la salud del suelo, capturan carbono y, en consecuencia, generan créditos susceptibles de certificación por organismos internacionales como Verra.

Este desarrollo no solo implica un reconocimiento ambiental, sino que abre la puerta a un nuevo modelo de negocio en el campo. Al certificar y comercializar los créditos de carbono, los productores pueden acceder a ingresos adicionales que les permiten reinvertir en infraestructura y reconfigurar sus explotaciones hacia sistemas más sostenibles. En síntesis, la difusión de estas iniciativas subraya el potencial del mercado voluntario de carbono para convertir la mejora ambiental en un valor económico tangible, marcando un hito en la transición hacia una ganadería regenerativa y más resiliente frente al cambio climático. Este ejemplo es uno de los tantos casos de bonos de carbono de mercados voluntarios. En EE.UU. estos mercados están más evolucionados, como por ej., a través de las empresas Indigo Ag, Truterra, Nori, Inc. y Bayer Crop Sciences (Thompson, y otros, 2021).

En Argentina, Carbon Neutral Plus es una entidad privada que ha desarrollado un sistema integral para la medición, certificación, registro, compra y venta de créditos de carbono en el mercado voluntario. Su metodología se sustenta en estándares internacionales y en avanzados protocolos de medición de la huella de carbono, lo que permite evaluar de forma rigurosa las emisiones y reducciones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de los productos y procesos. Esta herramienta combina la recopilación de datos técnicos con auditorías y procesos de verificación independientes, ofreciendo así un marco transparente y científicamente robusto para certificar créditos de carbono.

La presencia de plataformas como Carbon Neutral Plus ha contribuido significativamente a la profesionalización del mercado voluntario de carbono. La capacidad para cuantificar el impacto ambiental de manera estandarizada y, posteriormente, registrar y comercializar dichos créditos, permite a las empresas transformar sus mejoras ambientales en activos económicamente valorizables. Este enfoque no solo refuerza la credibilidad de las iniciativas de sostenibilidad, sino que también abre la posibilidad de monetizar los beneficios ambientales, consolidando un puente entre la ciencia del cambio climático y la práctica empresarial orientada hacia la mitigación de emisiones.

>. CONCLUSIONES

En conclusión, la cuantificación de la huella de carbono en los sistemas de producción agropecuaria constituye una herramienta fundamental para identificar los puntos críticos de emisión y orientar estrategias de mitigación ambiental. La implementación de metodologías reconocidas internacionalmente, como la norma ISO 14067 y el análisis de ciclo de vida, permite evaluar de forma precisa las fuentes de emisiones y considerar las remociones naturales de carbono en los suelos. Este riguroso enfoque ha demostrado ser esencial para detectar los "hotspots" ambientales y para definir intervenciones, como la adopción de prácticas regenerativas y el uso adecuado de tecnologías de manejo sostenible, que potencian la resiliencia del sistema productivo y, a su vez, contribuyen a la mitigación del cambio climático. No obstante, es importante reconocer que el potencial de secuestro de carbono en los suelos es finito y depende de las condiciones intrínsecas y del manejo histórico, lo que subraya la necesidad de combinar estas soluciones con reducciones drásticas en otras fuentes de emisiones.

Por otro lado, la certificación de la huella de carbono a través del ecoetiquetado (ISO 14025) y de Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) ofrece a las empresas un activo estratégico para comunicar de manera transparente su compromiso ambiental. Esta validación no solo incrementa la credibilidad de las iniciativas de sostenibilidad, sino que también abre la posibilidad de monetizar el valor ambiental agregado, transformándolo en ventajas competitivas en mercados exigentes. La experiencia acumulada por instituciones como INTA e INTI, en colaboración con programas como Pro Carbono y plataformas como PACN y Carbon Neutral Plus, evidencia que el desarrollo de calculadores específicos y la integración metodológica de los datos de huella de carbono facilitan el acceso a mercados de compensación climática y respaldan la transición hacia un modelo agropecuario más sostenible e innovador.

Las exigencias de certificaciones y de trazabilidad ambiental en los productos de exportación se han consolidado como una tendencia en ascenso. Estas exigencias, lejos de constituir meros obstáculos o barreras proteccionistas, pueden verse como herramientas estratégicas que impulsan a los exportadores a elevar sus estándares de calidad, social y ambiental. La implementación de sistemas de trazabilidad, apoyados por tecnologías como blockchain, garantiza la transparencia a lo largo de toda la cadena de producción, lo que permite certificar el origen y los procesos de manufactura de los productos. Así, las nuevas normativas y exigencias de certificación actúan como un sello de garantía que fideliza a un mercado internacional cada vez más exigente, que prefiere competir en términos de calidad y sostenibilidad sobre la mera reducción de precios.

Dentro de este contexto, los requisitos regulatorios en mercados desarrollados, se reinterpretan como una oportunidad para que los productores argentinos se diferencien competitivamente. Al adoptar prácticas que aseguren altos estándares ambientales y sociales, las empresas pueden transformar lo que inicialmente parecía ser una barrera en una ventaja competitiva. Este enfoque no solo mejora la imagen de los productos en el mercado global, sino que también incentiva la innovación y la mejora continua en los procesos productivos, fortaleciendo la posición de Argentina como proveedor de productos de calidad que responden a las demandas emergentes de sostenibilidad y responsabilidad social.

>. BIBLIOGRAFÍA CITADA:

- AAPRESID. (2024). *Mapas de carbono*. Obtenido de Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa: <https://www.aapresid.org.ar/mapas-de-carbono/>
- AAPRESID. (2025). *Huella de Carbono en sistemas productivos bajo Siembra Directa*. Obtenido de AAPRESID. Informe final 2024 de la Red de Carbono: https://www.aapresid.org.ar/blog/huella-carbono-sistemas-productivos-siembra-directa_informe_final_2024
- Arce, S. (2024). *Estimación de la huella de carbono en la producción de la hoja de tabaco seco en el Valle de Lerma de Salta-Argentina*. Obtenido de Tesis de Magister en Responsabilidad Social y Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional de Cuyo, <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/21651>: <http://hdl.handle.net/20.500.12123/21651>
- Arias, M. (2025). *Volantazo: recibieron los primeros pagos de créditos de carbono y rediseñaron su campo con un revolucionario sistema*. Obtenido de LA NACIÓN Campo - Bonos de Carbono: <https://www.lanacion.com.ar/economia/campo/volantazo-recibieron-los-primeros-pagos-de-creditos-de-carbono-y-redisenaron-su-campo-con-un-nid04042025/>
- Barilla. (2025). *Doble pirámide de salud y clima*. Obtenido de Fundación Barilla - Centro Barilla de Alimentación y Nutrición (BCFN): <https://www.fondazionebarilla.com/en/double-pyramid/>
- Barrera, V., Lirio, L., & Tuninetti, L. (2024). *EPD Pollo entero fresco - Granja Tres Arroyos - S-P-07363-Es*. Obtenido de EPD INTI: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/S-P-07363>
- Bongiovanni, R. G., & Tuninetti, L. (2018). *Análisis del Ciclo de Vida de un jean producido en Argentina*. Obtenido de Lalca: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, ISSN 2527-0184 v. 2 n. 1 (2018) : <https://doi.org/10.18225/lalca.v2i1.3942>
- Bongiovanni, R., & Tuninetti, L. (2020). *HUELLA DE CARBONO Y HUELLA HÍDRICA DE LA FIBRA DE ALGODÓN DESMOTADO*. Obtenido de Libro de actas del IX encuentro argentino de ciclo de vida y VIII encuentro de la red argentina de huella hídrica, ENARCIV 2020: <http://hdl.handle.net/20.500.12272/8481>
- Bongiovanni, R., & Tuninetti, L. (2021). *Huella de Carbono de la cadena de trigo de Argentina*. Obtenido de LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida: <http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/5551>
- Bongiovanni, R., & Tuninetti, L. (2021). *Huella de carbono y huella energética del etanol anhidro producido en una mini destilería "minidest" en origen*. Obtenido de Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA): <http://ria.inta.gob.ar/contenido/ria-47-no-2-agosto-2021>
- Bongiovanni, R., & Tuninetti, L. (2023). *Huella de Carbono de la carne: Un estudio de caso*. Obtenido de Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. 2023. 31 (1): <https://doi.org/10.53588/alpa.310104>
- Bongiovanni, R., Tieri, M. P., & Nardi, N. (2024). *Huella de carbono de la leche: un caso piloto*. Obtenido de Agronomía & Ambiente Vol. 44, núm. 1 (2024): <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/290>

- Bongiovanni, R., Tuninetti, L., & Garrido, G. (2016). Huella de Carbono de la cadena de maní de Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)* ISSN edición impresa 0325-8718 ISSN en línea 1669-2314, <http://ria.inta.gob.ar/trabajos/huella-de-carbono-de-la-cadena-de-mani-de-argentina>, http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/trabajosenprensa/bongiovanni-castellano-4_0.pdf; <http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/trabajosenprensa/bongiovanni-ingles.pdf>.
- Bongiovanni, R., Tuninetti, L., Charlón, V., & Minaglia, M. (2023). *Análisis de Ciclo de Vida de la carne bovina de exportación de Argentina*. Obtenido de Número especial "Investigación y producción ganadera sostenible en Latino América y el Caribe". Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. 2023. 31 (1) : <https://doi.org/10.53588/alpa.310106>
- Bongiovanni, R., Tuninetti, L., Espósito, G., Fiant, S., Ponienman, K., Álvarez, S., . . . Oliverio, N. (2023). *La huella de carbono del maíz como vínculo entre producción y ambiente*. Obtenido de Revista científica de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Cienc. Suelo 41 (2): 49-58, 2023 ISSN 1850-2067 Versión electrónica: <http://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/authorDashboard/submission/775>
- Casañas, E., Bilbao, L., & Del Castillo, S. (2024). *EPD Barra de chocolate*. RUTA CACAO S.R.L. Obtenido de <https://epd.inti.gob.ar/>
- Clark, M., Springmann, M., Rayner, M., Scarborough, P., Hill, J., Tilman, D., . . . Harrington, R. A. (2022). *Estimating the environmental impacts of 57,000 food products*. Obtenido de PNAS Vol. 119 | No. 33: <https://doi.org/10.1073/pnas.2120584119>
- CoolFarmTool. (2025). *Calculadora de Huella de Carbono*. Obtenido de Cool Farm Alliance <https://app.coolfarmtool.org/account/login/?next=/>: <https://app.coolfarmtool.org/>
- EAT-Lancet. (2019). *Alimentos. Planeta. Salud. Informe Resumido de la Comisión EAT-Lancet*. Obtenido de The EAT-Lancet Commission Summary Report. Comisión EAT-Lancet sobre dietas saludables a partir de sistemas alimentarios sostenibles: https://eatforum.org/content/uploads/2019/07/EAT-Lancet_Commission_Summary_Report_Spanish.pdf
- EAT-Lancet. (2019). *Can we feed a future population of 10 billion people a healthy diet within planetary boundaries?* Obtenido de The EAT-Lancet Commission on Food, Planet, Health: <https://eatforum.org/eat-lancet-commission/>
- Ecosystem Marketplace. (2022). *The Art of Integrity. August 2022*. Obtenido de <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/>
- Environdec. (2023). *Environmental Product Declarations*. Obtenido de <https://www.environdec.com/all-about-epds/the-epd>
- Eurobarometer. (2017). *Attitudes of European citizens - Special Eurobarometer 468 Report*. Obtenido de Directorate-General for Environment and co-ordinated by the Directorate General for Communication, European Commission. : doi:10.2779/84809
- FAO & ITPS. (2020). *Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report*. Obtenido de Rome, FAO <https://doi.org/10.4060/ca7597en>: <https://data.apps.fao.org/glosis/>
- FAO. (2020). *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol*. Obtenido de FAO Rome: <https://doi.org/10.4060/cb0509en>

- Fava-Neves, M., Gray, A., Runkhe-Valerio, F., Franco-Martinez, L., Mateus-Rodrigues, J., Bordonal-Kalaki, R., . . . Cambaúva, V. (2020). *Food and agribusiness in 2030: a roadmap*. eISBN: 978-90-8686-907-7 | ISBN: 978-90-8686-354-9. Obtenido de Wageningen Academic Publishers 2020: <https://www.wageningenacademic.com/doi/book/10.3920/978-90-8686-907-7>
- IBM Institute for Business Value (IBV). (2021). *Sustainability at a turning point*. Obtenido de <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/sustainability-consumer-research>
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI): <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- IPCC. (2021). *IPCC en español*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>
- IRAM-ISO 14067. (2018). *Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación. Primera edición 2019-11-08. 68 pp.* Obtenido de <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/12261>
- Lirio, L., García, M. C., & Tuninetti, L. (2024). *Chicken Fillet - FEPASA*. Obtenido de EPD INTI: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0016200001>
- Lirio, L., García, M. C., & Tuninetti, L. (2024). *Frozen Chicken Leg Quarter - FEPASA*. Obtenido de EPD INTI: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0016211001>
- Lirio, L., García, M. C., & Tuninetti, L. (2024). *Whole chicken - FEPASA*. Obtenido de EPD INTI: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0016156001>
- Logros S.A. (2022). *LOGROS S.A. Beef Meat. Environmental Product Declaration*. Obtenido de INTI <https://epd.inti.gob.ar/libreria/S-P-07356>: <https://epd.inti.gob.ar/assets/uploads/libreria/S-P-07356.pdf>
- Lysiak, E. (2018). La huella de carbono de la producción agrícola del brote de té certificado en Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)* pp. 359-370 ISSN 0325-8718 ISSN 1669-2314. Institución Editora: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Obtenido de <https://ria.inta.gob.ar/wp-content/uploads/2018/12/ria-vol44-n3-diciembre-2018.pdf>
- MAYDS. (2023). *Quinto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://ciam.ambiente.gob.ar/images/uploaded/recursos/372/BUR5.pdf>
- McKinsey. (2020). *Reducing agriculture emissions through improved farming practices*. Obtenido de Daniel Aminetzah; Nicolas Denis; Kimberly Henderson; Joshua Katz; Peter Mannion: <https://www.mckinsey.com/industries/agriculture/our-insights/reducing-agriculture-emissions-through-improved-farming-practices#>
- Nishihara-Hun, A. L., Mele, F. D., & Pérez, G. A. (2016). *A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels*. Obtenido de Int J Life Cycle Assess: DOI 10.1007/s11367-016-1047-3
- Ovis21. (2025). *¡Logro histórico! Productores de la Patagonia reciben los primeros pagos por créditos de carbono*. Obtenido de <https://ovis21.com/primerospagoscreditosc carbono/>
- PACN. (2022). Obtenido de <https://carbononeutro.com.ar/>

- Peri, P., Rosas, Y. M., Ladd, B., Díaz-Delgado, R., & Martínez-Pastur, G. (2020). *Carbon Footprint of Lamb and Wool Production at Farm Gate and the Regional Scale in Southern Patagonia*. Obtenido de Sustainability 2020, 12, 3077 <http://www.mdpi.com/journal/sustainability:doi:10.3390/su12083077>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
- Puratos Group. (2024). *Las principales tendencias y deseos de los consumidores en alimentación sostenible para 2024*. Obtenido de <https://www.puratos.es/es/blog/taste-tomorrow/Las-principales-tendencias-y-deseos-de-los-consumidores-en-materia-de-alimentacion-sostenible-para-2024>
- Reyes, F. (2021). *Aumentó un 86% la cantidad de usuarios que eligen productos con impacto positivo*. Obtenido de Infobae: <https://www.infobae.com/tendencias/2021/07/24/aumento-un-86-la-cantidad-de-usuarios-que-eligen-productos-con-impacto-positivo/>
- Riesco, S., Picaza, N., Santa Cruz, E., & García, S. (2019). *EATendencias: Las tendencias con mayor impacto para la innovación alimentaria*. Obtenido de Arrantzuarekiko Zientziaeta Teknika Ikaskundea (AZTI): <https://www.azti.es/eatendencias-las-tendencias-con-mayor-impacto-para-la-innovacion-alimentaria/>
- Ritchie, H. (2020). *Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?*. Obtenido de Published online at OurWorldinData.org: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>
- Romagnoli, S., Thomas, E., & Bongiovanni, R. (2022). *Análisis de estrategias de mitigación de la huella de carbono de la producción de peras argentinas*. Pp. 512-520. Obtenido de 13th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2022 (LCA Foods 2022) Book of Proceedings LCA Foods 2022. Editores: Ian Vázquez Rowe, Ramzy Kahhat Abedrabbo, Eizo Muñoz Sovero.: <https://drive.google.com/file/d/169oaQGafERtOc8aQwfxd6srEgHADoQrz/view>
- Ruuts. (2025). *Programa POA - Escalando la ganadería regenerativa en la Patagonia*. Obtenido de Plataforma RUUTS: <https://ruuts.la/poa/>
- Shukla, P., Skea, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., . . . M. (2019). *IPCC 2019 Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Thompson, N. M., Hughes, M. N., Nuworsu, E. K., Reeling, C. J., Armstrong, S. D., Mintert, J. R., . . . Foster, K. A. (2021). *Opportunities and Challenges Associated with "Carbon Farming" for U.S. Row-Crop Producers*. Obtenido de Purdue University: <https://ag.purdue.edu/commercialag/home/resource/2021/06/opportunities-and-challenges-associated-with-carbon-farming-for-u-s-row-crop-producers/>
- Tuninetti, L., & Bongiovanni, R. (2024). *Declaración Ambiental de Producto (EPD) de animales peso vivo de la empresa BERCA (Estancia Ralicó. Córdoba)*. Obtenido de The International EPD® System: <https://www.environdec.com/library/epd7362>
- Tuninetti, L., & Bongiovanni, R. (2024). *Declaración Ambiental de Producto (EPD) de animales peso vivo de la empresa San Esteban (Entre Ríos)*. Obtenido de The International EPD System: <https://www.environdec.com/library/epd7361>
- Tuninetti, L., & Garcia, M. C. (2024). *Chilled and vacuum-packed boneless beef*. Obtenido de EPD Marfrig Argentina - Quickfood S.A.: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0015864001>

- Tuninetti, L., & Garcia, M. C. (2024). *Frozen and vacuum packed bone beef*. Obtenido de EPD Marfrig Argentina - Quickfood S.A.: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0016589001>
- Tuninetti, L., & Garcia, M. C. (2024). *Frozen and vacuum packed boneless beef*. Obtenido de EPD Marfrig Argentina - Quickfood S.A.: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0016579001>
- Tuninetti, L., & Garcia, M. C. (2024). *Hamburguesas bovinas congeladas Marfrig Argentina - Quickfood S.A.* Obtenido de EPD INTI: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0006436001>
- Tuninetti, L., Bongiovanni, R., & Cavagnaro, M. R. (2024). *Concentrado de proteína de soja* . Obtenido de EPD Porta IES-0016461001: <https://epd.inti.gob.ar/libreria/IES-0016461001>
- Villarino, S. H., Studdert, G. A., Laterra, P., & Cendoya, M. G. (2014). *Agricultural impact on soil organic carbon content: Testing the IPCC carbon accounting method for evaluations at county scale*. Obtenido de Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 185, Pages 118-132, ISSN 0167-8809: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.021>

Avanzando el Uso de Agricultura Digital: Estado Presente y Futuro

► ► Ciampitti, IA¹*

¹ Quantitative Agronomy/Digital Agriculture, Department of Agronomy, Purdue University
Co-Director, Institute for Digital and Advanced Agricultural Systems: <http://ag.purdue.edu/idaas/>
Ciampitti Lab: <https://ciampittilab.wixsite.com/ciampitti-lab>

✉ iciampit@purdue.edu

RESUMEN

Avances en las tecnologías agrícolas digitales van a tener un gran impacto en la seguridad alimentaria y en la eficiencia del uso de los recursos. La integración de estas nuevas tecnologías será un desafío para el paso de captura de datos a la toma de decisiones. Muchos de los sistemas actuales de apoyo a la toma de decisiones para la selección de insumos de cultivo carecen de la estructura basada en datos y de la base computacional necesarias para hacer frente con eficacia a la incertidumbre de los resultados medioambientales, de producción y de gestión. El desarrollo y la adopción de métodos avanzados basados en datos acelerarán el paso de la agronomía tradicional a la cuantitativa, lo que en última instancia conducirá a decisiones de gestión más confiables. La irrupción de la Inteligencia Artificial (IA) en la agricultura está acelerando en forma exponencial el desarrollo de nuevas soluciones para diferentes sistemas de cultivos, mejorando el rendimiento económico, y la eficiencia de uso recursos. Sin embargo, es importante reconocer que el éxito de la adopción de estos nuevos sistemas de apoyo basados en la ciencia de los datos dependerá del costo, las preocupaciones sobre la privacidad de la información, el nivel de experiencia del usuario, el soporte técnico, el mantenimiento a largo plazo y la complejidad de la tecnología. Por ejemplo, las herramientas informáticas de apoyo a la toma de decisiones basadas en métodos cuantitativos modernos pueden proporcionar información sobre la selección de insumos como semillas, fertilizantes, productos agroquímicos y otros insumos y productos agronómicos fundamentales. Aunque se han realizado algunos progresos en el desarrollo y despliegue de plataformas digitales integrales para apoyar las decisiones agronómicas, nuestro objetivo es aumentar la adopción y el alcance de estas tecnologías para varios sectores de la agricultura. En última instancia, prevemos que los principales avances provendrán de sistemas analíticos que ofrezcan recomendaciones adaptativas para optimizar la productividad, beneficio económico y reducir el impacto ambiental. Pasar de enfoques estáticos a dinámicos a la hora de ofrecer recomendaciones agronómicas tiene un gran valor. La colaboración entre investigadores, empresas agrícolas y responsables del sector será fundamental para impulsar la adopción de tecnologías digitales. Por último, el seguimiento y la rápida adaptación a los cambios en el panorama tecnológico serán fundamentales para garantizar que la agricultura pueda hacer frente a los nuevos desafíos del futuro.

Agronomía Aumentada. Gemelos Digitales para aprender y decidir mejor la nutrición en sistemas complejos

► ► **Esteban Tronfi ¹**

¹ Ravit Agro

La agricultura actual está inmersa en una creciente complejidad: variabilidad ambiental, inestabilidad climática, nuevas plagas y un contexto económico desafiante. En este escenario la resolución de problemas requiere la incorporación de nuevas herramientas y enfoques. Necesitamos nuevas formas de observar, entender y actuar sobre los sistemas productivos.

La Agronomía Aumentada se propone como una respuesta que reúne el aprovechamiento del fenomenal Big Data que hoy inunda nuestros campos y la incorporación de los avances digitales como la Inteligencia Artificial con la ampliación de nuestras capacidades para aprender, colaborar y anticipar. Es una forma de agronomía que se enriquece con inteligencia digital y con inteligencia colectiva: el aprendizaje en red a partir de experiencias reales se vuelve tan valioso como los datos o modelos.

En este marco, los Gemelos Digitales representan una herramienta clave. Son modelos vivos que, alimentados por datos reales de campo, permiten recrear el comportamiento de un cultivo ante distintas condiciones y decisiones. Funcionan como simuladores agronómicos que ayudan a entender mejor lo que pasó, anticipar lo que puede pasar y decidir con mayor confianza.

Los Gemelos Digitales constituyen además una nueva forma de flujo de información que posibilita el funcionamiento en red de los actores que, en diferentes niveles, se interconectan con la complejidad de los sistemas agrícolas.

Durante la presentación explicaremos cómo se construyen estos gemelos digitales y mostraremos casos concretos desarrollados en el norte de Córdoba donde ya están ayudando a productores y técnicos a mejorar su manejo de la nutrición en entornos complejos.

El desafío no es sólo tecnológico. El verdadero cambio de paradigma es pasar de una agronomía individual, fragmentada y reactiva a una agronomía aumentada: colaborativa, anticipatoria, potenciada en Big Data avances digitales e Inteligencia Artificial.

Manejo sitio-específico de nutrientes: experiencias de 12 años de aprendizaje

► ► **Pagani. A.**

Clarion, 9 de Julio, Bs. As.

✉ apagani@precisionclarion.com

>. INTRODUCCIÓN

El manejo sitio-específico de nutrientes puede definirse como una tecnología de procesos que busca un mejor entendimiento de los factores que determinan la variabilidad espacial de la respuesta de los cultivos a la fertilización dentro de un lote de producción y lo lleva a la práctica a través de la aplicación de nutrientes y enmiendas con dosis variable. Su objetivo principal es lograr que los cultivos maximicen la eficiencia en el uso de los recursos (incluidos los nutrientes), incrementando la rentabilidad de la producción y minimizando su impacto ambiental. Generalmente, involucra un esfuerzo interdisciplinario combinando conocimiento agronómico básico con herramientas tecnológicas como sistemas de geo posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (GIS), monitores de rendimiento, sensoramiento remoto y de contacto, y maquinaria equipada con capacidad de realizar dosificación variable de insumos. En el último tiempo también se han incorporado aportes de tecnologías más sofisticadas de aprendizaje automático ("*machine learning*") y otros tipos de inteligencia artificial.

Si bien la potencialidad de esta tecnología ha demostrado ser muy grande, su incorporación masiva a nivel nacional ha tropezado con varios obstáculos de diferente índole. Algunos de ellos se han ido paulatinamente solucionando en los últimos años, como la madurez de la tecnología en general, la capacitación de agrónomos y operarios y el soporte técnico por parte de las empresas proveedoras de tecnología. Otras barreras que han retrasado la adopción de la práctica todavía representan un desafío, como disponer de recomendaciones zonales de fertilización con el nivel de precisión y resolución espacial que la tecnología demanda y la dificultad para evaluar su eficacia en relación a planteos de producción tradicionales de manejo uniforme.

En este resumen se presentan algunas experiencias de investigación y producción donde se muestra como el manejo sitio-específico de nutrientes ha logrado mejorar los índices productivos, económicos y (de alguna manera) ambientales de la agricultura argentina, respecto a planteos de manejo uniforme que ignoran la variabilidad espacial de los lotes de producción.

>. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL

El término caracterización ambiental se emplea para referirse al conjunto de relevamientos, mediciones y análisis sitio-específicos para estudiar como atributos edáficos, topográficos y productivos se distribuyen dentro de un campo (van Alphen y Stoorvogel, 2000). Existen numerosas herramientas de caracterización ambiental que varían en su origen, nivel de complejidad y resolución espacial. Algunas se

enfocan en determinar las propiedades del suelo y las características del paisaje mediante diferentes aproximaciones, y otras se centran en el cultivo, estimando su rendimiento y/o vigor de la cobertura vegetal.

En la Figura 1 se presenta un mapa de Argentina y Uruguay mostrando la ubicación geográfica de 672 lotes de producción que fueron intensivamente caracterizados entre 2013 y 2024 mediante un relevamiento topográfico realizado con un GPS de alta precisión, un mapa de conductividad eléctrica aparente (ECa, como indicador de variabilidad espacial en la textura del suelo y la salinidad/alcalinidad) a través de un sensor de contacto (Veris 3100), un muestreo de suelo en grilla para analizar determinados nutrientes y propiedades edáficas (1 muestra compuesta cada 1 o 1.6 has) y un análisis de productividad agrícola mediante el estudio de múltiples mapas de rendimiento y/o índices de vegetación provenientes de imágenes satelitales de varias campañas. Un ejemplo de esta caracterización ambiental intensiva para un lote de 9 de Julio, Bs. As., se muestra en la Figura 2.

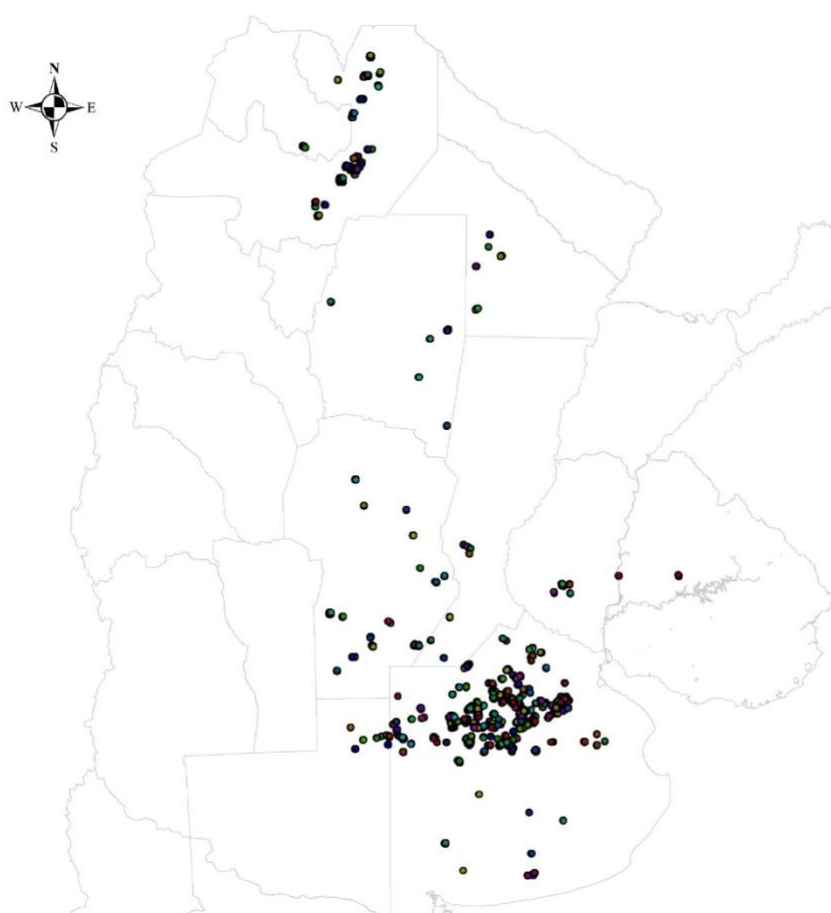


Figura 1. Ubicación de los 672 lotes de producción caracterizados intensivamente durante el período 2013-2024.

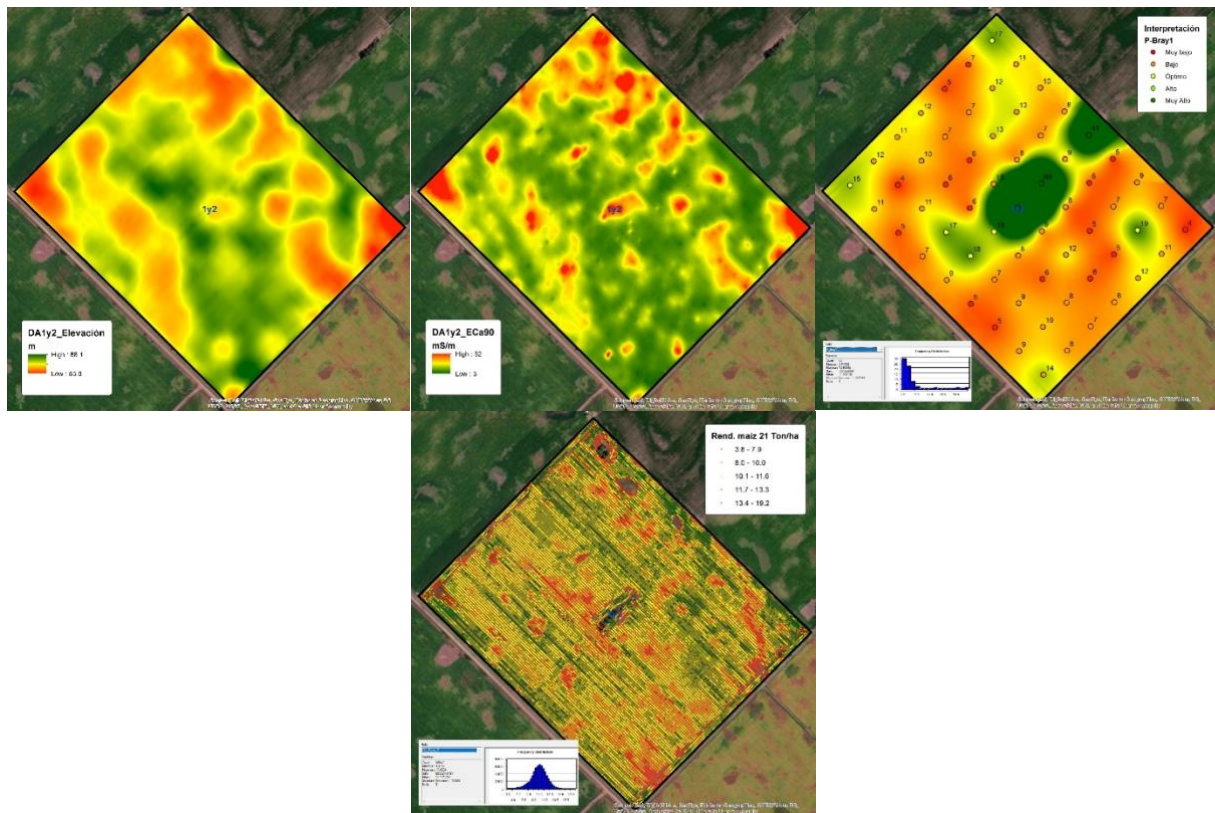


Figura 2. Ejemplo de uno de los lotes caracterizados intensivamente, mostrando el mapa interpolado de elevación del terreno, conductividad eléctrica aparente (ECA90), muestreo de suelo en grilla y análisis de fósforo (P-Bray1) y un mapa de rendimiento de maíz de la campaña 20/21 en 9 de Julio, Bs. As.

Para esta amplia base de datos se exploraron relaciones funcionales a nivel intra-lote entre los patrones de productividad observados (mapas de rendimiento e índices de vegetación) y las variables provenientes del relevamiento realizado, a fin de estudiar el nivel de variabilidad espacial encontrado en cada región y lograr un mejor entendimiento de las principales variables que determinan la productividad de los cultivos y, eventualmente, su respuesta a la fertilización. A modo de ejemplo se muestra la relación de la productividad con a) la elevación del terreno y b) la ECa en cinco lotes de producción del Centro-Oeste Bonaerense (Figura 3) que contaron con al menos cuatro años de mapas de rendimiento de maíz, trigo, soja y cebada durante los años 2013 a 2021. La relación entre el rendimiento y la topografía varió notablemente entre lotes dependiendo del cultivo, del año y del rango de elevación explorado. Si bien no en todos los casos, en general, se observó que la relación preponderante obedeció a una forma de campana, con un rango de elevación intermedio coincidente con los rendimientos más altos, por encima y por debajo del cual se observan disminuciones en la productividad, por razones presumiblemente diferentes. En el rango de mayor elevación, su relación con rendimiento fue negativa debido principalmente a la menor disponibilidad hídrica del suelo a medida que aumenta la elevación del terreno, en particular en las campañas hídricamente más restrictivas (datos no mostrados) y especialmente para el cultivo de maíz por su mayor sensibilidad. Esta relación se invirtió en las áreas de menor elevación, particularmente en las campañas con excesos hídricos (datos no mostrados), donde los rendimientos tendieron a bajar a medida que disminuyó la elevación del terreno (áreas sujetas a encharcamiento y anoxia radical). Por su parte, la ECa fue generalmente un indicador más sensible y consistente entre sitios para explicar patrones de rendimiento a nivel intra-lote. Al igual que para la elevación y en mayor medida

para las gramíneas, se observó que la relación entre el rendimiento de los cultivos y la ECa presentó una forma de tipo óptima, identificándose un rango de ECa (de magnitud variable) consistente con máximos valores de productividad por encima y por debajo del cual el rendimiento disminuyó. Esta tasa de disminución fue mayor para maíz, intermedia para trigo y cebada y menor para soja, y tendió a ser más abrupta en campañas meteorológicamente más extremas (datos no mostrados). En algunos casos, especialmente para el cultivo de soja y cultivos de invierno, no se observaron relaciones consistentes entre el rendimiento y la elevación o la ECa, destacando la diferente sensibilidad de los cultivos ante la heterogeneidad de los lotes y como esto interacciona con cada campaña.

Este ejemplo con sólo cuatro localidades pretende resaltar la importancia de entender cuantitativamente la relación (si existe) entre la variabilidad edafotopográfica de los lotes y la productividad de los cultivos como un primer paso para la delineación de zonas relativamente homogéneas dentro del lote, que se manejen de forma diferencial, siempre y cuando el nivel de variabilidad y el cultivo lo justifiquen (Whelan y Taylor, 2013). Desde los inicios de la agricultura de precisión, el concepto de zonas de manejo (ZM) ha sido ampliamente aplicado (Whelan y Taylor, 2013). En este enfoque, la variabilidad intra-lote se agrupa en zonas con características similares, que se supone que también comparten la misma respuesta a los insumos y, por lo tanto, los mismos requerimientos de manejo. Si se combinan con experimentos a campo, estas ZM pueden ayudar a comprender las respuestas a nivel intra-lote, y si existe interacción entre tratamientos y zonas, habrá oportunidad para desarrollar funciones de respuesta específicas para cada zona (Bishop y Lark, 2006; Piepho et al., 2011). Si bien el enfoque de ZM es intuitivo y directo, su supuesto principal (la homogeneidad de las respuestas dentro de las ZM y la heterogeneidad entre ellas) no siempre se cumple ni se verifica. Además, para aumentar la resolución espacial con la que se puede manejar un cultivo, se requiere información sobre cómo el rendimiento responde a diferentes tratamientos y cómo esas respuestas varían en el espacio (Bullock y Bullock, 1994).

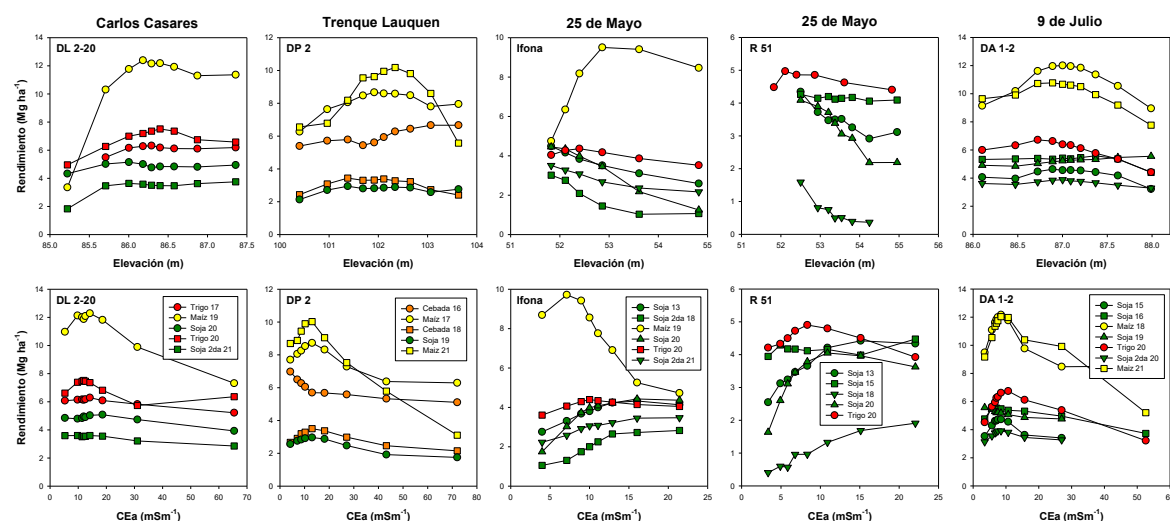


Figura 3. Rendimiento de maíz, trigo, cebada y soja en función de la elevación del terreno y la conductividad eléctrica aparente (ECa) dentro de lotes del Centro Oeste Bonaerense (Pagani et al., 2022).

>. INVESTIGACIÓN EN CAMPOS DE PRODUCTORES

La investigación en campo de productores u *“on-farm research/experimentation”* ha ganado popularidad en los últimos años con la mayor adopción de tecnologías de agricultura de precisión y se presenta como una herramienta de gran potencialidad para evaluar el impacto de numerosas prácticas agrícolas (incluida la nutrición de cultivos) y su interacción con el ambiente (Lacoste et al., 2021). Existen diferentes metodologías y diseños experimentales que han sido propuestos para realizar investigación en lotes de producción. Los ensayos en microparcels (Figura 3a) instalados en áreas estratégicas del lote tienen la ventaja de la alta precisión y confiabilidad de los resultados, pero generalmente involucran trabajos manuales que los tornan de alto costo, gran laboriosidad y dificultad para escalar. Son particularmente útiles para responder preguntas puntuales cuando se requiere de alta precisión en los resultados en situaciones determinadas.

Los ensayos en franjas (Figura 3b) cosechados con máquinas equipadas con monitor de rendimiento (Scharf et al., 2005; Pagani y Mallarino, 2015) tienen la gran ventaja de la mecanización, y al cubrir un área más extensa, pueden explorar un mayor rango de variabilidad. Generalmente se los utiliza cuando se quiere responder a preguntas de tipo categórico (tratamientos sí/no o A/B) porque proporcionan un entendimiento “más continuo” de como la variabilidad espacial de los lotes interacciona con los tratamientos evaluados. Sin embargo, esto ocurre muchas veces a expensas de cierta pérdida de precisión de los resultados generados (Piepho et al., 2011), especialmente cuando se emplean franjas de gran ancho o más de dos o tres tratamientos. Estadísticamente, también presentan algunas desventajas con respecto a la repetición, aleatorización y al balance de los tratamientos, por lo que se requiere de procedimientos de mayor complejidad para poder realizar comparaciones en forma insesgada (Trevisan et al., 2020).

Los ensayos en tablero de ajedrez o *“checkerboard design”* (Figura 3cdef) han ganado popularidad en los últimos años debido a sus ventajas logísticas y estadísticas (Kindred et al., 2015; Bullock et al., 2019). Estos protocolos requieren de maquinaria capaz de realizar dosificación variable con alta precisión y de la generación de un mapa *“as-applied”* de siembra o fertilización de las dosis realmente aplicadas. También necesitan de cosechadoras con monitor de rendimiento, por lo que permiten gran escalabilidad en la generación de información. Si bien la dimensión de las celdas debe adaptarse a la maquinaria disponible, su tamaño relativamente pequeño aprovecha algunas de las ventajas de las microparcels referidas a la precisión (Alesso et al., 2021), pero se benefician de la mecanización completa. Son particularmente útiles para experimentos que requieren dosis crecientes de insumos y su interacción con el ambiente, para poder ajustar funciones de producción continuas como las curvas de respuesta a la aplicación de un nutriente.

Independientemente del protocolo experimental adoptado, la posibilidad de realizar investigación a campo ha abierto un gran abanico de nuevas posibilidades para la evaluación de muchas prácticas de manejo empleadas por un productor e incluso para la generación de información inexistente hasta el momento a una escala a la cual sería impracticable haciendo investigación clásica en estaciones experimentales (Panten et al., 2010). Si se respetan los principios básicos del diseño experimental (Alesso et al., 2019), esta herramienta se presenta como un gran aliado para potenciar y retroalimentar el manejo sitio-específico de nutrientes. En las siguientes secciones se presentan ejemplos concretos del uso de esta tecnología.

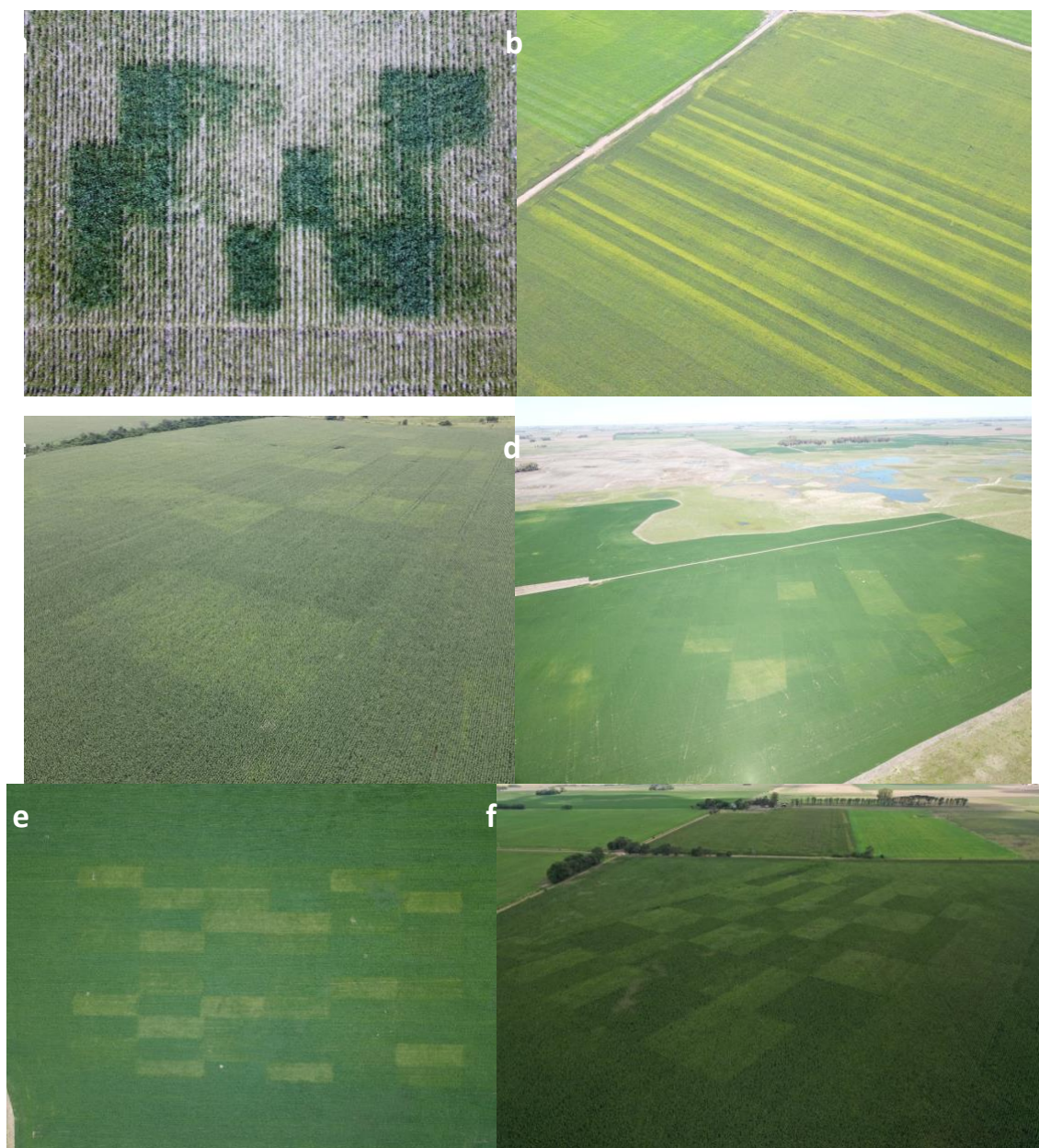


Figura 3. Fotos aéreas de diferentes diseños experimentales de investigación en campos de productores para el manejo de nutrientes: microparcels (a, 9 de Julio, Bs. As.), franjas repetidas (b, Gral. Villegas, Bs. As.) y tablero de ajedrez (*“checkerboard design”*, c, Las Lajitas, Salta, d, C. Casares, Bs. As., e, 9 de Julio, Bs. As. y f, Arrecifes, Bs. As.).

>. MANEJO VARIABLE DE FÓSFORO

La fertilización fosforada es una práctica muy difundida pero su implementación tradicional con dosis uniforme puede derivar en sub o sobre dosificación si el lote presenta variabilidad en la disponibilidad de este nutriente en el suelo (Bullock et al., 1994). El muestreo y análisis de suelo es la metodología de diagnóstico más difundida para determinar las necesidades de fertilización fosforada para los cultivos extensivos. Una asunción básica de esta práctica es que la muestra colectada represente cierta área con

un margen de error aceptable. Por lo tanto, la metodología de muestreo de suelo a emplear es un factor fundamental para conocer lo más certeramente posible la fertilidad del lote. En este sentido, los muestreos en grilla se han propuesto como herramientas efectivas para caracterizar los patrones de P y otros nutrientes (Wollenhaupt et al., 1994). Este tipo de muestreo consiste en subdividir sistemáticamente un lote en áreas pequeñas o celdas y de cada una de éstas se extrae una muestra compuesta de 10 a 12 submuestras. Los valores de los análisis de suelo obtenidos por el muestreo en grilla se los puede expresar directamente en un mapa para representar las celdas como tales (cuadrícula); o bien pueden usarse para interpolación de un mapa más denso y suavizado por medio de varios métodos estadísticos (Figura 4). Aunque la mayoría de los suelos de la Pampa Húmeda presentan deficiencia de P (Sainz Rozas, 2019), la variabilidad en la disponibilidad de este nutriente a escala de lote no ha sido intensivamente estudiada como en otros países más tecnificados (Mallarino y Wittry, 2004; Fu et al., 2013).

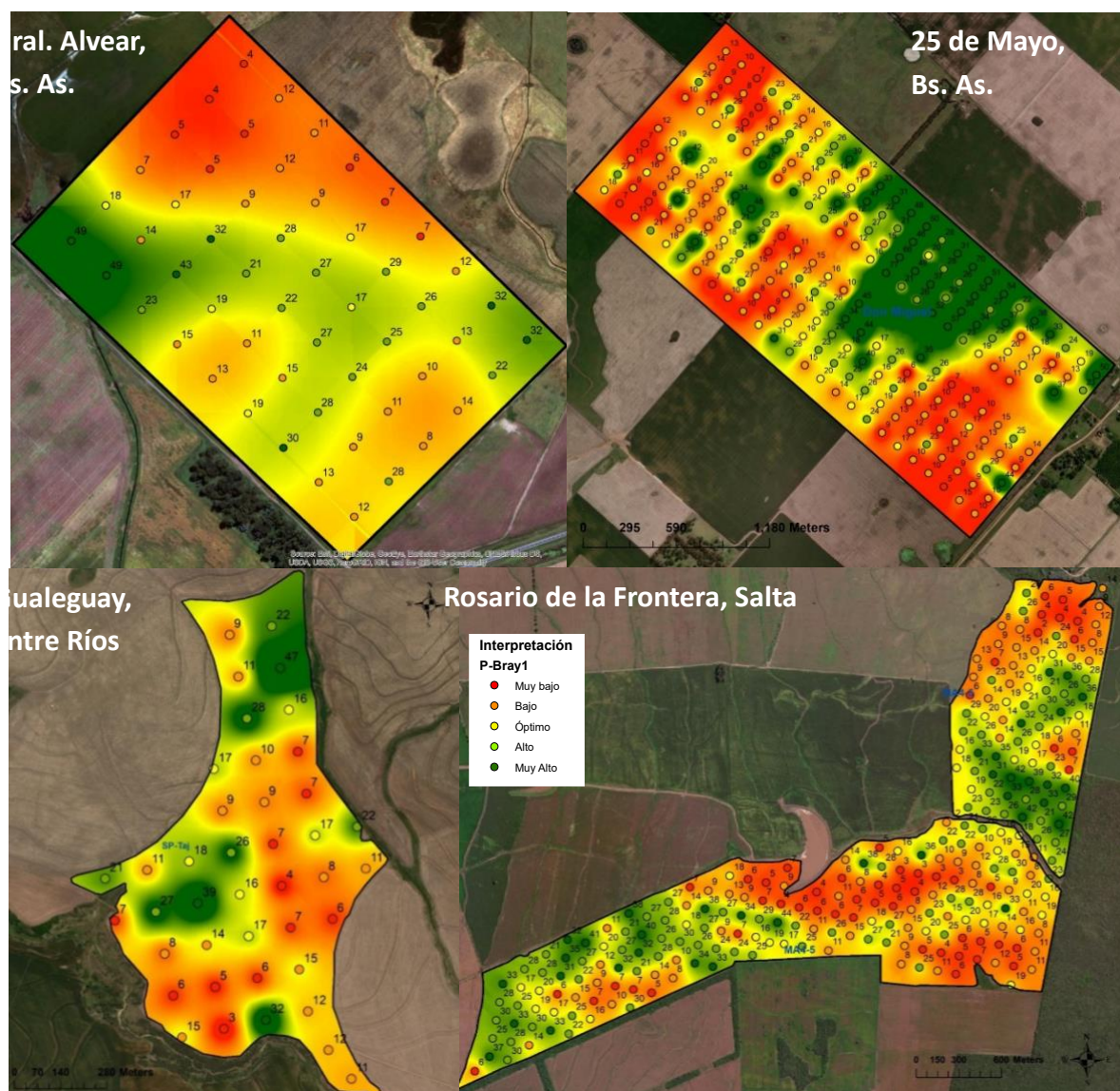


Figura 4. Ejemplo de cuatro lotes muestreados en grilla e interpolación de la información mediante Krigging ordinario mostrando diferentes patrones de variabilidad espacial el fósforo (P-Bray1). Las clases de interpretación fueron definidas como <7, 8-15, 16-20, 21-30 y >30 mg kg⁻¹ P-Bray1, para muy bajo, bajo, óptimo, alto y muy alto, respectivamente, según Sawyer et al. (2002).

Si bien se ha demostrado el valor de los muestreos de suelo densos para representar de manera relativamente precisa la distribución espacial de la fertilidad fosforada de un lote (Bonelli y Pagani, 2025), generalmente existen dudas sobre su costo-efectividad, es decir si esta práctica puede ser justificada económicamente, independientemente de su valor agronómico. Para responder a esa pregunta se utilizó información publicada (Correndo et al., 2018; Sucunza et al., 2018; Pagani y Estelrich, 2020) para simular la respuesta del rendimiento del maíz, el trigo y la soja a la fertilización fosforada en 343 lotes muestreados en grilla en una amplia zona del territorio nacional. Se comparó i) una dosis de P uniforme generada a partir del promedio de todos los puntos de la grilla de cada lote o ii) una dosis variable (entre 0 y 35 kg P/ha) para cada celda de la grilla en forma individual. En ambos casos se utilizaron las recomendaciones publicadas en Echeverría y García (1998) para definir la dosis de fertilizante según el nivel de P-Bray-1 en el suelo y se asumieron precios promedio para los granos y el fertilizante fosforado (SPT) para calcular el incremento de margen bruto (MB) por hectárea en cada lote y cultivo para una fertilización con dosis variable en relación a una con dosis uniforme. Los lotes muestreados presentaron diferentes niveles de variabilidad espacial en la disponibilidad de P con desvíos estándar que variaron entre 2 y 41 mg kg⁻¹ y rangos entre 2 y 221 mg kg⁻¹ (Figura 5), lo que representa una condición característica del área agrícola argentina.

Los resultados de estas simulaciones muestran que la fertilización variable presentó un MB estimado significativamente mayor que el de la fertilización con dosis uniforme (Figura 5, solo se muestran los resultados de soja) y su impacto económico promedio fue de 28, 41 y 31 US\$/ha para soja, maíz y trigo, respectivamente. Estos valores son claramente dependientes de los niveles absolutos de rendimientos considerados y de los precios de los granos (Holmes y Jiang, 2017) y del fertilizante fosforado (el incremento de MB aumenta a medida que lo hacen los precios), pero se consideran representativos a los fines de este análisis comparativo. Cabe aclarar que el aumento simulado de MB se compone de ahorro de fertilizante y/o aumento en la respuesta a P de la fertilización variable respecto a una con dosis uniforme y sólo contempla efectos de corto plazo, ignorando la residualidad de la fertilización y las ventajas para el sistema que la dosis variable de largo plazo provoca al disminuir la variabilidad de P en el suelo (Mallarino y Wittry, 2004).

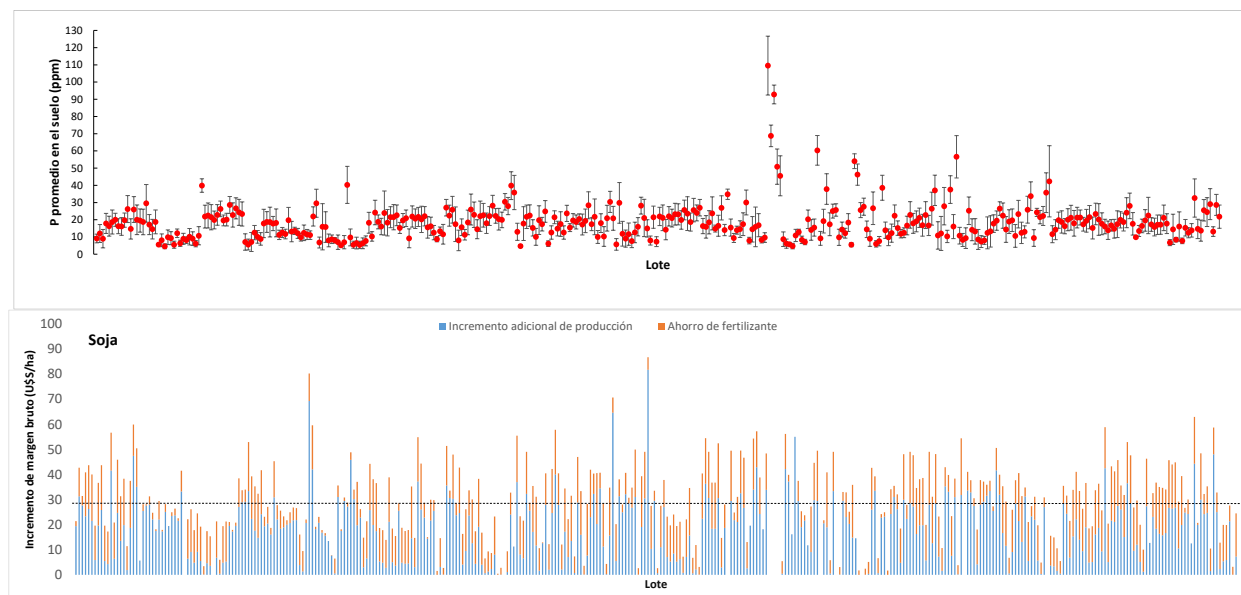


Figura 5. Disponibilidad inicial de fósforo (P) promedio e incremento de margen bruto por hectárea estimado de la fertilización fosforada con dosis variable respecto a un planteo uniforme para soja en 364 lotes. Dichos incrementos se componen en ahorro de fertilizante y/o aumento adicional de producción cuando la dosis variable aplica una dosis de fósforo (P) menor o mayor que la dosis uniforme, respectivamente.

Este estudio de simulación de escala nacional permitió estimar ventajas económicas significativas de la fertilización fosforada con dosis variable basada en un muestreo de suelo en grilla en la gran mayoría de los lotes relevados. Sin embargo, las mayores ventajas económicas de la fertilización variable se observaron en aquellos lotes con mayor nivel de variabilidad de P (CV%), pero especialmente cuando dicha variabilidad se encuentra equitativamente distribuida en los distintos rangos de disponibilidad. Particularmente, los mayores beneficios económicos de la fertilización variable se encontraron en los lotes cuyo promedio de P inicial se encontraba en el rango de 10 a 20 mg kg⁻¹ (Figura 6), en concordancia con lo que ha sido reportado en estudios similares (Mills et al., 2021). Estos resultados pueden explicarse considerando que las ventajas de la fertilización variable tienden a diluirse si el lote presenta valores promedio de P muy bajos (donde una fertilización fosforada con una alta dosis uniforme sería lo recomendado) o cuando el lote presenta valores altos de P (mayores a 20 mg kg⁻¹), donde la probabilidad y magnitud de la respuesta a la fertilización en general se reduce considerablemente.

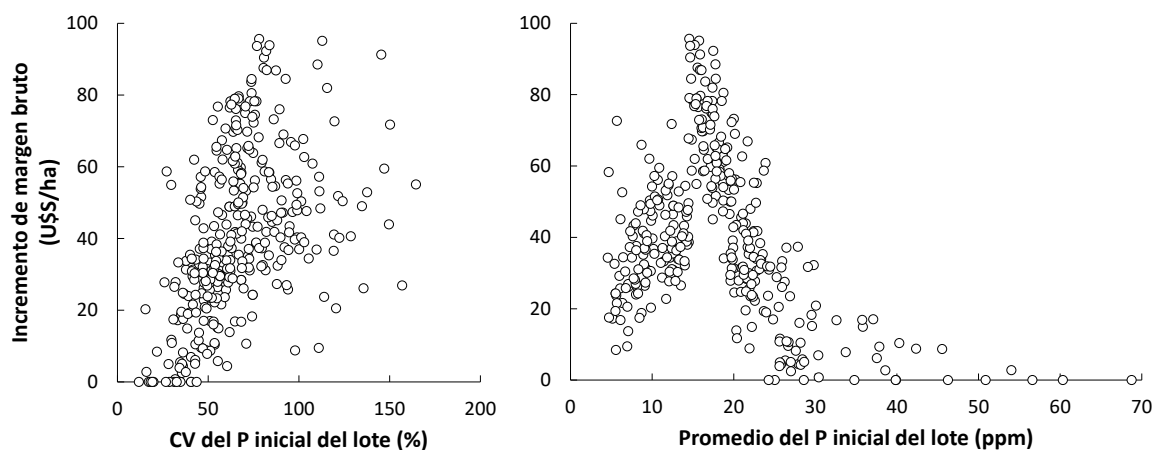


Figura 6. Incremento de margen bruto por hectárea estimado proveniente del ahorro de fertilizante e incremento adicional de rendimiento de la fertilización fosforada con dosis variable respecto a la uniforme para soja en función del coeficiente de variación (CV) del fósforo disponible (P-Bray1) inicial en el suelo y del valor de P inicial promedio de todos los puntos del muestreo de suelo en grilla.

Además de considerar la rentabilidad de la fertilización fosforada con dosis variable en el corto plazo, es de sumo interés conocer la capacidad de esta práctica de manejo para aportar efectos benéficos residuales de mediano plazo al sistema mediante la generación de un mayor nivel de fertilidad acumulada y un cambio positivo en todo el ambiente edáfico. En este sentido, la reducción paulatina de la variabilidad espacial en la distribución de P dentro del lote es un buen indicador de éxito. Es por eso que cobra importancia el monitoreo de los niveles de P en el tiempo a intervalos regulares (generalmente recomendados de tres a cinco años). En la Figura 7 se presenta un ejemplo de la situación inicial de la disponibilidad de P promedio (2017) y su distribución espacial de dos lotes de producción del Centro Oeste Bonaerense y el resultado luego de cinco o seis años de fertilización fosforada con dosis variable basada en un muestreo de suelo en grilla y balances de P, contemplando la exportación de los cultivos mediante el monitoreo de rendimiento. En ambos ejemplos puede observarse un aumento considerable en la disponibilidad de P de los lotes gracias un manejo del nutriente con balances positivos a lo largo de la rotación. Además, es evidente una tendencia paulatina de disminución de la variabilidad de P a nivel intra-lote, particularmente reduciendo el porcentaje del área de los lotes con P en las clases baja y muy baja en línea con lo reportado por Bermúdez y Mallarino (2007). Si bien los resultados del primer ciclo de fertilización variable distan de la perfección (alcanzar la totalidad de la superficie del lote en el rango de

P óptimo) son satisfactorios para comenzar a reducir la variabilidad espacial, incrementando la superficie de los lotes en la zona de suficiencia para no limitar la productividad de los cultivos ni generar excesos que conduzcan a exportación excesiva de P del sistema (consumo de lujo) y riesgos de contaminación ambiental.

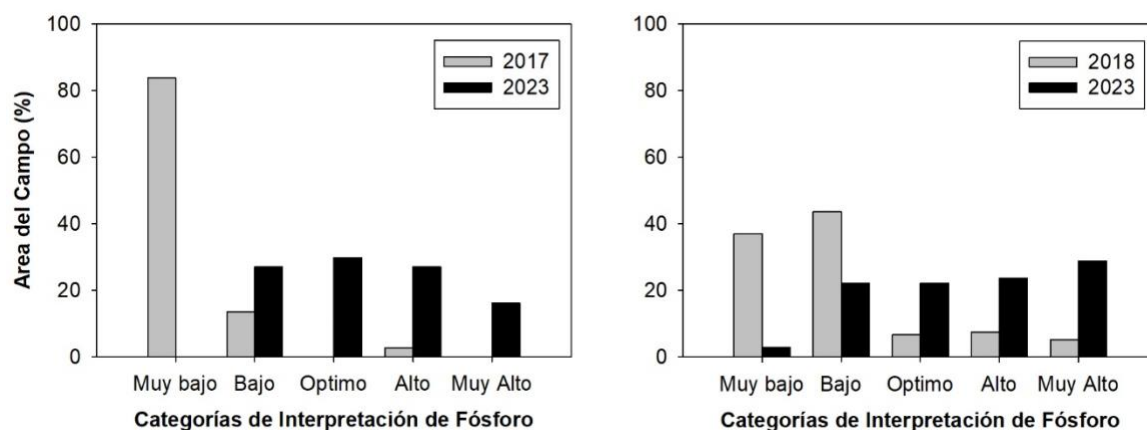


Figura 7. Porcentaje del área de un lote de producción de Carlos Casares y Pehuajó, Bs. As. representado por las clases de interpretación de fósforo (P) en el suelo antes (2017 y 2018) y después de cinco o seis años de fertilización fosforada con dosis variable (2023). Las clases de interpretación fueron definidas como <7, 8-15, 16-20, 21-30 y >30 mg kg⁻¹ P-Bray1, para muy bajo, bajo, óptimo, alto y muy alto, respectivamente, según Sawyer et al. (2002).

>. MANEJO VARIABLE DE NITRÓGENO

El manejo del N en sistemas agrícolas es complejo debido al número de factores que intervienen en la dinámica de este nutriente en el sistema suelo-planta-atmósfera. A diferencia de lo mencionado para P, en la práctica resulta particularmente difícil diagnosticar correctamente las necesidades de N de un cultivo y efectuar una fertilización nitrogenada que maximice el retorno económico de la inversión. Esto se debe a la gran variabilidad temporal en la oferta de N del suelo, en la eficiencia con la cual el cultivo puede recuperarlo y en la variable demanda de N por parte del cultivo en función de su potencial de rendimiento (Hergert et al. 1995; Lambert et al. 2006). Lo anterior cobra mayor relevancia en regiones húmedas o con regímenes de precipitación variables, donde las lluvias juegan un rol central como condicionantes de la mineralización de N del suelo, los procesos de pérdida de N del sistema, el potencial de rendimiento del cultivo y, por ende, la respuesta a fertilización (Eghball y Varvel, 1997).

En condiciones de producción, dependiendo de la heterogeneidad del lote, además de la variabilidad temporal existe variabilidad espacial en el rendimiento de los cultivos y en la respuesta de estos a la aplicación de N (Raun et al., 2002; Scharf et al., 2005; Arana, 2018; Girón, 2019; Puntel et al., 2019; Rompani, 2024). Dicha variabilidad espacial en rendimiento o respuesta a N está relacionada al manejo anterior, al tipo de suelo, topografía, textura, presencia de impedancias físicas para el desarrollo radicular (como tosca y horizonte thapto), presencia de sales y sodio, profundidad de napa, entre otras (Sadras y Calviño, 2001; Bongiovanni, 2002; Mamo et al., 2003; Nosetto et al., 2009). Estas variables condicionan en mayor o menor medida la capacidad del cultivo para responder a la aplicación de N.

En muchas situaciones, la variabilidad temporal y espacial interactúan entre sí (Eghball y Varvel, 1997). Dichas interacciones hacen que por ejemplo, ciertas áreas de un lote presenten altos rendimientos un año húmedo, pero bajos rendimientos si en el año siguiente se dan condiciones de estrés hídrico. Es por eso que las herramientas de diagnóstico para determinar las necesidades de N en un planteo sitio-específico deberían no solo concentrarse en la determinación de un solo indicador (como el rendimiento

esperado o el nivel de N-nitrato en el suelo), si no que deben integrar los factores más importantes que condicionan la respuesta del cultivo a la aplicación de N.

El empleo de curvas de respuesta de un cultivo a la fertilización nitrogenada es un concepto con varios años de antigüedad (Sawyer et al., 2006). Esta metodología se basa en caracterizar una región, subregión, lote o área dentro del lote en función de la respuesta en rendimiento de cultivos anteriores a la aplicación de niveles crecientes de N y utilizar esta información para decidir futuras fertilizaciones. Específicamente, se ajustan modelos continuos de respuesta a N y se determina el nivel donde la rentabilidad de la fertilización se maximiza o dosis óptima económica (DOE) de N. Para el empleo exitoso de este método se debe contar con un gran número de ensayos de dosis de fertilización nitrogenada repetidos en el mismo ambiente durante varios años a fin de caracterizar debidamente la variabilidad temporal de la respuesta a N en cada sitio. A nivel regional los ambientes tienden a repetirse, por lo que la información generada en los sitios experimentales puede ser utilizada para realizar recomendaciones en condiciones similares.

En la Figura 9 se observan ejemplos de cómo cuatro factores, la elevación del terreno, la textura del suelo (indirectamente estimada a través de la ECa) y la profundidad efectiva del horizonte Petrocálcico (tosca) o Thapto, pueden influenciar marcadamente la productividad de los cultivos y su respuesta a la fertilización nitrogenada dentro de los lotes de producción.

El primer caso de estudio (Figura 9a) proviene de un lote de trigo durante la campaña 2021 en Gral. Pico, La Pampa, con marcada variabilidad topográfica donde puede observarse que el rendimiento máximo (ante suficiencia de N) aumentó a medida que disminuyó la elevación del terreno, debido principalmente a la mayor disponibilidad hídrica de las áreas más deprimidas del paisaje. Esto hizo que la magnitud de la respuesta a la fertilización nitrogenada y, por lo tanto, el rango de DOE también aumente a medida que disminuyó la elevación, como ha sido ampliamente documentado en condiciones similares (Gregoret et al., 2006; Puntel et al. 2019; Rompani, 2024).

El segundo ejemplo (Figura 9b) muestra curvas de respuesta a N en maíz pisingallo en la campaña 22/23 dentro de un lote de Las Lajitas, Salta, con heterogeneidad en la textura (de franco arenoso en las zonas de menor ECa a franco arcilloso en las zonas de mayor ECa) y en el contenido de materia orgánica (Figura 8). En este caso se observó un incremento en el rendimiento del cultivo a medida que aumentó la ECa (la textura del suelo se hace más fina) asociado a una mayor disponibilidad hídrica y un mejor ambiente edáfico en general. A su vez, solamente se observó respuesta a N a partir de cierto nivel de ECa, no encontrándose beneficio de la fertilización (DOE = 0 kg N/ha) en las zonas del lote con ECa < 9 ms/s. Este comportamiento es bastante frecuente cuando el déficit hídrico es el factor más limitante para el crecimiento del cultivo, situación particularmente recurrente en el NOA.

El tercer ejemplo (Figura 9c) proviene de un lote con variabilidad en la profundidad efectiva del suelo a causa del horizonte petrocálcico en Olavarría, Bs. As., donde se observó en la campaña 2016 un rendimiento de trigo máximo de 5 tn/ha cuando la profundidad del suelo fue superior a 60 cm y de 3.7 tn/ha para sectores del lote con suelo somero (<60 cm). Además, la DOE calculada fue de 55 y 105 kg N/ha para la zona de suelo somero y profundo, respectivamente. Resultados similares han sido reportados para el cultivo de maíz en la misma zona de estudio (Arana, 2018)

Finalmente, el cuarto ejemplo (Figura 9d) corresponde a un estudio realizado en dos lotes del partido de Gral. Villegas, Bs. As. (Girón, 2019) en la campaña 2015/16, caracterizada por excesos hídricos durante el ciclo del maíz. En ambos sitios puede observarse que tanto la respuesta a la fertilización nitrogenada como la DOE fueron más altas en las zonas dentro de los lotes con presencia de horizonte Thapto, que en las zonas de suelo profundo (Hapludoles Típicos) sin esta capa de arcilla subsuperficial. Este comportamiento puede explicarse por la ocurrencia de mayores pérdidas de N en las áreas dentro de los lotes de textura más fina, sujetas a condiciones de saturación hídrica más severas debido a la menor capacidad de drenaje (Bremner y Shaw, 1958), donde el rendimiento sin N disminuyó proporcionalmente más que el rendimiento ante suficiencia de N, incrementando la respuesta a la fertilización. Dicho comportamiento general también fue observado en trigo por Rompani (2024) en el Centro Oeste Bonaerense en años de precipitaciones abundantes y es útil para graficar la independencia que existe entre el rendimiento y respuesta a N en regiones húmedas, concepto que ha sido ampliamente desarrollado en numerosos trabajos internacionales (Sawyer et al., 2006; Raun et al., 2010).

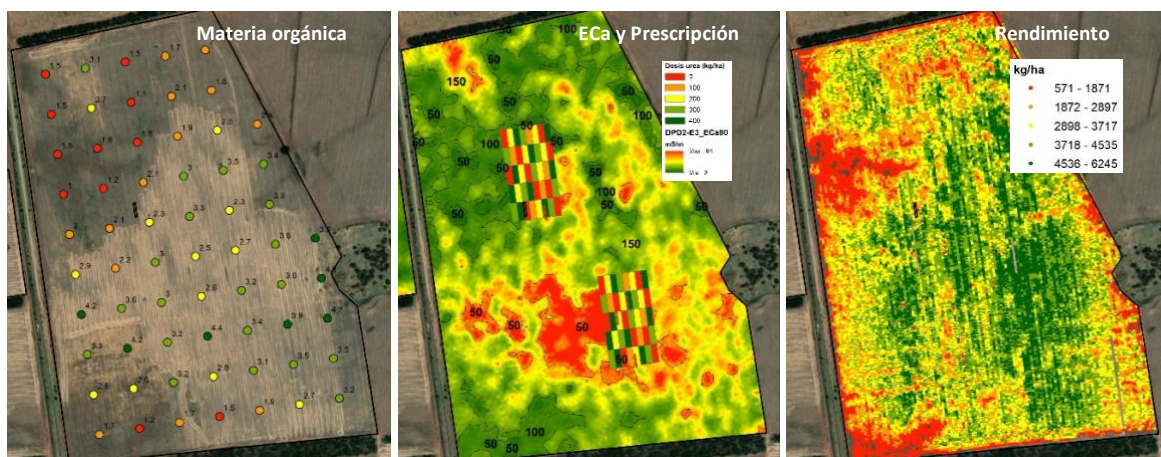
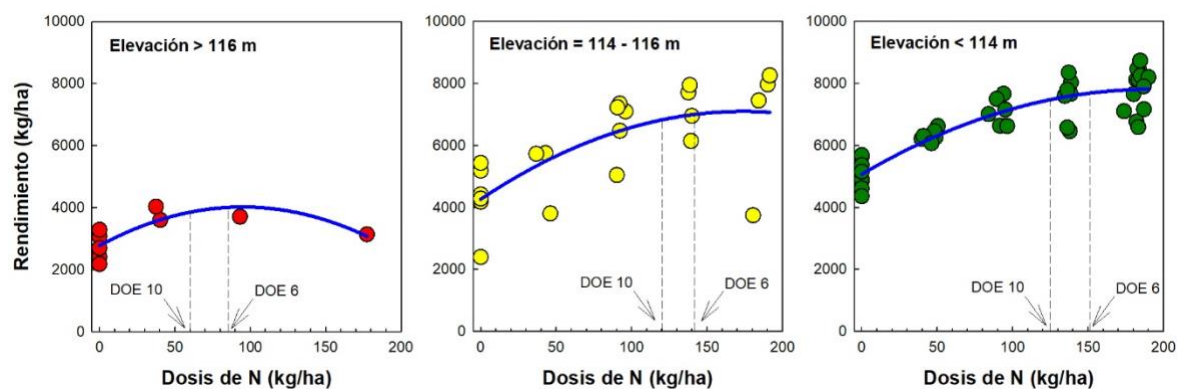
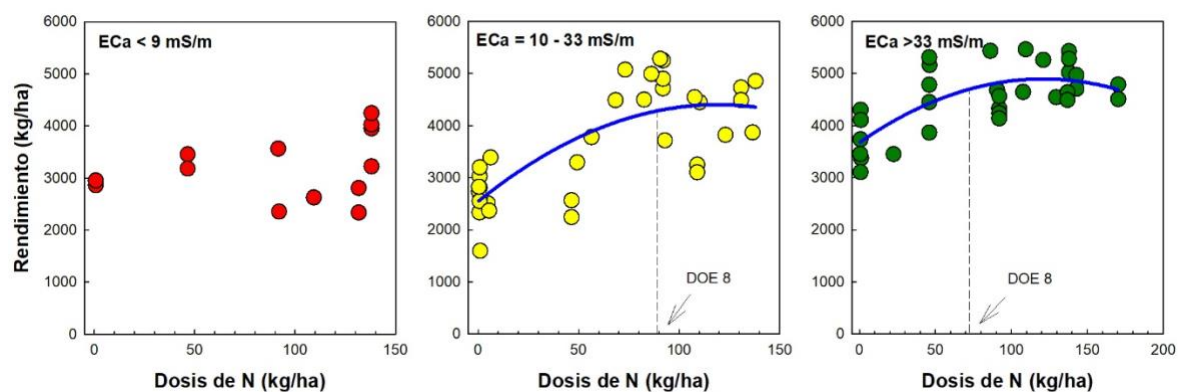


Figura 8. Mapa de materia orgánica (%), conductividad eléctrica aparente (ECa) y prescripción de urea mostrando ensayos en tablero de ajedrez y mapa de rendimiento de maíz pisingallo de la campaña 22/23 en un lote de producción de Las Lajitas, Salta.

Trigo 21, Gral. Pico, La Pampa (a)



Maíz pisingallo 23, Las Lajitas, Salta (b)



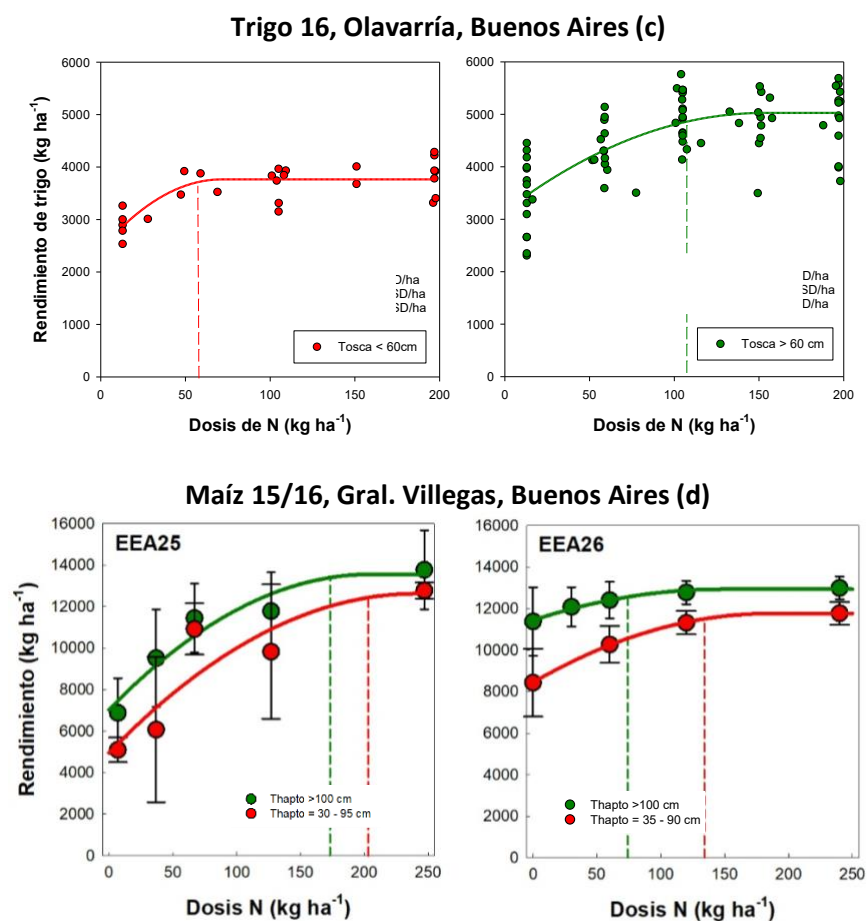


Figura 9. Rendimiento de trigo (a y c), maíz (d) y maíz pisingallo (b) en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada para zonas dentro de los lotes con variabilidad en la elevación, conductividad eléctrica aparente (ECa) y profundidad efectiva (tosca y horizonte Thapto) en las localidades de Gral. Pico, La Pampa (campaña 21), Las Lajitas, Salta (campaña 2023), Olavarría, Buenos Aires (campaña 2016) y Gral. Villegas (campaña 2015/16). Información proveniente de ensayos en tablero de ajedrez (a, b y c) y en franjas (d) fertilizados con máquinas neumáticas y cosechados con monitor de rendimiento. Las líneas punteadas verticales indican la dosis óptima económica (DOE) de N ante diferentes relaciones de precio N/grano.

Estos ejemplos que combinan caracterización ambiental intensiva con investigación en campos de productores ejemplifican para diferentes condiciones de producción la ocurrencia de interacción N por ambiente, es decir que la respuesta a la fertilización nitrogenada varía dentro del lote en respuesta a los procesos que afectan la demanda del cultivo y la oferta del suelo (Bishop y Lark, 2006; Piepho et al., 2011). En este sentido la fertilización nitrogenada con dosis variable basada en un diagnóstico sitio-específico y un enfoque dinámico constituye una herramienta muy útil para maximizar su resultado económico y minimizar el riesgo de generar excesos que constituyan problemas ambientales.

> MANEJO VARIABLE DE OTROS NUTRIENTES

Existe abundante evidencia bibliográfica a nivel internacional acerca del manejo sitio-específico de potasio (K). Al igual que el P, este nutriente presenta elevada variabilidad espacial en lotes con suelos genéticamente heterogéneos o con alta historia de fertilización potásica y/o aplicación de enmiendas orgánicas. Por esa razón, también se han propuesto esquemas de muestreo de suelo en grillas y zonas, para manejar la variabilidad espacial de K y realizar un manejo más eficiente de este nutriente (Mallarino y Wittry, 2004). Generalmente se ha observado que el muestreo de suelo denso es el más apropiado para lotes con extensa variabilidad espacial de K en pequeña escala. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de un lote de producción de Uruguay muestreado en grilla en el que puede observarse el alto grado de variabilidad espacial en el K intercambiable, cuyo rango de interpretación varía entre muy bajo y muy alto (Sawyer et al., 2002). En este ejemplo, un 24% del lote no requeriría fertilización potásica mientras que otro 20 y 56% del mismo necesitaría dosis de fertilización altas y muy altas, respectivamente.

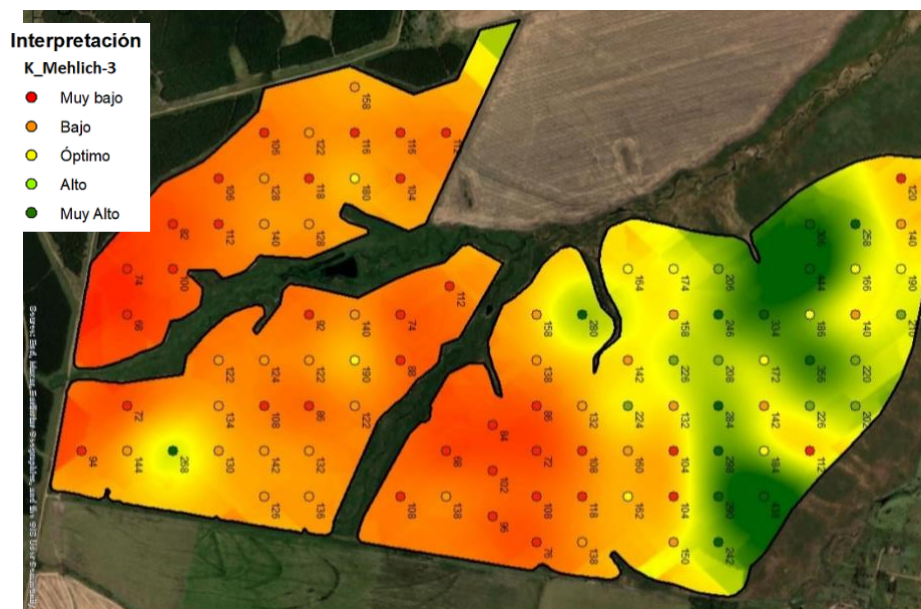


Figura 10. Variabilidad espacial de potasio (K) disponible (mg kg^{-1}) en un lote muestreado en grilla en Sarandí de Navarro, Departamento do Río Negro, Uruguay. Las clases de interpretación fueron definidas como <120 , 121-160, 161-200, 201-240 y $>240 \text{ mg kg}^{-1}$ K-Mehlich3, para muy bajo, bajo, óptimo, alto y muy alto, respectivamente, según Sawyer et al. (2002).

Estudios internacionales han demostrado extensa variabilidad espacial en el pH del suelo y en las necesidades de encalado dentro de lotes de producción. Pierce y Warncke (2000) sugieren la conveniencia de la aplicación de enmiendas básicas mediante técnicas de agricultura de precisión a los fines de evitar sub o sobreaplicaciones. En este sentido, Pagani y Mallarino (2015) caracterizaron lotes contrastantes en cuanto a variabilidad espacial del pH del suelo y requerimientos de encalado en el estado de Iowa, EEUU. En la misma región, Bianchini y Mallarino (2002) señalaron que la aplicación de cal en forma variable dentro del lote ayudaba a disminuir la variabilidad espacial del pH edáfico. Al igual que para otros nutrientes, la tecnología de aplicación variable de cal, requiere de un muestreo de suelo intensivo, el cual puede ser en grilla, en zona o mediante el uso de instrumentos que coleccionan muestras de suelo y analizan su pH en tiempo real. En la Figura 11 se muestra un ejemplo de variabilidad espacial en la respuesta del maíz y la soja al encalado en un lote de 9 de Julio, Bs. As., con variabilidad espacial en la elevación, textura del suelo, capacidad de intercambio catiónico y capacidad buffer de pH. En este estudio de dos años sólo

se observó respuesta significativa al agregado de carbonato de calcio (CaCO_3) finamente molido en soja y maíz en la loma de textura más gruesa pero no en el área más deprimida del paisaje donde el suelo presentaba una textura más fina y mayor capacidad reguladora de la acidez del suelo. Estos resultados alientan a trabajar en la neutralización de suelos ácidos con una concepción sitio-específica, ya que ignorar la variabilidad espacial del pH o la capacidad buffer del suelo puede derivar en dosis insuficientes en sitios donde el problema es más severo, y por otro lado, aplicaciones innecesarias donde el pH es óptimo para el crecimiento de los cultivos con consecuencias negativas importantes (Borgelt et al., 1994).

El conocimiento disponible respecto al manejo de azufre (S) con dosis variable no es abundante. Ciertos estudios sugieren la existencia de respuesta diferencial a la aplicación de S por parte de algunos cultivos según ciertos atributos del paisaje y el suelo. En Minnesota, EEUU, (Kaiser et al., 2010) se determinó a través de ensayos en franjas atravesando la variabilidad espacial de 4 lotes, que el cultivo de maíz respondía significativamente al agregado de S cuando el nivel de MO del suelo era menor a 2%, pero la probabilidad de respuesta bajaba en el rango de MO de 2 a 4%, y haciéndose nula a valores de MO superiores a 4%. En este trabajo se concluyó que la aplicación variable de S podría incrementar la rentabilidad del cultivo de maíz en regiones con marcada variabilidad espacial. En Argentina, si bien no se conocen trabajos de investigación que estudien específicamente la variabilidad espacial de la respuesta a la fertilización azufrada, probablemente puedan aplicarse algunos principios aprendidos para N (Pagani y Echeverría, 2011), teniendo en cuenta la similitud de ambos nutrientes en el sistema suelo-planta-atmosfera.

La información expuesta en esta sección, representa algunos ejemplos de cómo el uso de la tecnología de aplicación variable se ha expandido a otros insumos. En el futuro se espera que el uso de estas herramientas también se haga extensivo a otros nutrientes y enmiendas en la medida que se demuestre el beneficio consistente por su implementación.

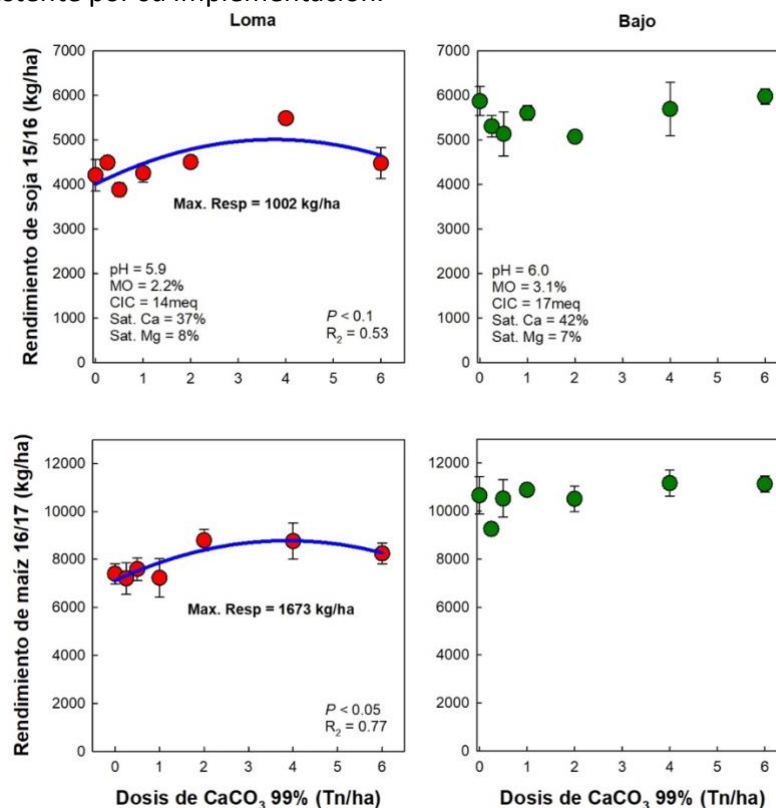


Figura 11. Rendimiento de soja y maíz en función de la dosis de carbonato de calcio (CaCO_3) finamente molido para una loma de textura más gruesa de menor capacidad buffer de pH y un bajo de textura más fina de mayor capacidad buffer en un lote de producción de 9 de Julio, Bs. As. durante las campañas 15/17 y 16/17. Las barras verticales representan los errores standard de la media de tres repeticiones y las líneas azules los modelos de regresión cuadráticos (adaptado de Larrea et al., datos no publicados).

>. CONSIDERACIONES FINALES

En este resumen se presentaron algunas experiencias provenientes de diferentes zonas del área productiva argentina que evidencian cómo las herramientas de agricultura de precisión, la integración de conocimiento básico de fertilidad de suelo y nutrición de cultivos y la investigación en campos de productores pueden contribuir a mejorar el manejo de nutrientes en los sistemas agrícolas. Es necesario seguir profundizando el entendimiento de las capacidades de esta tecnología de manera que cuando su implementación se masifique en Argentina, lo haga aprovechando su máximo potencial.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, C. A., Cipriotti, P. A., Bollero, G. A., & Martin, N. F. 2019. Experimental designs and estimation methods for on farm research: a simulation study of corn yields at field scale. *Agron. J.* 111(6): 2724–2735.
- Alesso, C.A., Cipriotti P.A., Bollero G.A., & Martin, N.F. 2021. Design of on-farm precision experiments to estimate site-specific crop responses. *Agron. J.* 113:1–15.
- Arana, E.D. 2018. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el sudeste bonaerense". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Posgrado en Producción Vegetal.
- Bermúdez, M., & A.P. Mallarino. 2007. Impacts of variable-rate phosphorus fertilization based on dense grid soil sampling on soil-test phosphorus and grain yield of corn and soybean. *Agron. J.*
- Bianchini, A.A., & A.P. Mallarino. 2002. Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean–corn rotation. *Agron. J.* 94:1355–1366.
- Bishop, T. F. A., & Lark, R. M. 2006. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. *Geoderma*, 133(1–2), 87–106.
- Bongiovanni, R. 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, 280 p.
- Bonelli, C.I. & A. Pagani. 2025. Evaluación de metodologías para la delineación de zonas de manejo de fósforo. *Actas Simposio Fertilidad 2025*. Rosario, 7 al 8 de mayo.
- Borgelt, S.C., S.W. Searcy, B.A. Stout, & D.J. Mulla. 1994. Spatially variable liming rates: A method for determination. *Trans. ASAE* 37:1499–1507.
- Bremner, J. M. & K. Shaw. 1958. Denitrification in soil 1. Methods of investigation. *Journal of Agricultural Science* 51: 22–39.
- Bullock, D. S., Boerngen, M., Tao, H., Maxwell, B., Luck, J. D., Shiratsuchi, L., . . . & Martin, N. F. 2019. The data-intensive farm management project: Changing agronomic research through on-farm precision experimentation. *Agron. J.* 111(6): 2736–2746.
- Bullock, D. S., & Bullock, D. G. 1994. Calculation of optimal nitrogen fertilizer rates. *Agron. J.* 86(5): 921–923.

- Bullock, D.G., R.G. Hoef, P. Dorman, T. Macy, & R. Olson. 1994. Nutrient management with intensive soil sampling and differential fertilizer spreading. *Better Crops Plant Food*. 78:10-12.
- Correndo, A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano.
- Echeverría H.E. & F.O. Garcia. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico No. 149*. EEA INTA Balcarce.
- Eghball, B., & G.E. Varvel. 1997. Fractal analysis of temporal yield variability of crop sequences: Implications for site-specific management. *Agron. J.* 89:851-855.
- Fu, W., K. Zhao, P. Jiang & Z. Ye. 2013. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Res.* 51(6): 503.
- Girón, P. 2019. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el noroeste bonaerense". Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano.
- Gregoret, M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni & M. Diaz-Zorita. 2006. Modelo de repuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ci. Suelo*. 24(2): 147-159.
- Hergert, G. W., R. B. Ferguson, & C. A. Shapiro. 1995. Fertilizer suggestions for corn. University of Nebraska IANR, NebGuide G74-174-A (Rev. July 1995). Lincoln, NE, University of Nebraska.
- Holmes, A.W. & G. Jiang. 2017. Effect of variable rate lime applications on autumn sown barley performance. *Agronomy New Zealand*. 47:37-45.
- Kaiser, D.E., J.A. Lamb, & K. Kim. 2010. Response to starter applied sulfur in combination with nitrogen and phosphorus across a landscape. p. 66-73. En: *Proc. 40th annual North Central Extension Industry Soil Fertility Conference*. Nov. 17-18 Des Moines, IA.
- Kindred, D. R., Milne, A. E., Webster, R., Marchant, B. P., & Sylvester-Bradley, R. 2015. Exploring the spatial variation in the fertilizer nitrogen requirement of wheat within fields. *Journal of Agricultural Science*, 153(1), 25-41.
- Lacoste, M., Cook, S., McNee, M., Gale, D., Ingram, J., & Bellon-Maurel. 2022. On-Farm Experimentation to transform global agriculture. *Nature Food*. 3(1): 11-18.
- Lambert, D.M., J. Lowenberg-DeBoer, & G.L. Malzer. 2006. Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. *Agron. J.* 98:43-54.
- Mallarino, A.P. & D.J. Wittry. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agric.* 5:131-144.
- Mamo, M., G.L. Malzer, D.J. Mulla, D.R. Huggins, & J. Strock. 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95:958-964.

- Mills, B.E., B.W. Brorsen, & D.B. Arnall. 2021. Using Grid Soil Sampling to Determine Profit-Maximizing Phosphorus Application Rates in Wheat. *Journal of Agricultural and Resource Economics*. 46(2):269–286
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson, & G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113: 138-148.
- Pagani, A. & Echeverría, H.E. 2011. Performance of sulfur diagnostic methods for corn. *Agron. J.* 103:413–421.
- Pagani, A., & C. Estelrich. 2020. Evaluación física y económica de la fertilización con fósforo en experimentos de largo plazo. Poster No 344, Comisión 3. 27mo Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de Octubre 2020, Corrientes, Argentina.
- Pagani, A., & A.P. Mallarino. 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. *Agron. J.* 107:71-82.
- Panten, K., Bramley, R. G. V., Lark, R. M., & Bishop, T. F. A. 2010. Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs. *Prec. Agric.* 11(2): 198–213
- Piepho, H. P., Richter, C., Spilke, J., Hartung, K., Kunick, A., & Thöle, H. 2011. Statistical aspects of on-farm experimentation. *Crop and Pasture Science*. 62(9), 721.
- Pierce, F.J., & D.D. Warnke. 2000. Soil and crop response to variable-rate liming for two Michigan Fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 774-780.
- Puntel, L.A., Pagani, A. & Archontoulis, S.V., 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *Europ. J. Agron.* 105, 189–199.
- Raun, W.R., J.B. Solie & M.L. Stone. 2010. Independence of yield potential and crop nitrogen response. *Precis. Agric.* 12:508–518.
- Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, W.E. Thomason, & E.V. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron. J.* 94:815–820.
- Rompani, J.M. 2024. Modelos de fertilización nitrogenada en trigo diseñados para apoyar el manejo sitio-específico del cultivo en el centro oeste bonaerense. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano.
- Sadras, V.O., & P.A. Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93(3): 577-583.
- Sawyer, J.E., A.P. Mallarino, R. Killorn & S.K. Barnhart. 2002. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. Publ. PM-1688 (Rev.). Iowa State Univ. Ext., Ames.
- Sawyer, J., E. Nafziger, G. Randall, L. Bundy, G. Rehm, & B. Joern. 2006. Concepts and Rationale for Regional Nitrogen Rate Guidelines for Corn (PM-2015). Iowa State Univ. Extension.
- Sainz Rozas, HE; N. Wyngaard; M. Eyherabide; G. Larrea; N. Martínez Cuesta; N.I. Reussi Calvo & H. Angelini. 2019. Cambios en la disponibilidad de nutrientes en la región pampeana. Actas XXVII Congreso AAPRESID. Rosario, 7 al 9 de agosto.
- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.C. Hubbard, & J.A. Lory. 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron. J.* 97(2): 452-461.

- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, & J.G. Davis. 2006b. Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 2154–2160.
- Sucunza, F.A., F.H. Gutierrez Boem, F.O. Garcia, M. Boxler & G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Europ. J.Agron.* 96, 87–95.
- Trevisan, R. G., Bullock, D. S., & Martin, N. F. 2020. Spatial variability of crop responses to agronomic inputs in on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09720-8>
- van Alphen, B. J., & Stoorvogel, J. J. 2000. A functional approach to soil characterization in support of precision agriculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1706-1713.
- Whelan, B. M., & Taylor, J. A. 2013. *Precision agriculture for grain production systems*. Collingwood: CSIRO Publishing.
- Wollenhaupt, N.C., R.P. Wolkowski, & M.K. Clayton. 1994. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *J. Prod. Agric.* 7:441-448.

Manejo de Nutrientes de Precisión en EE. UU.: Tendencias Actuales y Oportunidades Futuras

► ► **Philips, Steve^{1*}**

Oklahoma State University

✉ steve.phillips10@okstate.edu

RESUMEN EXPANDIDO

El manejo de nutrientes de precisión (PNM, por sus siglas en inglés) se ha vuelto una práctica central en la agricultura moderna de los Estados Unidos, particularmente en la optimización del uso eficiente de fertilizantes, la reducción del impacto ambiental y la sostenibilidad económica. Según análisis recientes, la adopción de tecnologías de precisión para la gestión de nutrientes está muy avanzada, especialmente en las explotaciones agrícolas a gran escala del cinturón maicero del Medio Oeste. Entre las tecnologías clave que facilitan el PNM se encuentran la aplicación variable (VRT), sensores remotos y proximales, mapeo de suelos y rendimientos, y sistemas integrados de apoyo a la toma de decisiones.

En esta región, la aplicación variable de fertilizantes mediante VRT está ampliamente adoptada. Datos del USDA indican que aproximadamente el 44 % del área sembrada con maíz y el 41 % del área de soja reciben fertilización con esta tecnología. La definición de zonas de manejo de nutrientes suele realizarse mediante muestreo en grilla (por ejemplo, a resolución de 1 ha) o por zonificación basada en conductividad eléctrica del suelo, altitud y datos históricos de rendimiento. Estas zonas permiten aplicaciones diferenciadas de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), generalmente implementadas por prestadores de servicios comerciales que utilizan mapas de prescripción desarrollados en plataformas GIS.

El manejo de N basado en sensores también ha evolucionado, especialmente en cultivos de trigo y maíz. Herramientas como GreenSeeker y Crop Circle permiten ajustar en tiempo real las dosis de N aplicadas según índices como NDVI. Estos sensores ópticos, montados en pulverizadoras de alto despeje o equipos de fertilización lateral, han demostrado mantener o incluso mejorar los rendimientos con reducciones del 15–30 % en el uso de nitrógeno, bajo ciertas condiciones. Aunque la adopción de esta tecnología sigue siendo baja, el uso de imágenes obtenidas por drones con el mismo principio de monitoreo del estado nutricional del dosel ha mostrado una tendencia creciente.

>. ADOPCIÓN DEL MUESTREO DE SUELO DE PRECISIÓN

En la última década, el muestreo de suelos por precisión ha experimentado un crecimiento notable. De acuerdo con la encuesta anual CropLife-Purdue sobre tecnología de agricultura de precisión, el porcentaje de distribuidores agrícolas que ofrecen muestreo en grilla o por zonas aumentó del 67 % en 2015 al 85 % en 2024. Esta tendencia refleja un cambio hacia una toma de decisiones basada en datos. Sin embargo, estos datos representan la oferta de servicios y no necesariamente su adopción a nivel de

campo, que puede variar según el tamaño del establecimiento, los recursos disponibles y la percepción del retorno económico.

Desafíos en la Predicción de la Respuesta a la Fertilización Fosfatada y Potásica

A pesar de los avances tecnológicos, predecir con precisión la respuesta del cultivo a la fertilización con P y K continúa siendo un desafío. Las recomendaciones basadas en análisis de suelo tradicionales presentan limitaciones en cuanto a su capacidad predictiva. Un estudio en soja bajo riego en Arkansas mostró que las interpretaciones del fósforo extraíble (STP) solo acertaron entre el 40 % y el 48 % de las veces en predecir respuesta a la fertilización con P, con los mayores errores en los niveles bajos y muy bajos de STP.

En un estudio regional en Missouri, se observó que las respuestas del maíz a la fertilización con P y K fueron más frecuentes en suelos con niveles bajos de nutrientes, pero la precisión de las recomendaciones disminuyó a medida que los niveles de análisis de suelo se acercaban o superaban los umbrales críticos. Este patrón indica que los métodos actuales de evaluación fisicoquímica de la fertilidad pueden no ser efectivos para predecir la respuesta en condiciones de suelo y ambiente diversas. Intentos de combinar métricas de salud del suelo con indicadores tradicionales de fertilidad no lograron mejorar la predicción de incrementos de rendimiento por fertilización.

Además, una encuesta nacional sobre prácticas de análisis de suelo reveló inconsistencias entre estados en protocolos de muestreo, métodos analíticos y recomendaciones de fertilización. En muchos casos, los datos de correlación y calibración de fósforo y potasio no se han actualizado en más de dos décadas, generando disparidades en las dosis recomendadas. Esta falta de armonización dificulta el trabajo de productores, asesores y científicos que operan en múltiples estados y pone de relieve la necesidad de una actualización coordinada y estandarización de las recomendaciones basadas en análisis de suelo.

>. PERSPECTIVAS FUTURAS

La integración de plataformas en la nube, datos meteorológicos en tiempo real, modelos de aprendizaje automático e inteligencia artificial promete mejorar las capacidades del manejo de nutrientes de precisión. No obstante, para superar los desafíos actuales será necesario refinar las metodologías de análisis de suelo y tejidos, actualizar las guías de recomendación de fertilización y fomentar colaboraciones interestatales que permitan el desarrollo de estrategias integrales acordes con las realidades agronómicas, económicas y ambientales contemporáneas.

Una mirada agronómica en el uso de biológicos para la nutrición de los cultivos

► ► Salvagiotti F. ^{1 2*}

¹ Grupo Manejo de Cultivos, Suelos y Agua – EEA Oliveros INTA – Santa Fe.
² CONICET.

✉ salvagiotti.fernando@inta.gob.ar

>. LA DEMANDA DE NUTRIENTES POR LOS CULTIVOS Y LA BRECHA NUTRICIONAL

La demanda de nutrientes de los cultivos está en función de la biomasa producida, del rendimiento de los cultivos y de la composición química de los granos. En la Tabla 1 se puede observar la demanda de N, P, K y S para soja, maíz y trigo. Esta demanda esta expresada en la cantidad de nutriente que el cultivo debe absorber para producir una tonelada de rendimiento (requerimiento de nutrientes, o su inversa la eficiencia en el uso del nutriente). Para cada cultivo y nutriente existe un rango de eficiencias. Si bien usualmente se utiliza una eficiencia promedio en el uso de los nutrientes, según las condiciones ambientales los cultivos pueden expresar la máxima producción con un determinado nivel de nutriente (eficiencia máxima) o por el contrario con ese nivel de nutrientes no alcanzar la producción deseada por efecto de algún tipo de stress (eficiencia mínima). En consecuencia, así como según las condiciones ambientales de un sitio existe una probabilidad de ocurrencia de rendimiento, también habrá una probabilidad de ocurrencia de eficiencias en el uso de los nutrientes que oscilará entre los máximos y mínimos tal como se describe en la Tabla 1.

Tabla 1 – Requerimiento máximo, mínimo y promedio de N, P, K y S para maíz, trigo y soja.

		Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Azufre
		Kg nutriente por tonelada de rendimiento			
Maíz *	Máxima	14	1.8	9	-
	Promedio	18	2.7	20	-
	Mínima	33	5.4	38	-
Trigo **	Máxima	17	2.6	16	-
	Promedio	24	3.6	26	-
	Mínima	39	6.0	45	-
Soja ***	Máxima	54	3.6	14	2.5
	Promedio	68	6.8	40	4.2
	Mínima	87	10.9	63	6.8

* Setiyono et al (2010); ** Pathak et al (2003), Liu et al (2006); *** Salvagiotti et al (2021).

Existen brechas de rendimiento en los principales cultivos de Argentina que pueden ser cerradas con prácticas de manejo (Aramburu Merlos et al, 2015). Parte de esta brecha esta explicada por el manejo nutricional de los cultivos. Esta brecha nutricional está determinada por la capacidad de los suelos de brindar los nutrientes necesarios, el potencial de producción de los cultivos en un ambiente determinado y el nivel de fertilización actual utilizado en cada lote. En el caso de las leguminosas, hay que sumar, para el caso del nitrógeno, el aporte de la fijación simbiótica. Existen otras fuentes de nutrientes para los cultivos como el aporte de N de relaciones asociativas (fijadores libres o endófitas) o potencialmente se ha sugerido el aporte de P o K a través del uso de microorganismos solubilizadores de P y K inorgánico u orgánico del suelo. Sin embargo, la magnitud del aporte de estas fuentes de nutrientes y su rol para el cierre de las brechas de rendimiento no ha sido abordado. **Es necesario una mirada desde la agronomía para conocer el impacto real de estas fuentes de nutrientes.**

>. PROMOCIÓN DEL CRECIMIENTO

En condiciones controladas se ha observado que diferentes bacterias pueden producir efectos que podrían favorecer el crecimiento de las plantas, comúnmente llamados por sus siglas en inglés como PGPR (*plant growth promoting rhizobacteria*) o el nombre más general para abarcar otros microorganismos (PGPM). Este efecto promotor puede ser directo o indirecto a través de diversos procesos como la fijación biológica de nitrógeno atmosférico, la síntesis de hormonas, sideróforos, la solubilización de fuentes poco solubles de fosfatos o potasio o por el biocontrol ya sea por antagonismo, parasitismo, o la supresión de organismos perjudiciales (Timofeeva et al, 2023).

Uno de los casos más conocidos entre los microorganismos que producen promoción del crecimiento vegetal es el de *Azospirillum* sp, habiendo sido más estudiado en cereales como trigo y maíz. En el caso de trigo, Diaz-Zorita y Fernandez- Canigia (2009) mostraron incrementos del 5% en el rendimiento por el efecto promotor de *Azospirillum argentinense* (Figura 1). Los efectos más destacados sobre el cultivo fueron sobre la implantación y crecimiento temprano, como por ejemplo la biomasa aérea y de raíces al momento del macollaje (Z2.3 a Z2.5), con incrementos del 9 y 11%, respectivamente respecto del tratamiento sin inocular. Estos autores han mostrado como la magnitud de la respuesta depende de diversos factores del manejo del sistema de los cultivos y de los sistemas de producción (labranzas, cultivos previos) o el manejo de la fertilización. En general, las mayores respuestas se han obtenido cuando los cultivos tenían condiciones para un mejor crecimiento.

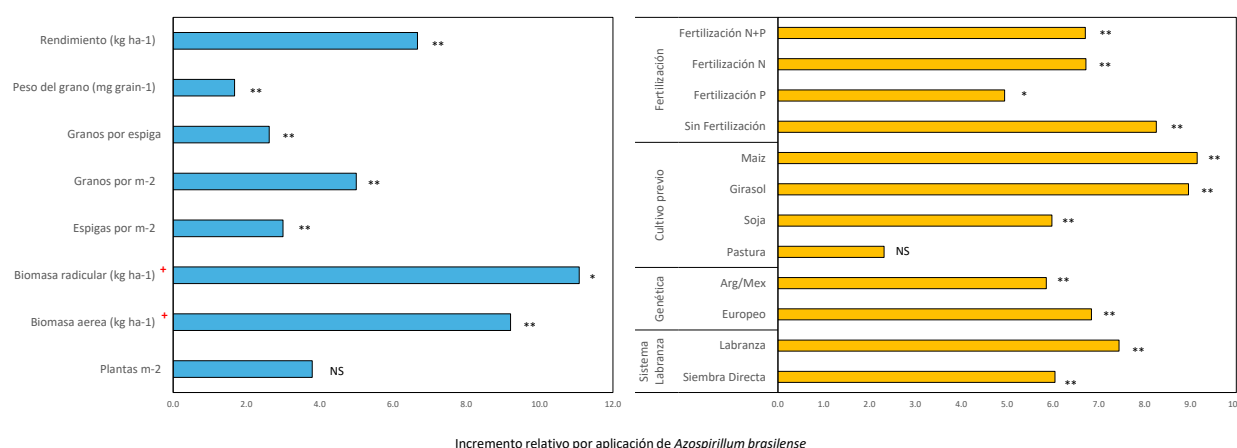


Figura 1 – Incremento relativo de distintas variables relacionadas con el crecimiento y la producción de trigo por la adición de *Azospirillum argentinense* en la región pampeana argentina. + Biomasa aérea y radicular en macollaje (Z 2.3-Z 2.5); NS (no significativo), * (P<0.10), ** (P<0.05) (Adaptado de Diaz- Zorita & Fernandez-Canigia, 2009)

>. FIJACIÓN SIMBIÓTICA Y NO SIMBIÓTICA DE NITRÓGENO

Las bacterias diazotróficas tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico. Estos microorganismos poseen el complejo enzimático de la nitrogenasa, que entre otras variantes, es una ferro-molibdo-proteína que permite romper el triple enlace de la molécula de N_2 . Estos organismos son tanto simbióticos como no simbióticos (también llamados de “vida libre”), autótrofos o heterótrofos (Tabla 2).

La magnitud del aporte de nitrógeno es mucho mayor cuando se trata del aporte simbiótico, en relación del aporte de los organismos asociativos. En el caso de los primeros, a escala global se ha estimado un aporte superior a los 100 kg N ha⁻¹ ya sea incluyendo cultivos de grano como pasturas leguminosas (Tabla 3). Este aporte es variable según la leguminosa y las condiciones edafoclimáticas de cada región y los sistemas predominantes. En general, el aporte de N a través de la fijación simbiótica es mayor en la medida que el crecimiento del cultivo hospedante sea mayor.

En el caso de la fijación no simbiótica de N, numerosas especies han sido identificadas (Tabla 2). A escala global se ha mostrado que el aporte de N es menor a los 10 kg ha⁻¹ (Herridge et al, 2008; Ladha et al, 2016) (Tabla 3).

Tabla 2 - Diazótrofos asociativos y simbióticos (con su hospedante) de importancia en agricultura (tomado de Ladha et al, 2022)

No simbióticos				Simbióticos			
Heterótrofos		Autótrofos		Heterótrofos		Autótrofos	
				Hospedante		Hospedante	
Aeróbicos	Azotobacter Azospirillum Azoarcus Beijerinckia Rhizobium	Cyanobacteria	Gloeocapsa Thichodesmium Nostoc Anabaena Calothrix	<i>Azorhizobium</i>	Sesbania	<i>Anabaena</i>	Azolla
				<i>Bradyrhizobium</i>	Maní, Soja, Frijol, Lupino		
				<i>Mesorhizobium</i>	Garbanzo, Astragalus		
				<i>Rhizobium</i>	Poroto, Arveja, Arveja, Vicia, Habas, Lupino, <i>Lathyrus</i> sp		
				<i>Sinorhizobium</i> (<i>Sinorhizobium meliloti</i>)	<i>Medicago</i> sp, alfalfa, Sesbania,		
Anaeróbicos Facultativos	Bacillus Clostridium Thiobacillus Aerobacter Erwinia	Bacterias fotosintéticas	Rhodospirillum Rhodospseudomonas Chromatium Chlorobium				
Anaeróbicos	Clostridium Sulfovibrio						

Tabla 3 - N fijado anualmente a escala global por organismos simbióticos y no simbióticos en distintos cultivos (Adaptado de Herridge et al, 2008)

Agente	Tipo relación	Cultivo/ Sistema	Tasa anual de aporte de N
			Kg N ha ⁻¹ año ⁻¹
Rizobio - Leguminosa	Simbiótica	Cultivos leguminosos anuales	115
Rizobio - Leguminosa	Simbiótica	Pasturas/ Legumbres para pastoreo	110-127
Azolla (microhelecho) en simbiosis con una Cianobacteria	No simbiótica	Arroz	33
Bacterias de vida libre, asociadas y endófitas	No simbiótica	Caña de azúcar	25
Bacterias de vida libre, asociadas y endófitas	No simbiótica	Otros cultivos no incluyendo leguminosas o arroz	<5
Bacterias de vida libre, asociadas y endófitas	No simbiótica	Sabanas tropicales utilizadas para pastoreo	< 10

En Argentina, en promedio la contribución de la fijación biológica de nitrógeno de las distintas leguminosas que se cultivan en el país oscila entre 40 y 60% del total absorbido por la planta. En términos absolutos el mayor aporte lo realiza alfalfa, con un promedio de 200 kg N por ha año proveniente de la fijación biológica seguido por soja (Tabla 4).

Tabla 4 - Nitrógeno absorbido total en biomasa aérea (Nt) y contribución de la Fijación Simbiótica (N-FBN) para diferentes cultivos leguminosos en Argentina. Entre paréntesis, el percentil 25 y 75 de la distribución de la información.

	FBN	N – FBN	N absorbido	Fuente
	(%)	kg N ha ⁻¹		
Soja	59 (46-71)	148 (98-197)	210 (170-268)	Collino et al, 2015
Arveja	64 (53-84)	51 (15-74)	84 (60-112)	Enrico et al, 2020
Vicia	61 (44-78)	89 (51-115)	151 (100-184)	Enrico et al, 2020
Alfalfa	53 (42-66)	872 (408-1396)	1645(772-2200) *	Racca et al, 2001
Maní	52 (43-64)	138 (119-188)	293 (258-315)	Palmero, 2023

* Promedio de pasturas de 4 años de duración

La inoculación de los cultivos en consecuencia cobra un rol fundamental para el manejo del nitrógeno cuando se incluyen leguminosas en una secuencia de cultivos y es el manejo de productos biológicos de mayor impacto. Este impacto será de mayor magnitud en la medida que la leguminosa en cuestión no sea cultivada frecuentemente. En la Figura 2 se observan mayores incrementos relativos cuando los años de cultivo de la leguminosa son menores. Díaz Zorita y Baliña (2004) informaron para maní repuestas a la inoculación del 7% cuando los cultivos de maní venían de una historia de inoculación en el lote y del 25%

cuando el cultivo se implantaba por primera vez. Haciendo la misma comparación, Peticari et al (2019) observaron incrementos del 8 y 50% por la inoculación en campos con y sin historia sojera, respectivamente. De todos modos, la interacción con el año y las condiciones de crecimiento del cultivo harán variar la magnitud de la respuesta.

Muchas veces no se observan diferencias en ambientes rotados con la misma leguminosa en la producción (de materia seca o de granos) pero si en variables asociadas a la nutrición nitrogenada del cultivo por la mayor eficiencia de las cepas incorporadas en los inoculantes. En consecuencia, es de vital importancia que el desarrollo de los inoculantes sea con las cepas específicas para cada cultivo, con alta eficiencia simbiótica y que se respeten las dosis de inoculante recomendada por el fabricante para asegurar la distribución homogénea de las bacterias en las semillas.

El manejo de la inoculación de las leguminosas no sólo se verá en el corto plazo (durante el ciclo del cultivo) sino sus efectos en los cultivos sucesores como doble cultivos. El efecto del mayor aporte de N de la vicia inoculada se vio reflejado en el cultivo de maíz de siembra tardía que fue sembrado sobre ella. No se observaron incrementos significativos en el rendimiento cuando el maíz se sembró sobre un cultivo de vicia inoculada (Figura 3), sin embargo, las mayores respuestas a la fertilización con N se observaron cuando vicia y arveja (que también fue evaluada en el experimento) no fueron inoculados, con incrementos entre el testigo y la dosis máxima de N que varió entre 2450 y 2691 kg ha⁻¹ (30 y 35%, en términos relativos) para vicia y arveja, respectivamente. Estos resultados muestran la relevancia del manejo del nitrógeno en el sistema de producción a través de la inoculación de las leguminosas invernales en suelos sin historia previa de vicia o arveja (Enrico et al, 2020).

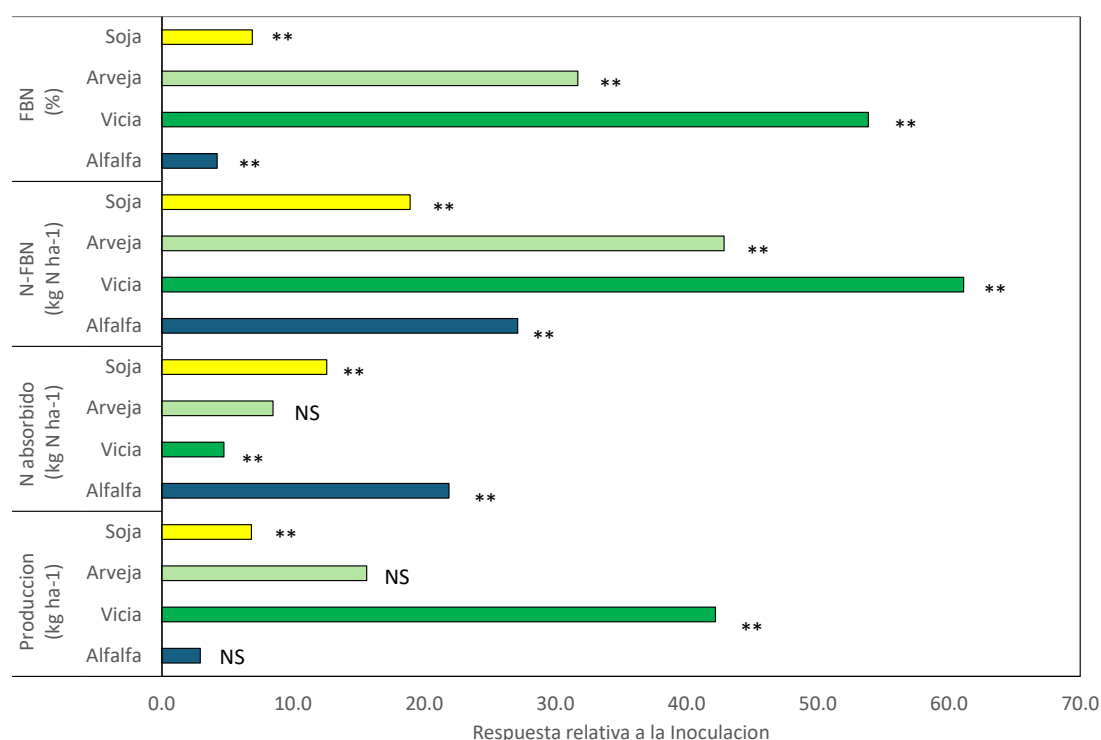


Figura 2 – Producción, N absorbido, N derivado de la fijación biológica de N y proporción derivada de esta fuente en respuesta a la inoculación en alfalfa, vicia, arveja y soja.

Soja: promedio de 9 ensayos en lotes con historia sojera (Piccinetti et al, 2011)

Vicia y Arveja: promedio de 2 ensayos en lotes sin historia con cultivo de vicia (Enrico et al, 2020)

Alfalfa: promedio de pasturas de tres años de duración en 2 sitios (Racca et al, 2013)



Figura 3 - Relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado aplicado y el rendimiento en maíz sembrado sobre dos antecesores (arveja y vicia) con y sin la aplicación de inoculantes en estos antecesores. Las líneas indican el ajuste cuadrático-plateau a los tratamientos en donde hubo efecto significativo de la fertilización nitrogenada.

>. SOLUBILIZACIÓN DE FOSFORO Y POTASIO

Se han identificado numerosas especies de bacterias (en mayor proporción), hongos y actinomicetes con la capacidad de solubilizar fuentes poco solubles de fosfatos del suelo. Estos microorganismos se han encontrado en la rizosfera de las plantas y la solubilización está asociada a la liberación de ácidos orgánicos que acidifican la zona de la rizosfera. Una bacteria se la identifica como solubilizadora de fósforo o potasio evaluándolo *in vitro* en pruebas de concepto sobre medios de cultivo específicos y distintas fuentes de P). En el caso de la evaluación de la solubilización de potasio se utiliza como fuente polvo de mica. Cuando se observan zonas más claras alrededor de las colonias de bacterias, estableciendo los índices de solubilización utilizados para comparar capacidades de solubilización entre microorganismos en los procesos de selección. También se utilizan métodos para determinar las tasas de solubilización dando una idea de las posibilidades de aporte.

Si bien numerosas bacterias y hongos han sido identificados con esta capacidad, no se han encontrado evidencias que muestren que haya un aporte neto desde las bacterias a la nutrición de las plantas. Es decir, los mecanismos de solubilización identificados *in-vitro* que permitirían satisfacer la demanda de estos nutrientes por parte de las bacterias, no las podemos trasladar directamente a la nutrición con P o K de las plantas a escala del cultivo debido a las complejas interacciones que ocurren en el sistema suelo-planta aunque se pueden utilizar variables indicadoras como el contenido de P en las estructuras vegetales (Raymond et al, 2021). Sería necesario en el futuro ver el rol en largo plazo de este tipo de organismos sobre la nutrición con P o K en las secuencias de cultivos.

>. CONCLUSIONES

Desde una perspectiva agronómica, en donde se busca hacer el manejo más sustentable de la producción de los cultivos y de los sistemas de producción, buscando cerrar brechas de producción, el manejo de la nutrición de los cultivos es altamente relevante. La incorporación de productos de origen biológico que con sus mecanismos microbianos complementen la nutrición de los cultivos mejorando las eficiencias de su uso, puede ser muy relevantes. Desde esta perspectiva la inoculación de leguminosas es la práctica de mayor impacto productiva y económica por la cantidad de nitrógeno que se puede incorporar a los sistemas a través de la fijación simbiótica. El aporte de la simbiosis fijadora de Nitrógeno será de mayor magnitud en la medida que haya mejores condiciones para la producción de biomasa que estarán ligadas a mayor absorción de N.

El aporte de nitrógeno de microorganismos asociativos tiene un rol relativamente menor. Sin embargo, el rol de estos microorganismos está relacionados a sus variados mecanismos PGPR que favorecen su crecimiento y tolerancia a diferentes factores bióticos y abióticos. En la mayoría de los casos la promoción del crecimiento está más relacionadas al conjunto de mecanismos microbianos que sólo a cada uno por separado. En este sentido hay que destacar que aún no hay evidencias que demuestren el efecto directo de la solubilización de P por el mecanismo individualizado de las bacterias y un aporte directo medible a la nutrición fosfatada del cultivo.

Finalmente, es importante destacar que las prácticas a escala de sistema de producción recomendadas para la intensificación sostenible de la producción o la agricultura regenerativa como la planificación de las rotaciones de los cultivos, incluyendo diversas especies y ocupando el suelo con raíces (y rizósferas donde se desarrollan los microorganismos) la mayor parte del año es la clave para mantener la dinámica funcional del microbioma del suelo.

>. REFERENCIAS

Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercáu, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184, 145-154.

Collino, D.J., Salvagiotti, F., Peticari, A., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W., 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392, 239-252.

Díaz-Zorita, M., Baliña, R., 2004. Respuesta de cultivos de maní a la inoculación con *Bradyrhizobium* sp. *Ciencia del Suelo*, 22(1), 7.

Díaz-Zorita, M., Fernández-Canigia, M.V., 2009. Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. *European Journal of Soil Biology* 45, 3-11.

Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., Salvagiotti, F., 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *European Journal of Agronomy* 115, 126016.

Herridge, D., Peoples, M., Boddey, R., 2008. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil* 311, 1-18.

Ladha, J.K., Peoples, M.B., Reddy, P.M., Biswas, J.C., Bennett, A., Jat, M.L., Krupnik, T.J., 2022. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research* 283, 108541.

Liu, M., Yu, Z., Liu, Y., Konijn, N., 2006. Fertilizer requirements for wheat and maize in China: the QUEFTS approach. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 245-258.

Palmero, F. 2023. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a los balances de N de maní en Argentina. Tesis Master Science. Escuela de graduados – FAUBA.

Pathak, H., Aggarwal, P.K., Roetter, R., Kalra, N., Bandyopadhyaya, S.K., Prasad, S., Van Keulen, H., 2003. Modelling the quantitative evaluation of soil nutrient supply, nutrient use efficiency, and fertilizer requirements of wheat in India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65, 105-113.

Perticari, A., Ventimiglia, L., Piccinetti, C. y Díaz-Zorita, M., 2019. Variabilidad regional y estacional de la inoculación de soja. *Actas MERCOSOJA* 2019.

Piccinetti, C.F., Enrico, J.M., Capurro, J., Murua, L.A., Martinez, L., Resch, J.F., Perticari, A., 2011. La inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* mejora la fijación biológica de N₂ y la producción del cultivo de soja en la región pampeana argentina. XXV Reunión Latinoamericana de Rizobiología, Uruguay.

Racca, R., Odorizzi, A., Arolfo, V., Balzarini, M., Basigalup, D., Brenzoni, E., Campillo, R., Cangiano, C., Collino, D., Correa, N., Dardanelli, J., De Luca, M., Gonzalez, N., Grassano, A., Labandera, C., Lagares, A., Perticari, A., Ronchi, A., Rosas, S., 2013. Contribución a una producción sostenible de alfalfa mediante el manejo de microorganismos rizosféricos en Argentina, Chile y Uruguay. Ediciones INTA, Buenos Aires

Racca, R., Collino, D., Dardanelli, J., Basigalup, D., Gonzalez, N., Brenzoni, E., Hein, N., Balzarini, M., 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a nutrición nitrogenada de la alfalfa en la región pampeana. Ediciones INTA, Buenos Aires

Raymond, N.S., Gomez-Muñoz, B., van der Bom, F.J.T., Nybroe, O., Jensen, L.S., Muller-Stover, D.S., Oberson, A., Richardson, A.E., 2021. Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. *New Phytologist* 229, 1268-1277.

Salvagiotti, F., Magnano, L., Ortez, O., Enrico, J., Barraco, M., Barbagelata, P., Condori, A., Di Mauro, G., Manlla, A., Rotundo, J., Garcia, F.O., Ferrari, M., Gudelj, V., Ciampitti, I., 2021. Estimating nitrogen, phosphorus, potassium, and sulfur uptake and requirement in soybean. *European Journal of Agronomy* 127, 126289.

Setiyono, T.D., Walters, D.T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A., 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research* 118, 158-168.

Timofeeva, A., Galyamova, M., Sedykh, S.E., 2023. Plant Growth-Promoting Soil Bacteria: Nitrogen Fixation, Phosphate Solubilization, Siderophore Production, and Other Biological Activities. *Plants (MDPI)* 12.

De la teoría a la práctica: Fertilizantes de Eficiencia Mejorada

► ► Reussi Calvo NI^{1,2*} & Iglesias MP¹

¹Facultad de Ciencias Agrarias (UNMDP), ²CONICET.

✉ nahuelreussicalvo@mdp.edu.ar

>. ENTENDIENDO EL CONTEXTO

El manejo responsable de los nutrientes en los sistemas de producción requiere de la consideración de los 4 Requisitos: fuente, dosis, forma y momento de aplicación correctos. Estos 4 Requisitos se basan en principios científicos y en evidencia experimental técnica y científica que respalda la toma de decisión (IPNI, 2013).

Para ser eficientes a la hora de aplicar un fertilizante, en primer término, es necesario determinar cuáles son los nutrientes que requiere el sistema o el cultivo, es decir, definir la fuente correcta. Por lo tanto, una vez definida la necesidad de aplicación de un determinado nutriente según el diagnóstico de fertilidad, vamos a evaluar la dosis, la forma y el momento de aplicación que mejoren la sincronización de la oferta con la demanda del cultivo y en definitiva hagan más eficiente la intervención (Correndo et al., 2022; Bonelli et al., 2017; Maltese et al., 2024). Debemos tener en cuenta que los 4 Requisitos interactúan fuertemente entre sí, es decir, que la búsqueda de la mayor eficiencia pasa por determinar simultáneamente la fuente, la dosis, la forma y el momento óptimos para cada sistema y/o cultivo en cada lote o ambiente (IPNI, 2013).

Al considerar la fuente correcta para un determinado nutriente, se dispone de productos minerales y orgánicos bajo distintas formas que ofrecen alternativas en cuanto a forma y momento y afectan la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados. Según la organización AAFPCO (2009), los fertilizantes de eficiencia mejorada (FEM, **Figura 1 y 2**) constituyen un grupo de productos con *“características que permiten una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas y reducen el potencial de pérdidas de nutrientes al medio ambiente en comparación con un producto de referencia apropiado”*.

Los FEM más citados para nitrógeno se pueden clasificar como:

- Liberación lenta o controlada: un fertilizante que contiene formas de nutrientes que demoran su disponibilidad para la planta significativamente más que un fertilizante de referencia de rápida disponibilidad, a través de distintos mecanismos: coberturas semipermeables (p.e., urea recubierta de polímeros o azufre elemental), oclusión, proteínas u otras formas químicas (p.e., urea-metileno).
- Estabilizados: un fertilizante al cual se le agregó un estabilizador, que es una sustancia que extiende la permanencia en el tiempo del nutriente, por ejemplo, un fertilizante nitrogenado (urea o amonio).

- Inhibidor de la nitrificación: sustancia que inhibe la oxidación biológica de amonio a nitrato. Ejemplos: nitrapyrin, DMPP, DCD.
- Inhibidor de la ureasa: sustancia que inhibe la acción hidrolítica de la enzima ureasa sobre la urea. Ejemplos: NBTP, NBTP+NPPT.

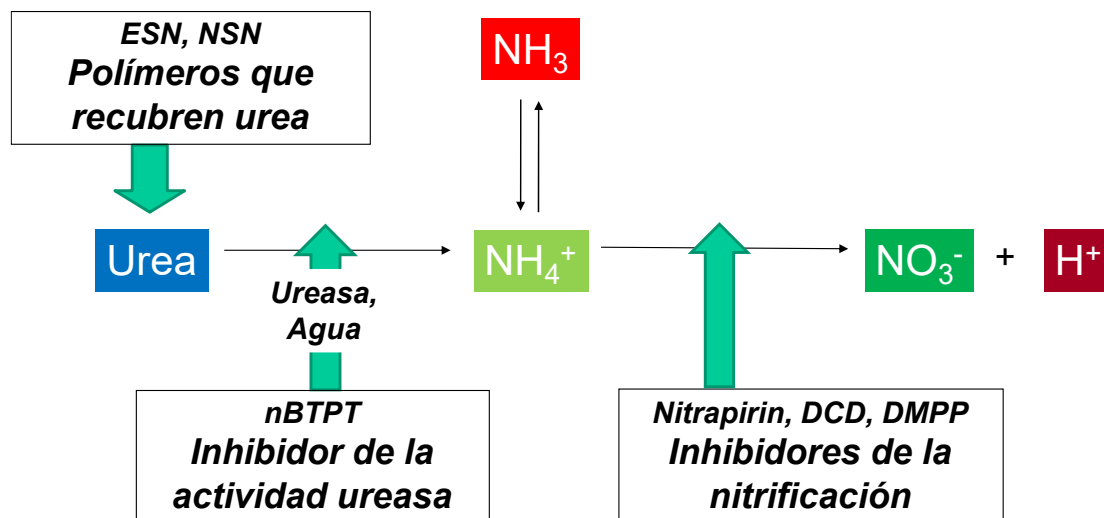


Figura 1. Ejemplos de fertilizantes de liberación lenta o controlada y fertilizantes estabilizados en aplicaciones de urea. Fuente: F. García (Comun. Personal).

Para el caso del fósforo (P), se han propuesto en la literatura diferentes tecnologías con el objetivo de mejorar la eficiencia de uso del P, la rentabilidad y reducir el impacto en el ambiente (Weeks y Hettiarachchi, 2019; Guelfi et al., 2022). Algunas fuentes alternativas incluyen:

- Fertilizantes con inhibidores de la fijación: fertilizantes con aditivos para reducir las reacciones de precipitación y adsorción de P. Pueden clasificarse como modificadores de pH, secuestradores de cationes o bloqueadores.
- Fertilizantes fosfatados sinérgicos: fertilizantes fosfatados convencionales con adición de otros nutrientes, microorganismos, nanopartículas o bioestimulantes.
- Fertilizantes modificados químicamente: fuentes convencionales de P con solubilidad y/o forma química modificadas en el proceso de producción mediante reacciones físicas, químicas o físico-químicas que modifican la interacción del P con otros compuestos químicos.
- Fertilizantes de liberación controlada: fertilizantes convencionales con recubrimiento que sirven como barrera física y controlan el flujo por difusión.
- Mezclas y fertilizantes multifuncionales: mezcla física de fertilizantes fosfatados convencionales en gránulos y aquellos que tienen algún tipo de tecnología, como los indicados anteriormente.

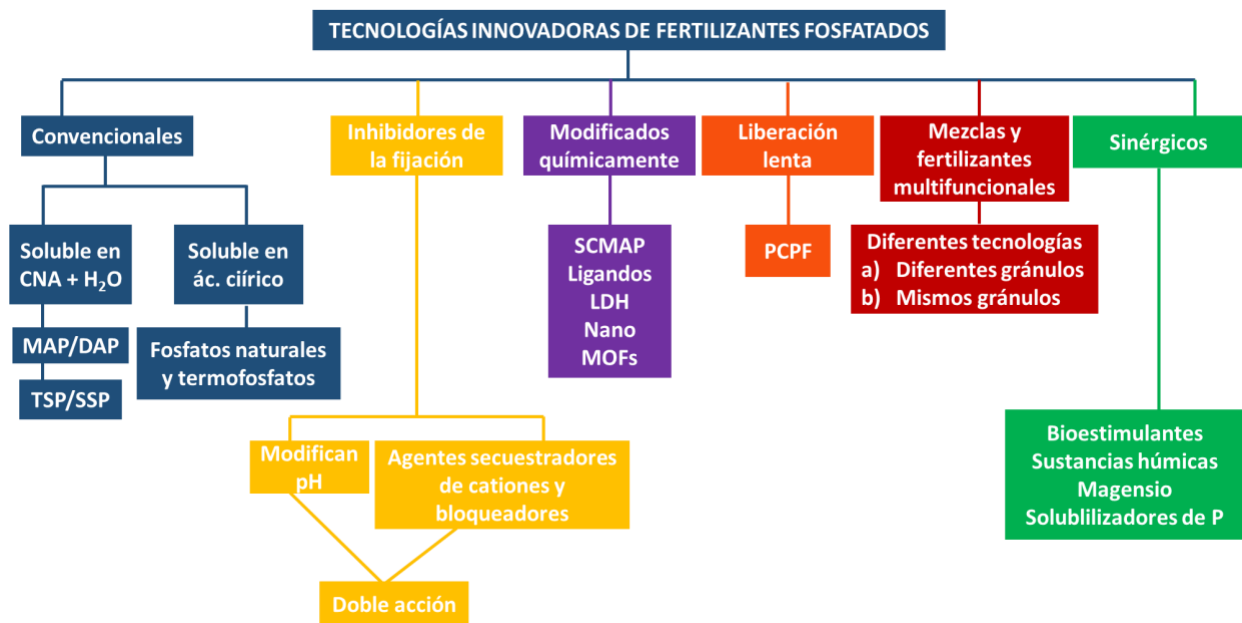


Figura 2. Clasificación de fertilizantes fosfatados en función del tipo de tecnología (Guelfi et al., 2022). Abreviaciones: CNA + H₂O: citrato de amonio neutro + agua; MAP: fosfato monoamónico; DAP: fosfato diamónico; TSP: superfosfato triple; SSP: superfosfato simple; SCMAP: MAP recubierto con azufre (S⁰); LDH: cobertura doble de hidróxidos; Nano: nanopartículas; MOFs: estructuras metal-orgánicas; PCPF: fosfatos cubiertos con polímeros.

Aunque no se dispone de datos precisos sobre el porcentaje global de uso de FEM en cultivos extensivos, se estima que su adopción es relativamente baja en comparación con los fertilizantes convencionales. Factores como el costo más elevado y la falta de conocimiento sobre sus beneficios contribuyen a esta limitada implementación (Reetz, 2016). En Argentina, no existe una cifra oficial unificada, pero diversas fuentes y estudios indican que la adopción de FEM en Argentina es aun relativamente baja, oscilando en torno al 5–10% del total de fertilizantes nitrogenados aplicados en cultivos extensivos. Esta tasa puede variar según la región y el tipo de cultivo, siendo más alta en áreas donde se han implementado programas de manejo sustentable o en cultivos de alto nivel de fertilización como el maíz y el trigo.

>. FERTILIZANTES DE EFICIENCIA MEJORADA: UNA MIRADA GLOBAL

A nivel global, existen varias revisiones y trabajos en los últimos años referidas al efecto de los FEM para N sobre las emisiones de óxido nitroso (N₂O), las pérdidas por volatilización, lavado, rendimiento de los cultivos y/o calidad de los productos de cosecha (Thapa et al., 2016; Silva et al., 2016; Pan et al., 2016). A modo de ejemplo, la revisión realizada por Thapa et al. (2016) a partir de 43 experimentos muestra que el empleo de fertilizantes de liberación lenta o estabilizadores fueron efectivos para reducir las emisiones de N₂O (hasta 38%) cuando se compararon con fertilizantes tradicionales (**Figura 3**). Además, estos autores, determinaron leves mejoras en el rendimiento de los cultivos (+7%) por el empleo de fertilizantes con doble inhibidor (ureasa y nitrificación). Sin embargo, observaron que la efectividad de los FEM varía según las condiciones del sitio y el manejo (e.g. pH, textura, forma de aplicación del fertilizante, entre otros). Similares resultados fueron reportados por Pan et al. (2016) quienes determinaron reducciones en las pérdidas por volatilización por el empleo de inhibidores de la ureasa y fertilizantes de liberación lenta (54 y 68%, respectivamente), mientras que la aplicación de inhibidores de la nitrificación las incrementó

en un 38%. A su vez, Silva et al. (2016) determinaron cambios en la efectividad de los inhibidores de la actividad ureásica según el pH del suelo. En cuanto a las pérdidas por lavado, son escasos los estudios que evalúan el efecto de los FEM sobre dichas pérdidas. No obstante, el empleo de inhibidores de la nitrificación podría reducir el lavado de nitrato en un 50% respecto a la urea según las revisiones realizadas por Qiao et al. (2015) y Yang et al. (2016).

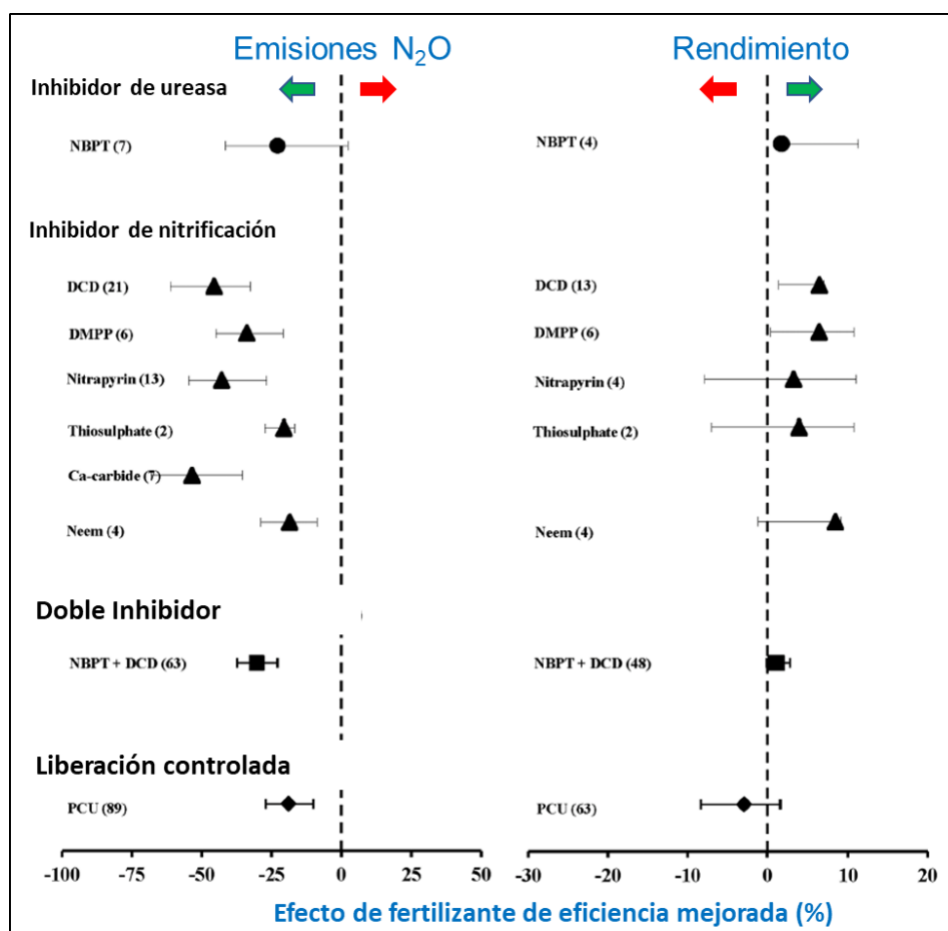


Figura 3. Efecto de diferentes fertilizantes de liberación lenta o controlada y fertilizantes estabilizados en aplicaciones de nitrógeno sobre las emisiones de óxido nitroso y el rendimiento de maíz y trigo. Fuente: Thapa et al. (2016).

Para el caso del P, si bien las revisiones sobre FEM son menos frecuentes que para el caso de N, los principales resultados muestran que al igual que para N las respuestas son sitio específicas. A modo de ejemplo, Hopkins et al. (2018) reportaron, en base a una revisión de 503 experimentos de campo, que la aplicación de un copolímero con el fertilizante de base aumentó en general un 2,1% el rendimiento mientras que el incremento fue de un 4,6% cuando solo se consideraron los sitios con deficiencias de P (n=116), lo que destaca la importancia de evaluar los FEM en ambientes deficientes. Además, Dunn y Stevens (2008) observaron un aumento del 5% en el rendimiento del arroz mediante el recubrimiento de superfosfato triple con un polímero en sitios deficientes de P. Sin embargo, Pierzynski y Hettiarachchi (2018) determinaron que el uso de un aditivo, como el copolímero de ácido maleico-itacónico, no influyó en la movilidad del P en tres suelos ácidos (Oxisol, Ultisol y Andisol). El aditivo no afectó la labilidad en el Oxisol ni en el Andisol, pero si la aumentó en el Ultisol. Para suelos calcáreos, Lombi et al. (2004) reportaron una mayor difusión y disponibilidad de P para fuentes fosfatadas líquidas respecto a los

granulados, debido a una menor precipitación. En síntesis, dentro de un contexto amplio de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia de la fertilización fosfatada, los FEM son una de las posibles alternativas a considerar. La eficiencia de estos fertilizantes puede potenciarse si se combinan con estrategias tan básicas como el muestreo y análisis de suelos o bien más avanzadas, como el sistema de siembra directa y la agricultura de precisión.

>. PERSPECTIVAS LOCALES SOBRE FERTILIZANTES DE EFICIENCIA MEJORADA PARA NITRÓGENO

En la actualidad, en Argentina, se ha estimado una brecha de rendimiento, definida como la proporción entre los rendimientos obtenidos con las prácticas agrícolas que se utilizan en cada lote con la tecnología del productor y los rendimientos máximos alcanzables, en alrededor del 40% (Aramburu Merlos et al., 2015). El N es el principal nutriente responsable de dicha brecha en maíz, por lo tanto, algunas estimaciones indicarían que es necesario incrementar en un 50% el aporte actual de N al cultivo con el objetivo de cerrar dichas brechas. En este contexto, el empleo de FEM sería una estrategia para mejorar la eficiencia de uso del N y reducir el potencial impacto ambiental de la fertilización. En Argentina, los inhibidores de ureasa han sido los más estudiados. Una revisión reciente de 21 ensayos en maíz realizada por Toribio et al. (2023) muestra que el uso del inhibidor redujo en 73% las pérdidas por volatilización (**Figura 4**), y aumentó un 5% y 6% el rendimiento y la eficiencia de uso de nitrógeno, respectivamente.

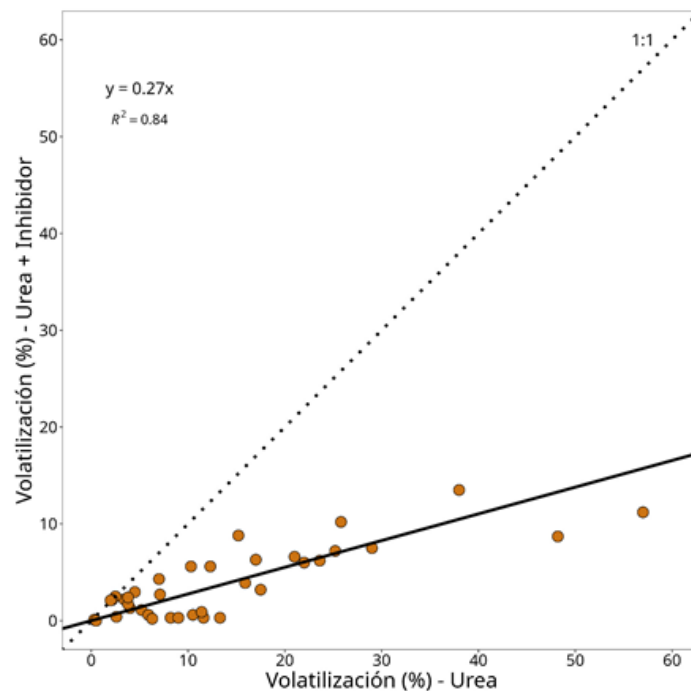


Figura 4. Volatilización de amoníaco (NH_3) a partir de aplicaciones superficiales de urea con inhibidor de hidrólisis de urea versus volatilización de amoníaco (NH_3) a partir de aplicaciones superficiales de urea sin inhibidor en 21 ensayos de maíz en Argentina. Fuente: Toribio et al. (2023). La línea punteada 1:1 indica pérdidas de volatilización similares con y sin inhibidor.

En los últimos años, se ha determinado que los híbridos modernos de maíz, en ambientes sin limitaciones hídricas, pueden absorber hasta el 40% del N acumulado a madurez fisiológica durante la etapa post-floración (Maltese et al., 2024). Por lo tanto, esto permitiría aplicar parte del N al inicio y el resto en etapas avanzadas del cultivo con el objetivo de sincronizar la oferta con la demanda del cultivo. Trabajos recientes se han enfocado en integrar el efecto de tecnologías de insumos (i.e. inhibidores de la nitrificación y actividad ureasa) y de procesos (i.e. fraccionamiento de la dosis de N) sobre las pérdidas gaseosas y el rendimiento del cultivo de maíz. Por lo tanto, se ha calculado el cambio en la magnitud de dichas pérdidas y en la productividad del cultivo al incorporar diferentes prácticas de manejo respecto al manejo que realiza el productor (aplicación completa de N en V₄ bajo la forma de urea en seco).

La aplicación de riego complementario prácticamente no modificó las pérdidas por volatilización, aunque si incrementó la emisión de N₂O (520%) ($p > 0,05$) y el rendimiento de maíz (44%) (**Figura 5**). En cuanto al efecto de las tecnologías de procesos, el fraccionamiento de la dosis de N redujo en un 33% la volatilización, mientras que incrementó la emisión de N₂O en un 475% ($p > 0,05$) y no modificó el rendimiento del cultivo. Por su parte, solo el empleo del inhibidor de la actividad ureásica redujo las pérdidas por volatilización (-62%) (**Figura 5a**). En cambio, para la emisión de N₂O, se observaron reducciones del 58% para el inhibidor de la nitrificación y aumentos del 324% para el inhibidor de la ureasa ($p > 0,05$) (**Figura 5b**). Por último, se observó como tendencia un incremento del 11% en el rendimiento solo al aplicar el inhibidor de la nitrificación ($p > 0,05$) (**Figura 5c**). Considerando la combinación de prácticas de manejo (riego, fraccionamiento de N e inhibidor de la ureasa), se lograron reducciones del 84% en las pérdidas por volatilización e incrementos del 41% en el rendimiento. Es importante destacar que el cambio en la magnitud de rendimiento debido a la aplicación de riego siempre fue positivo, a diferencia del fraccionamiento y el empleo de fuentes alternativas que presentaron algunos valores negativos respecto al manejo del productor. Estos resultados resaltan el potencial de seleccionar la mejor combinación de estrategias e insumos con el objetivo de reducir las pérdidas gaseosas e incrementar el rendimiento del cultivo.

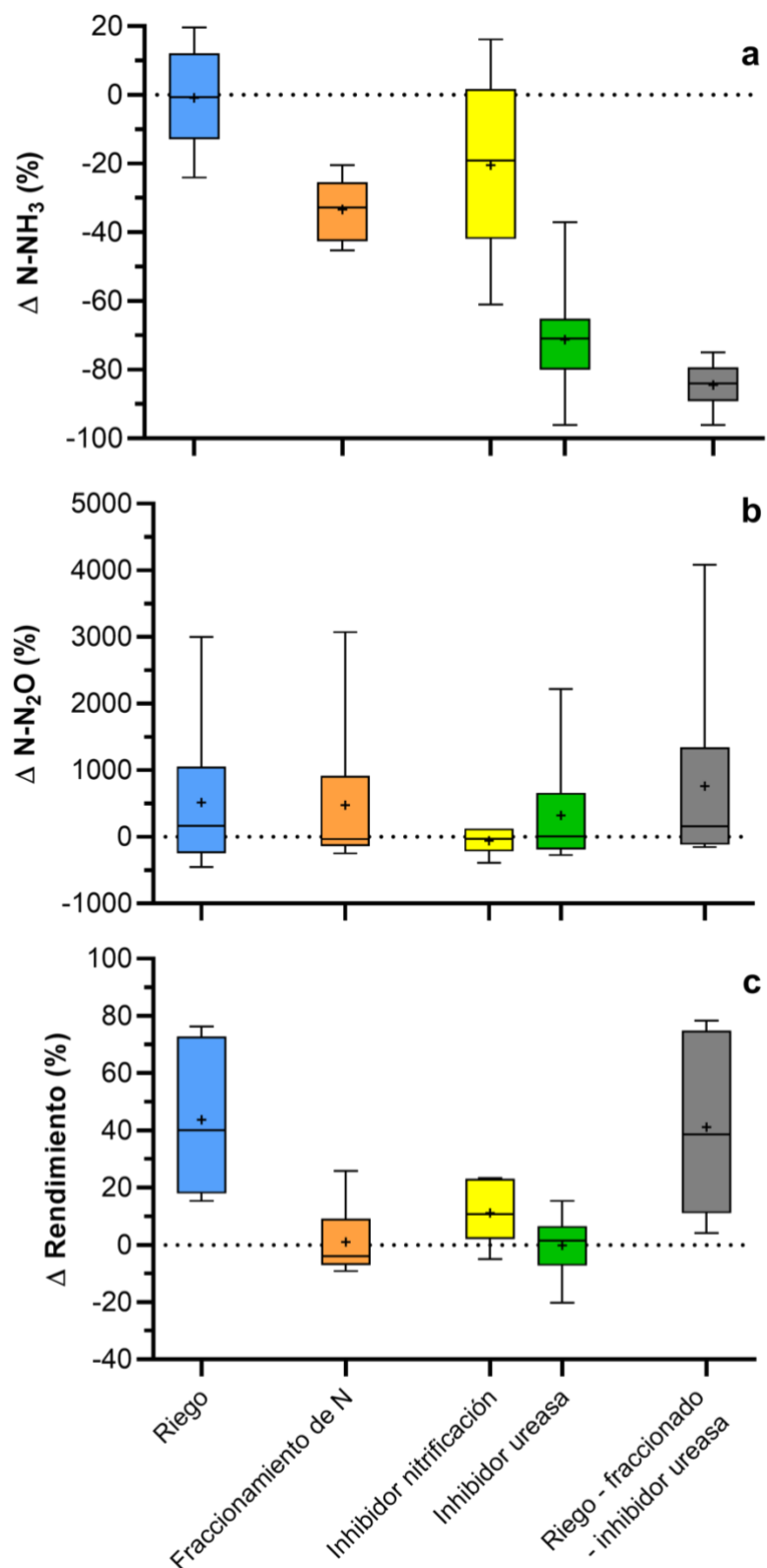


Figura 5. Cambio en las pérdidas por volatilización de NH₃ (a), en la emisión de N₂O (%) (b) y en el rendimiento (c) respecto a una situación de referencia, para cada uno de los factores evaluados (riego, fraccionamiento de la dosis de N y fuente de N). La línea punteada indica el tratamiento de referencia (Urea aplicada en V₄ en condiciones de secano), siendo el valor de 45,8 kg ha⁻¹, 69,4 g ha⁻¹ y 11,8 t ha⁻¹ para volatilización, emisión de N₂O y rendimiento, respectivamente. Fraccionado: 60% de la dosis de N (120 kg N ha⁻¹) en V₄ y 40% (80 kg N ha⁻¹) en R₁. Fuente: Iglesias et al. (2025).

>. MÁS ALLÁ DEL CULTIVO

Los crecientes efectos negativos del cambio climático a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) requiere de medidas de mitigación inmediatas (IPCC, 2018). Al presente, Argentina ha presentado sus inventarios de GEI basados en factores de emisión (FE) por defecto propuestos por las directrices metodológicas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), con la metodología más simple (Tier 1). Algunos trabajos como el de Said et al. (2023) indican que las emisiones de GEI y, por ende, la huella de carbono (C) estarían siendo sobreestimadas según las estimaciones realizadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC).

Experiencias realizadas en las últimas dos campañas en el sudeste bonaerense han determinado que la huella de C calculada a partir de FE locales resultó un ~50% menor respecto a la calculada con los FE propuestos por el IPCC (Iglesias et al., 2025) (**Figura 6**). Esta tendencia se observó tanto para el manejo tradicional (aplicación de N en V₄ en seco) como para el manejo eficiente de N (aplicación de N fraccionada, empleo de inhibidores y riego). No obstante, al combinar tecnologías de procesos y de insumos, como la incorporación de riego complementario, el fraccionamiento de la dosis de N y el empleo del inhibidor de la ureasa, se obtuvo una huella de C un 54% menor a la estimada por el IPCC. Estos resultados demuestran que es posible reducir el impacto ambiental mediante un manejo más eficiente de N y confirman la evidencia de que el IPCC sobreestimaría las emisiones de GEI para Argentina (Said et al., 2023).

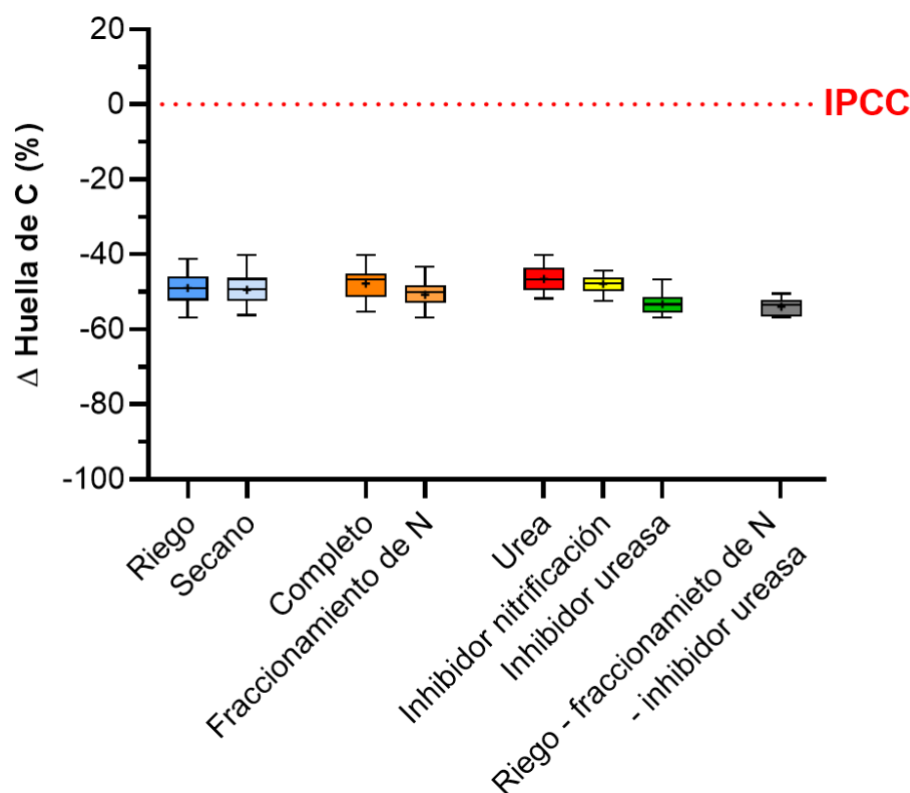


Figura 6. Cambio en la huella de carbono respecto a una situación de referencia, para cada uno de los factores evaluados (riego, fraccionamiento de la dosis de N y fuente de N). La línea punteada indica la huella de carbono calculada con los factores de emisión propuestos por el IPCC (2716 kg CO₂-eq ha⁻¹). Fraccionado: 60% de la dosis de N (120 kg N ha⁻¹) en V₄ y 40% (80 kg N ha⁻¹) en R₁. Completo: 100% de la dosis en V₄. Fuente: Iglesias et al. (2025).

>. SÍNTESIS FINAL

Los fertilizantes de eficiencia mejorada podrían ser una alternativa a los fertilizantes tradicionales con el objetivo de maximizar el rendimiento y minimizar el potencial impacto ambiental negativo de la práctica de fertilización. No obstante, debido a su respuesta “sitio específica” requiere de una correcta evaluación y diagnóstico previo a su aplicación. El mercado actual en Argentina ofrece para nitrógeno distintos fertilizantes de eficiencia mejorada, principalmente inhibidores de ureasa y de nitrificación, así como también algunas alternativas de fertilizantes liberación lenta. Si bien, para el caso de fósforo están menos difundidos existen fertilizantes que presentan en su formulación polímeros, bioestimulantes o inhibidores de la fijación. Estas tecnologías se suman a los biofertilizantes, reciclados y fuentes orgánicas a la hora de decidir fuentes de nutrientes y alternativas de manejo. La integración de tecnologías de insumos y de procesos debería ser considerada para contribuir a alcanzar los objetivos de sustentabilidad ecológica, económica y social de nuestros sistemas de producción.

>. REFERENCIAS

- Aramburu Merlos, F.; Monzon, J. P.; Mercau, J. L.; Taboada, M.; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Fields Crops Research*. 184: 145-154. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.001.
- Bonelli, L. E.; Sainz Rozas, H.; Echeverría, H. E.; Barbieri, P. A. 2017. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo*. 36(1): 88-98.
- Correndo, A.A.; F.H. Gutiérrez-Boem; F.O. García; C. Alvarez; C. Álvarez; A. Angeli; P. Barbieri; M. Barraco; A. Berardo; M. Boxler; P. Calviño; J.E. Capurro; H. Carta; O. Caviglia; I.A. Ciampitti; M. Díaz-Zorita; S. Díaz-Valdéz; H.E. Echeverría; G. Espósito; M. Ferrari; G.N. Ferraris; S. Gambaudo; V. Gudelj; J.P. Loeleu; R.J.M. Melchiori; J. Molinow; J.M. Orcellet; A. Pagani; J.M. Pautasso; N.I. Reussi Calvo; M. Redel; S. Rillo; H. Rimski-Korsakov; H.R. Sainz-Rozas; M. Saks; M.G. Tellería; L. Ventimiglia; J.L. Zorzín; Ma.M. Zubillaga; F. Salvagiotti. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research* <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>.
- Dunn, D.J., and G. Stevens. 2008. Response of rice yields to phosphorus fertilizer rates and polymer coating. www.plantmanagementnetwork.org/cm/. *Crop Manage*. 7. doi:10.1094/CM-2008-0610-01-RS
- Guelfi, D.; Nunes, A. P. P.; Sarkis, L. F.; Oliveira, D. P. (2022). Innovative phosphate fertilizer technologies to improve phosphorus use efficiency in agriculture. *Sustainability*, 14(21), 14266.
- Hopkins, B. G., Schmitt, M. A., & Osher, L. J. (2018). AVAIL Phosphorus Fertilizer Enhancer: Meta-Analysis of 503 Field Evaluations. *Agronomy Journal*, 110(4), 1131-1144.
- Iglesias, P.; Wyngaard, N.; Sainz Rozas, H.; Lewczuk, N.; Toribio, M.; García, F.; Reussi Calvo, N. 2025. Gestión del nitrógeno en maíz: balance entre productividad y sostenibilidad. Simposio Fertilidad 2025.
- IPCC. (2018) Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R.

- Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)).
- IPNI. 2013. 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de la nutrición de plantas. T. W. Bruulsema, Paul E. Fixen y Gavin D. Sulewski (ed.). Traducción al español. IPNI. Acassuso, Buenos Argentina. ISBN 978-987-24977-5-0.
- Lombi, E.; M.J. McLaughlin; C. Johnston; R.D. Armstrong and R.E. Holloway. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:682-689.
- Maltese, N. E.; Carciochi, W. D.; Caviglia, O. P.; Sainz Rozas, H. R.; García, M.; Lapaz, A. O.; Ciampitti, I. A.; Reussi Calvo, N.I. 2024. Assessing the effect of split and additional late N fertilisation on N economy of maize. *Field Crops Research*, 308 (March), 109279. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109279>
- Pan, B.; Lam, S. K.; Mosier, A.; Luo, Y.; Chen, D. 2016. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 283-289.
- Pierzynski, J. and G.M. Hettiarachchi. 2018. Reactions of phosphorus fertilizers with and without a fertilizer enhancer in three acidic soils with high phosphorus-fixing capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 82:1124-1139.
- Qiao, C.; Liu, L.; Hu, S.; Compton, J. E.; Greaver, T. L.; Li, Q. 2015. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input. *Global change biology*, 21, 1249-1257.
- Reetz, H. 2016. Fertilizers and their efficient use. International Fertilizer Industry Association (IFA). 114 p
- Said, A.; Posse, G.; Vangeli, S.; Popper, A. 2023. ¿Podemos mejorar las estimaciones de las emisiones de N₂O en Argentina? *Revista Ciencia del Suelo*, 41(1), 99-115.
- Toribio, M.; Iglesias, M. P.; Correndo, A.; Wyngaard, N.; Reussi Calvo, N. 2023. Factores determinantes de la volatilización de amoníaco y su efecto sobre el rendimiento de maíz. *Ciencia del Suelo*, 41 (2): 193-205. ISSN 1850-2067.
- Silva, A. G. B.; Sequeira, C. H.; Sermarini, R. A.; Otto, R. 2017. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. *Agronomy Journal*. 109: 1-13. DOI:10.2134/agronj2016.04.0200.
- Thapa, R.; Chatterjee, A.; Awale, R.; McGranahan, D. A.; Daigh, A. 2016. Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: a meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*. 80(5): 1121–1134. DOI:10.2136/sssaj2016.06.0179.
- Weeks, 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.
- Yang, M., Fang, Y., Sun, D., & Shi, Y. 2016. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. *Scientific reports*, 6(1), 22075.

¿Cómo aprovechar los beneficios de los bioestimulantes vegetales?

► ► Du Jardin, P¹*

¹ Laboratorio de Biología Vegetal, Gembloux Agro-Bio Tech, Universidad de Lieja, Bélgica

✉ patrick.dujardin@uliege.be

RESUMEN EXPANDIDO

Los bioestimulantes vegetales han sido reconocidos como una nueva categoría regulatoria de productos fertilizantes en diferentes partes del mundo, pero sus propiedades y usos aún deben aclararse. Una de las principales razones es que su definición se basa en afirmaciones de efectos agrícolas, que son una mayor eficiencia en el uso de nutrientes, una mayor tolerancia al estrés abiótico, una mayor calidad del producto y una mayor disponibilidad de nutrientes del suelo, según el nuevo reglamento (UE) 2019/1009, pero aún no está claro cómo se justifican estas afirmaciones en la práctica, lo que alimenta el escepticismo entre los productores. El enfoque de la UE consiste en definir normas armonizadas que se basen en definiciones acordadas, criterios de calidad y protocolos para generar datos sobre la eficacia de los productos. La conformidad del paquete de datos proporcionado por las empresas con las normas adoptadas se considerará suficiente para validar las declaraciones, como lo indica el "mercado CE" de los productos. En Estados Unidos, un programa de autocertificación promovido por la industria de los bioestimulantes tiene como objetivo basar la confianza de los agricultores en protocolos validados para las pruebas de eficacia.

Cualesquiera que sean los esfuerzos regulatorios y las iniciativas de la industria, la confianza en los productos dependerá del conocimiento de los mecanismos de bioestimulación, lo que permitirá un buen asesoramiento en los usos de los productos. Aunque en los últimos veinte años se han publicado muchos artículos científicos sobre bioestimulantes en revistas revisadas por pares, se pueden identificar varios cuellos de botella en la comprensión de la bioestimulación. Por ejemplo, muchos artículos utilizan sustancias individuales (que pueden ser multicomponente), mientras que la mayoría de los productos comercializados combinan varias sustancias bioestimulantes, a veces añadidas a micronutrientes, lo que dificulta la asignación de los efectos observados a constituyentes individuales o a interacciones específicas entre constituyentes. Además, los bioestimulantes tienen como objetivo interactuar con los procesos vitales de las plantas, que responden a muchos factores ambientales y también dependen de la composición genética de la variedad. Además, cualquier planta se considera ahora como un "superorganismo", u holobionte, que asocia plantas y microorganismos, y muchos bioestimulantes actuarán a través de estas complejas asociaciones.

También sostengo que la adopción de bioestimulantes no solo depende de la eficacia de los productos, sino también de cómo el productor comprenderá su potencial valor añadido en el contexto de los muchos retos a los que se enfrenta la agricultura. En este sentido, los bioestimulantes parecen ofrecer una oportunidad única para tender un puente entre la nutrición y la salud de las plantas, haciendo hincapié en la necesidad de ampliar el "cuidado de las plantas" al fortalecimiento de la capacidad de las plantas para resistir entornos adversos y hacer frente a la escasez de nutrientes y recursos hídricos, que son todos ellos desafíos planteados por el cambio climático.

Con respecto a este último punto, sostengo que la salud de las plantas debe definirse, no negativamente (como hoy por el corpus regulador) por la "ausencia de enfermedades y trastornos fisiológicos", sino positivamente como la "capacidad de las plantas para alcanzar el crecimiento y desarrollo al máximo de su potencial genético". Si se definen de esta manera, debe considerarse que los bioestimulantes vegetales contribuyen directamente a la salud de las plantas. En consecuencia, la nutrición de las plantas también debe revisarse teniendo en cuenta la capacidad de los productores para proporcionar a las plantas sustancias y microorganismos que les ayuden a alcanzar lo mejor de su potencial genético en entornos subóptimos y estresantes. El 'cuidado de las plantas' es más que la 'cura de las plantas' y los productos bioestimulantes parecen cruzar los caminos de la nutrición y la salud, abriendo nuevas oportunidades hacia una agricultura sostenible.

Fertilización de recursos forrajeros en la ganadería argentina 2025

► ► Marino, M.A.¹, Ciarlo, E.²

Unidad Integrada Balcarce (FCA-UNMDP, EEA INTA Balcarce). ²Fertilizar

✉ marino.alej@gmail.com

>. INTRODUCCIÓN

La actividad ganadera tiene un rol central en la seguridad alimentaria, economía y sustentabilidad mundial. Con un sostenido aumento en la demanda de alimentos de origen animal, los mercados demandan productos con certificación de procesos, trazabilidad e información de su producción, condición de bienestar animal y del impacto medioambiental de los sistemas productivos. Por esto, el desafío de la ganadería nacional es aumentar la producción considerando la sostenibilidad económica, social y ambiental (Plan Ganar, 2022).

En Argentina, con condiciones agroecológicas privilegiadas para la ganadería pastoril, el sector tiene una importancia histórica significativa. Aún hoy, la alimentación de los animales en pastoreo a base de pastizales naturales, pasturas y verdeos es uno de los pilares de la actividad y la posiciona entre las principales regiones ganaderas del mundo. Sin embargo, la productividad forrajera efectivamente lograda es sustancialmente inferior a la esperada. En este contexto, la fertilización de los recursos forrajeros emerge como un factor clave para aumentar los niveles productivos y la eficiencia de los sistemas ganaderos de manera sostenible. El presente análisis aporta información sobre la situación actual del uso de la fertilización de recursos forrajeros en las principales regiones ganaderas de Argentina, explorando las prácticas llevadas a cabo, los niveles de adopción y los factores que influyen en la toma de decisiones de los productores.

>. PRODUCCIÓN GANADERA EN ARGENTINA

Nuestro país presenta condiciones climáticas y edáficas excepcionales para desarrollar la ganadería pastoril. A nivel mundial, Argentina se ubica en el sexto lugar entre los productores de carne (5% de la producción global con 3,1 millones de toneladas) y en el décimo lugar entre los productores de leche (2% de la producción global con 10,7 millones de toneladas (Our World in data, 2025).

Sin embargo, a diferencia de otros países ganaderos, en los últimos 50 años en el país la producción de carne se ha mantenido prácticamente estable durante décadas (Figura 1a). A diferencia de la carne, la producción láctea ha mostrado un incremento gradual (Figura 1b). Si se compara con el aumento de 682 % en la producción de granos, la producción de carne sólo aumentó un 21 % (Menchón *et al.*, 2018b). A su vez, en nuestro país la superficie destinada a los cultivos se incrementó en 263,1 %, aunque las existencias bovinas sólo lo hicieron un 19,6 %. Esto podría asociarse con un proceso de agriculturización

y reducción de la superficie destinada al uso con vacunos. Sin embargo, la reducción en el área destinada a pastizales y pasturas para los animales fue de 5 %. En las últimas cinco décadas la productividad agrícola del país aumentó 115 % mientras que la productividad ganadera solamente 0,4 % (Menchón *et al.*, 2018b).

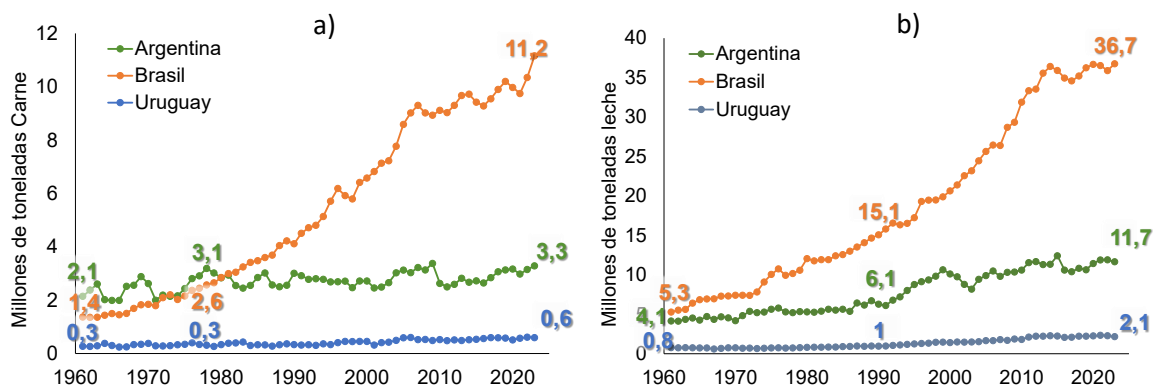
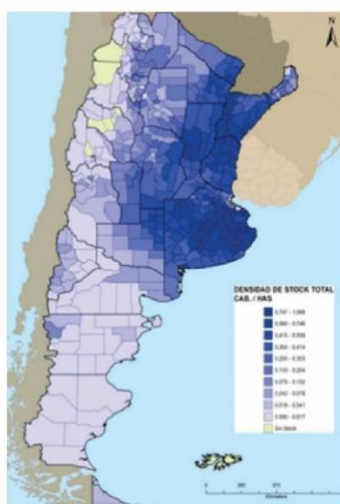


Figura 1: Evolución de la producción de carne (a) y de leche (b) en Argentina en las últimas décadas (Our World in data, 2025).

Estudios recientes han estimado que la productividad real de la ganadería de carne nacional alcanza un 30% del potencial productivo de la actividad (Menchón *et al.*, 2018a). Esta importante brecha de rendimiento (70% por debajo de lo que se podría producir) sería atribuible a diversos factores, pero la deficiencia en la alimentación de los animales se destaca como uno de los principales.

A partir de la expansión de la frontera agrícola, hoy la ganadería bovina argentina de carne se desarrolla en ambientes con menor aptitud productiva que los ocupados por la producción agrícola. Aún así, la mayor concentración de hacienda permanece en la región Pampeana y en el NEA, con una participación menor del NOA, Cuyo y Patagonia (Figura 2).

Región	Porcentaje
Pampeana	72%
NEA	17%
NOA	5%
Cuyo	4%
Patagónica	2%



Por otra parte, los establecimientos de carne de ciclo completo o los tambos cuentan también con pasturas y cultivos forrajeros (en proporciones aproximadamente semejantes), que en nuestro país ocupan unos 6,7 millones de hectáreas (INDEC-CNA, 2018). Asimismo, es común el uso de suplementos, 6 millones de toneladas de maíz se destinan a la cadena bovina argentina (Plan Ganar, 2022).

Como se sabe, la nutrición mineral controla el crecimiento de las plantas y la producción de forraje. Por este motivo, la fertilización de especies forrajeras es una práctica recomendada para aumentar la oferta de pasto en situaciones donde existen deficiencias nutricionales. A diferencia de otras regiones ganaderas en el mundo, en nuestro país la fertilización de recursos forrajeros en general es baja, aunque su utilización difiere según regiones y sistemas productivos. Localmente, en general el crecimiento de los recursos forrajeros depende del abastecimiento natural de nutrientes del ambiente. Esto provoca severas deficiencias nutricionales y limitaciones en el rendimiento de forraje. A modo de ejemplo, en pasturas perennes la producción obtenida representa un 50 % o menos del potencial de rendimiento (Insua et al., 2020).

Para contar con información precisa y actualizada (cuantitativa y cualitativa) sobre el uso de fertilizantes en la actividad ganadera, la Asociación Fertilizar llevó a cabo un relevamiento sobre la adopción de la Fertilización de Recursos Forrajeros en las principales zonas de producción en el país. Esta información podría contribuir al diseño de propuestas específicas de transferencia tecnológica para el sector y permitan aumentar la productividad de manera sustentable.

>. ENCUESTA FERTILIZACIÓN DE RECURSOS FORRAJEROS

1. Regiones relevadas

En 2025, el estudio llevado a cabo por Fertilizar analizó 300 casos distribuidos en las principales regiones de producción ganadera según el CNA (2018) (Figura 3):

- Santa Fé – Córdoba – San Luis (SanCor)
- Centro de Buenos Aires y Noreste de La Pampa (Centro BA+NE_LP)
- Litoral
- Cuenca del Salado
- Sur de Buenos Aires + Sudeste de La Pampa (S_BA+SE_LP)

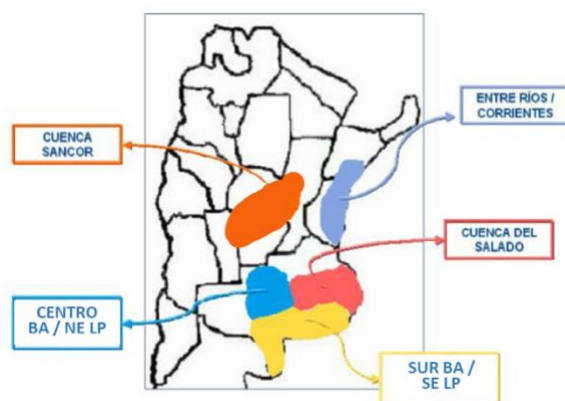


Figura 3: Regiones relevadas en la encuesta sobre fertilización de recursos forrajeros en la ganadería argentina.

2. Perfil productivo y recursos forrajeros

La encuesta muestra respuestas provenientes mayormente de establecimientos dedicados a la cría (44%), seguidos por recría (23%), invernada (16%), tambo (13%) y una mínima participación de la producción de fardos para la venta (4%) (Figura 4). Esta distribución se ajusta a la del sector ganadero nacional, que en el último Censo Nacional Agropecuario (INDEC-CNA, 2018) estaba integrado 230.000 productores dedicados a la producción de carne y aproximadamente 10.000 establecimientos de producción lácteas (OCLA, 2025).

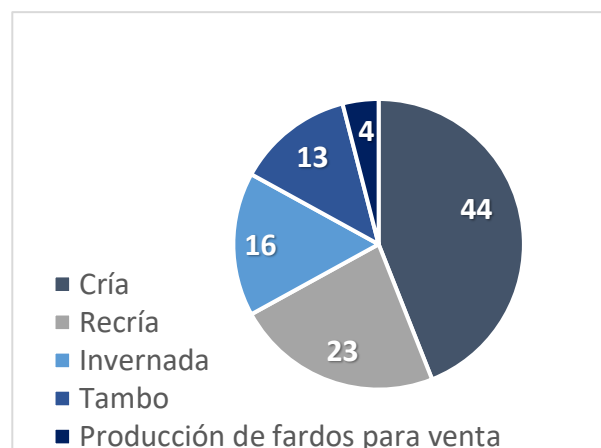


Figura 4: Perfil productivo con las principales actividades desarrolladas.

Entre los recursos forrajeros relevados se distinguieron: a) recursos perennes: pasturas monofíticas (o también denominadas puras, principalmente pasturas de alfalfa) y polifíticas (comúnmente conocidas como pasturas mezclas o consociadas, integradas mayoritariamente por gramíneas y leguminosas), y pastizales naturales (cubiertas nativas perennes) y b) cultivos forrajeros anuales (verdeos de invierno y de verano).

3. Indicadores del consumo de fertilizantes

- Recursos forrajeros

Un dato interesante que surge del relevamiento es que la adopción de la tecnología de fertilización presenta marcadas diferencias según el recurso forrajero considerado. Una situación particular se registra en los pastizales naturales, recurso para el cual se indica que en el 90 % de los casos no recibe fertilización (Figura 5). Cabe destacar este escaso o nulo aporte de nutrientes por tratarse de un recurso forrajero básico en la ganadería local. Tal como surge de la bibliografía, la producción de forraje de este valioso recurso se encuentra limitada por deficiencias nutricionales (Rodríguez Palma *et al.*, 1999). Los resultados obtenidos en la encuesta son coincidentes con estudios previos y ponen de manifiesto la histórica limitación productiva en la base alimenticia de la ganadería nacional (Nemoz *et al.*, 2013; Faverin y Machado, 2019).

Por otra parte, para las pasturas las respuestas obtenidas muestran poca diferencia en la actitud de fertilización según se trate de pasturas monofíticas (puras) o polifíticas. En líneas generales, un 25% de los productores manifiestan nunca fertilizar sus pasturas y un 50 % sólo las fertiliza en el año de su siembra (Figura 5). Si bien la duración productiva promedio fue establecida de unos seis años, apenas un 20% las

fertiliza a la siembra y además en alguna otra ocasión a lo largo de su vida útil. Tampoco se evidencia una tendencia marcada a fertilizar lotes distinguiendo o priorizando la aplicación de fertilizantes según la calidad de los ambientes.

En cambio, para los cultivos forrajeros anuales (ya sean verdeos de invierno o de verano) en un 50 % de los casos los encuestados respondieron que los fertilizan siempre, mientras que un 25 % lo evalúa en función de la situación del año (Figura 5).

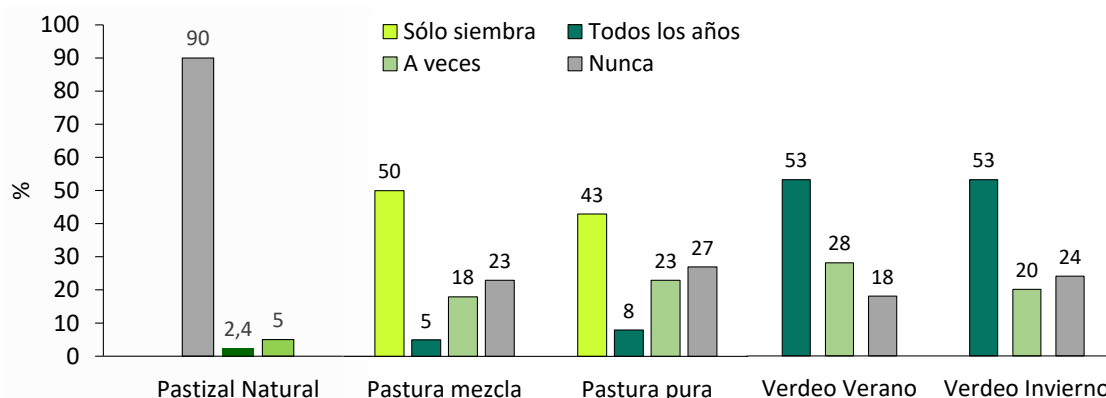


Figura 5: Actitud de fertilización según el recurso forrajero: Perennes (pastizales naturales, pasturas puras y mezclas) y Anuales (cultivos forrajeros de verano y de invierno).

Esto podría asociarse por una parte a que los verdeos suelen sembrarse en lotes de mejor aptitud de suelo, con expectativas de alta productividad en períodos críticos para la producción de pasto (invierno o verano). Otro aspecto distintivo de los cultivos forrajeros es su utilización en sistemas de tambo o de engorde, donde se maneja el pastoreo con una eficiencia de cosecha del forraje elevada. Esto marca una diferencia con el manejo de las pasturas y sobre todo de los pastizales naturales.

En la Tabla 1 se muestra que, con 143.977 toneladas, los cultivos anuales consumen un 60 % del volumen total de fertilizantes, a pesar de que representan un 40% del área sembrada (2.058.696 hectáreas). En pasturas el volumen del mercado es de 94.203 toneladas aplicadas en un 38 % en la superficie implantada por estas especies (2.899.785 hectáreas). Las dosis promedio por región se muestran en la Tabla 1, con valores levemente superiores para los cultivos anuales (94,3 kg/ha) con respecto a las pasturas (86,5 kg/ha).

Tabla 1: Participación por región en el mercado de fertilizantes. Superficie total y neta (ha), porcentaje de uso (%), dosis (kg/ha) y volumen (toneladas).

Región	Superficie	Uso	Sup. Neta	Dosis total	Volumen
Pasturas					
Centro_BA+NE_LP	694.486	33	225.807	91,6	20.693
Cuenca del Salado	190.870	35	66.805	105,2	7.030
Litoral	234.437	53	124.586	68,8	8.570
S_BA+SE_LP	539.456	46	247.465	114,5	28.345
SanCor*SL	1.240.536	34	424.196	69,7	29.565
Total	2.899.785	38	1.088.859	86,5	94.203
Cultivos Forrajeros Anuales					
Centro_BA+NE_LP	544.462	78	426.564	87,5	37.309
Cuenca del Salado	138.584	88	122.322	104,2	12.752
Litoral	130.508	89	116.007	123,5	14.324
S_BA+SE_LP	744.441	71	527.246	107,2	56.517
SanCor*SL	500.700	67	335.019	68,9	23.076
Total	2.058.696	74	1.527.158	94,3	143.977

- Mercado según regiones productivas

El consumo anual de fertilizantes para recursos forrajeros se estima en 250.000 a 260.000 toneladas. En la Figura 6 se observa la participación en este mercado según las regiones relevadas. Las cuencas de S_BA+SE_LP se posiciona en primer lugar con más de un tercio del consumo de fertilizantes. Esto se podría atribuir al elevado uso de verdeos anuales que integran la cadena forrajera en esta zona. Le sigue la cuenca Centro_BA+N_LP y SanCor+SL, y junto a S_BA+SE_LP representan el 82 % del total del volumen consumido en forrajeras.

Las regiones Cuenca del Salado y Litoral muestran baja participación en el consumo de fertilizantes (entre ambas cuencas suman 18 %), lo cual posiblemente esté relacionado con la predominancia de los pastizales naturales, y como ya fue comentado, estos recursos no reciben fertilización.

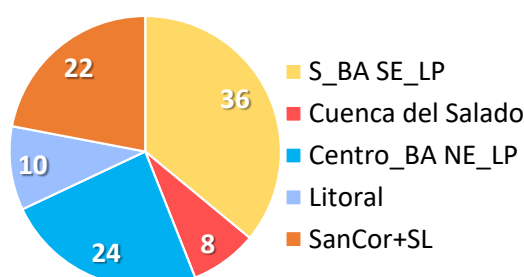


Figura 6: Participación regional en el consumo de fertilizantes.

- Tipo de fertilizante utilizado

En el país los fertilizantes fosforados y nitrogenados suman el 95 % de los fertilizantes comercializados para su uso en recursos forrajeros, con un 4 % correspondiente a los azufrados y 1 % a otros fertilizantes. El estudio reveló que en especies forrajeras el principal objetivo de nutrición es fosfatada, con un 49 % del volumen total y un 37 % de adopción (Tabla 2). En segundo lugar, se ubica la nutrición nitrogenada con aproximadamente la mitad de adopción (20 %). De todos modos, el volumen consumido de ambos fertilizantes llega a niveles similares (46%) debido a las mayores dosis totales aplicadas de los fertilizantes nitrogenados (Tabla 2).

Tabla 2: Uso de fertilizantes fosfatados y nitrogenados por región. Superficie total y neta (ha), porcentaje de uso (%), dosis (kg/ha) y volumen (toneladas).

Región	Superficie	Fertilizante	Uso	Sup. Neta	Dosis total	Volumen
Centro_BA+NE_LP	1.238.949	Fosfatado	43	527.920	58	30.498
		Nitrogenado	16	200.866	132	26.426
Cuenca del Salado	329.454	Fosfatado	53	175.692	64	11.268
		Nitrogenado	33	108.429	78	8.505
Litoral	364.945	Fosfatado	57	208.937	70	14.715
		Nitrogenado	11	40.257	199	8.003
S_BA+SE_LP	1.283.897	Fosfatado	41	522.918	77	40.456
		Nitrogenado	29	374.743	117	43.698
SanCor_SL	1.741.236	Fosfatado	24	418.746	46	19.349
		Nitrogenado	14	252.303	94	23.747
Total	4.958.481	Fosfatado	37	1.854.213	63	116.286
		Nitrogenado	20	976.598	113	110.378

Cuando se expresa en volumen aplicado, la urea es el fertilizante más utilizado del mercado total (43 %), mientras que entre los fosfatados el más usado es el fosfato diamónico (DAP) seguido por fosfato monoamónico (MAP). Yeso aparece en cuarto lugar, destinado a corrección de salinidad y estructura de suelos especialmente en pasturas de alfalfa (Figura 7).

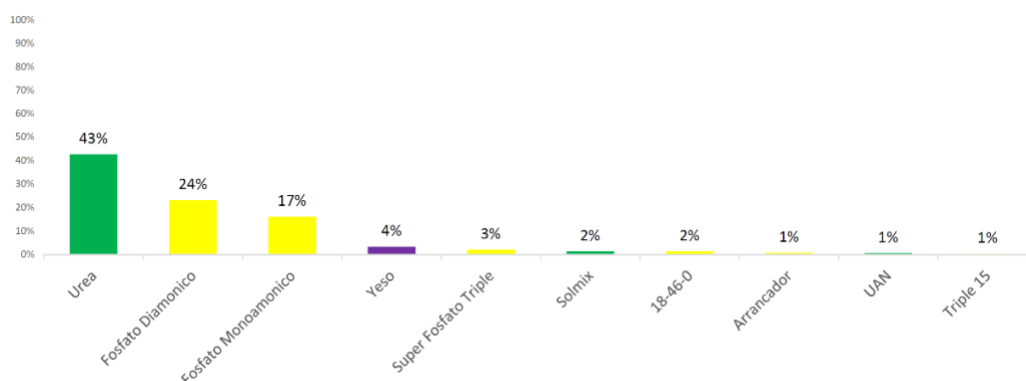


Figura 7: Participación de productos fertilizantes en el mercado local.

- **¿Qué motiva la decisión de fertilizar o no fertilizar un recurso forrajero?**

En el estudio se consultó por la motivación para aplicar o no aplicar fertilizantes y los resultados se muestran en la Figura 8. Por un lado, en la Figura 8a aparecen las motivaciones para aplicar fertilizantes, y casi un 50 % de los encuestados respondieron que esta decisión está basada en la recomendación de un asesor técnico o agrónomo. Además, un 45 % respondió que tiene en consideración los costos de la práctica y el presupuesto disponible.

Entre los motivos que deciden la fertilización el 40 % de los encuestados respondieron que se basan en el resultado de los análisis de suelo. Esto contrasta con la baja adopción del muestreo de suelos en lotes ganaderos, marcadamente inferior a su uso en los lotes agrícolas. Por último, algo más del 30 % de los casos indica que tiene en cuenta la experiencia previa y las prácticas tradicionales.

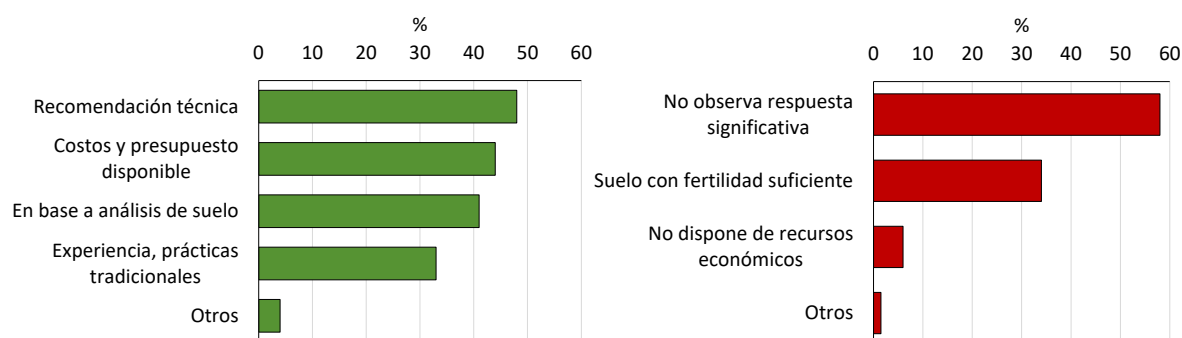


Figura 8: a) Fundamentos para decidir la aplicación del fertilizante y la dosis a utilizar. b) Motivos para decidir no fertilizar los recursos forrajeros.

Por el otro lado, cuando se analizan las respuestas que fundamentan no aplicar fertilizantes en los recursos forrajeros se destaca un elevado porcentaje de encuestados que no observan respuesta significativa a la fertilización (casi 60 %, Figura 8b). Esta valoración podría explicarse por varios motivos, entre los que se destaca el desajustes en la práctica de fertilización (esto es momento de aplicación, el o los nutrientes aplicados y la dosis adecuada para cada situación productiva), que puede provocar bajas respuestas obtenidas. Por otra parte, en los sistemas ganaderos existe una generalizada ineficiencia en la cosecha del pasto producido (localmente los animales en pastoreo consumen 40 % o menos del pasto producido), que minimiza el beneficio obtenido por la aplicación de fertilizantes e impide cuantificar convenientemente las respuestas logradas.

Otra fundamentación para no fertilizar – el 35 % de los encuestados – es que los suelos tienen fertilidad suficiente para la producción de forraje, argumento que contrasta con estudios previos (Sainz Rozas *et al.*, 2019), y con los relevamientos de suelos en campos ganaderos. Finalmente, el porcentaje de encuestados que responde no fertilizar por no disponer de recursos es bajo (menor al 10 % de los casos) (Figura 8b), y se contrapone con lo mencionado anteriormente, que la decisión de fertilización estaría fuertemente condicionada por el costo de los fertilizantes y el presupuesto disponible (Figura 8a).

Estos resultados demuestran el importante rol de los profesionales en la aplicación de la tecnología, lo cual resalta el alto impacto que tiene la actualización y capacitación de los asesores. Utilizar esquemas tradicionales de fertilización (basados principalmente en “recetas”), así como desajustes en la cosecha del forraje producido, reducen sensiblemente la posibilidad de alcanzar los beneficios esperados de la fertilización en los sistemas ganaderos. La diversidad de estos sistemas productivos (cría, ciclo completo, tambo, etc.) y de los ambientes que ocupan (suelos de aptitud ganadera o agrícola) hace necesario elaborar estrategias de fertilización específicas para cada situación productiva.

>. CONSIDERACIONES FINALES

El panorama de la fertilización en los sistemas ganaderos argentinos presenta una dualidad marcada por una parte por el significativo potencial productivo de la actividad, y por otra parte por un bajo aporte de nutrientes que restringe la producción de los recursos forrajeros. La fertilización de recursos forrajeros emerge como una herramienta clave para revertir esta situación, incrementando la producción de pasto en un contexto donde la demanda global por alimentos de origen animal exige una producción sostenible.

Los resultados de la encuesta realizada por Fertilizar arrojan luz sobre las prácticas actuales y las motivaciones detrás de las decisiones de fertilización. Se confirma una baja adopción de la fertilización en pasturas. Especialmente complicada es la situación en los pastizales naturales que constituyen la base forrajera de la ganadería nacional. Los cultivos anuales destinados a forraje presentan la mayor adopción de fertilización.

Se manifiesta que las decisiones de fertilización se basan principalmente en la recomendación técnica, los costos de los fertilizantes y, sorprendentemente en un alto porcentaje, en el análisis de suelo, a pesar de la reconocida baja implementación de esta última práctica en ganadería. La falta de planificación forrajera y del control de la nutrición mineral de las plantas, junto a la ineficiente cosecha del pasto podrían explicar la falta de valoración de respuestas significativas a la fertilización.

En conclusión, para impulsar una ganadería pastoril más eficiente y sostenible, es crucial avanzar en la mejora de la nutrición mineral de los recursos forrajeros, mediante estrategias de transferencia de la tecnología adaptadas a cada recurso, ambiente y sistema productivo. Optimizar la nutrición de los recursos forrajeros contribuiría a consolidar la posición del país como un actor relevante en el mercado global de alimentos de origen animal, respondiendo a las demandas de producción sostenible y de calidad.

>. BIBLIOGRAFÍA

Instituto Nacional de Estadística y Censos - I.N.D.E.C. 2018. Censo Nacional Agropecuario 2018: Resultados definitivos / 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos - INDEC, 2021. Libro digital, PDF. ISBN 978-950-896-607-0

Faverin, C. y Machado. C. 2019. Tipologías y caracterización de sistemas de cría bovina de la pampa deprimida. Chilean journal of agricultural & animal sciences, 35(1), 3-13.

Insua J. R., Machado C. F., Garcia S. C., y Berone G. D. 2021. Forage yield gap analysis for tall fescue pastures in Argentina: A modelling approach. Grass and Forage Science, 76(2), 245-257.

Menchón P.A., Monzón J.P. y Agostini M. de los A. 2018. Brechas de productividad ganadera entre los principales países productores de carne. 41º Congreso Argentino de Producción Animal. Revista Argentina de Producción Animal Vol 38 Supl. 1: 114.

Menchón P.A., Monzón J.P. y Agostini M. de los A. 2018. Cambios en indicadores productivos de agricultura y ganadería entre los principales países productores de carne. 41º Congreso Argentino de Producción Animal. Revista Argentina de Producción Animal Vol 38 Supl. 1: 127.

Nemoz J.P., Giancola S.I., Bruno M.S., de la Vega M.B., Calvo S., Di Giano S., Rabaglio M.D. 2013. Causas que afectan la adopción de tecnología en la ganadería bovina para carne en la Cuenca del Salado, provincia de Buenos Aires: Enfoque cualitativo. Ediciones INTA, 2013. Serie: Estudios socioeconómicos de la adopción de tecnología. Nº 5. 62 p. ISBN Nº 978-987-521-467-5.

OCLA 2025. Unidades Productivas y Rodeo Lechero a marzo de 2024. <https://www.ocla.org.ar/noticias/29882853-unidades-productivas-y-rodeo-lechero-a-marzo-de-2024>.

Our World in data, 2025. <https://ourworldindata.org/search?q=animal%20production>

Plan Ganar, 2022. Plan de ganadería argentina. Documento de trabajo. Versión 1.0. 2022/2030. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Argentina.

Sainz Rozas H., Eyherabide M., Larrea G., Martinez Cuesta N., Angelini H., Reussi Calvo N. y Wyngaard, N. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. In Actas Simposio Fertilidad. FERTILIZAR Asociación Civil, Rosario pp. 141-158.

Fertilización de forrajeras anuales de invierno y verano: estrategias para maximizar rendimiento y calidad

► ► Berhongaray G^{1*}

¹ICiAgro Litoral (UNL-CONICET) – Facultad de Ciencias Agrarias, UNL

✉ bgonzalo@agro.uba.ar

RESUMEN

La fertilización de forrajeras anuales constituye una herramienta clave para optimizar la producción de biomasa y la calidad de los forrajes utilizados en sistemas ganaderos y lecheros intensificados. En este trabajo se sintetizan evidencias generadas en ensayos experimentales realizados en distintas regiones de la Región Pampeana, evaluando la respuesta de verdeos de invierno (avena y raigrás anual) y maíces destinados a silo. Se analizan los efectos de la fertilización nitrogenada en distintas dosis, momentos de aplicación y fuentes de nutrientes, así como su impacto sobre la producción de materia seca y la calidad forrajera. Los resultados muestran que, si bien la magnitud de la respuesta varía según ambiente, especie y manejo, la fertilización con nitrógeno mejora de manera consistente el rendimiento y la calidad del forraje. Se discuten implicancias agronómicas, económicas y prácticas para el diseño de estrategias de fertilización eficientes y sostenibles.

Palabras clave: Nitrógeno; Producción de biomasa; Eficiencia agronómica; Calidad nutricional; Fuentes de fertilización

>. INTRODUCCIÓN

La producción de forrajes anuales representa un componente esencial en los sistemas de carne y leche de Argentina, proporcionando cobertura estratégica en momentos críticos del año. Dentro de este grupo, los verdeos de invierno como avena (*Avena sativa*) y raigrás anual (*Lolium multiflorum*) permiten cubrir los requerimientos durante el otoño e invierno, mientras que los maíces para silo sostienen la oferta forrajera estival. A diferencia del verano, en invierno las bajas temperaturas reducen la mineralización de nutrientes en el suelo, limitando la disponibilidad de nitrógeno para las plantas. Esta diferenciación ambiental impone la necesidad de ajustar las estrategias de fertilización a cada estación, teniendo en cuenta la dinámica edáfica, la demanda de nutrientes del cultivo y los objetivos de producción. El presente trabajo revisa resultados de ensayos recientes en verdeos de invierno y maíces para silo en la Región Pampeana, aportando lineamientos para mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y maximizar el retorno económico de la práctica.

> FERTILIZACIÓN DE VERDEOS DE INVIERNO

La respuesta a la fertilización nitrogenada en verdeos de invierno ha sido ampliamente documentada, mostrando incrementos importantes de materia seca y mejoras en la calidad nutricional. Un análisis de 164 ensayos en la Región Pampeana reveló que la eficiencia agronómica promedio varió entre 15 y 30 kg MS por kg de N aplicado (Tabla 1), con diferencias notables entre regiones. En relación a las especies, la avena respondió con mayores incrementos iniciales de biomasa, mientras que el raigrás mostró una mejor persistencia y recuperación post-pastoreo. Sin embargo, en zonas semiáridas la eficiencia de uso del nitrógeno fue un 50% inferior, limitando el impacto de la fertilización (Figura 1). Aun así, en contextos hídricos favorables, la inversión en fertilización se tradujo en aumentos relevantes en producción de leche y carne, justificando su adopción en sistemas intensivos.

Tabla 1. Valores medios de revisión de ensayos de fertilización nitrogenada en verdeos de invierno en la Región Pampeana. n= número de datos; Dosis N= dosis media utilizada en los ensayos. La Eficiencia Agronómica fue calculada para cada experimento y luego promediada.

Provincia	Dosis media de N (kg/ha)	Respuesta media (kg MS/ha)	Eficiencia Agronómica (kg MS/kg N)
Buenos Aires (n=62)	75	+1530	15
Córdoba (n=30)	80	+2015	23
La Pampa (n=32)	30	+425	15
Santa Fe (n=40)	30	+943	30
Entre Ríos (n=9)	50	+1260	17

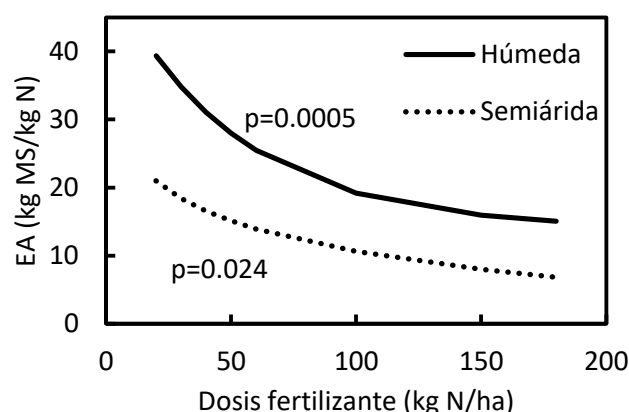


Figura 1: Eficiencia agronómica (kg MS/kg N) en función de la dosis y régimen hídrico del sitio: región semiárida (línea punteada) región húmeda (línea continua).

El momento de aplicación del nitrógeno es crítico para maximizar la respuesta de los verdeos de invierno. La fertilización a la siembra, practicada en el 67% de los casos analizados, permitió asegurar un arranque vigoroso del cultivo, pero mostró menores eficiencias a medida que avanzaba el ciclo. En cambio, las estrategias de fertilización dividida (parte a la siembra y parte al macollaje) resultaron en una eficiencia agronómica un 9% superior en promedio. La aplicación fraccionada acompaña mejor la curva de demanda del cultivo, mejorando la conversión del nitrógeno aplicado en materia seca útil. Si bien estas prácticas implican mayores costos operativos, la mejora en producción y calidad del forraje suele compensar esta inversión adicional, especialmente en sistemas lecheros de alta exigencia.

La fuente de nitrógeno utilizada también influye sobre la eficiencia de la fertilización en verdeos de invierno. En general, el UAN mostró una eficiencia 3% superior a la urea en aplicaciones a la siembra, mientras que el nitrato de amonio cálcico (CAN) presentó ventajas de hasta un 12% en rendimiento relativo. El uso de fuentes orgánicas, como purines o digestatos, resultó en menores respuestas iniciales debido a su patrón de liberación lenta de nitrógeno. Sin embargo, estos materiales pueden aportar beneficios a mediano plazo sobre la fertilidad del suelo. La elección de la fuente debe considerar tanto los objetivos productivos como el manejo general del sistema.

La calidad del forraje también mejora significativamente con la fertilización nitrogenada de los verdeos de invierno (Tabla 2). Ensayos muestran que el contenido de proteína bruta aumentó en promedio 2,2 puntos porcentuales, alcanzando valores superiores al 18% en cultivos fertilizados. Este incremento favorece directamente la producción de leche y carne, aumentando la eficiencia de conversión del forraje. Aunque en ambientes más restrictivos las mejoras en calidad pueden ser más moderadas, el impacto global de la fertilización nitrogenada sobre la productividad animal es ampliamente positivo.

Tabla 2. Efecto de la fertilización sobre el contenido de proteína bruta (%). n= número de datos; Dosis N= dosis media utilizada en los ensayos.

Tratamiento	n	Dosis N (kg/ha)	Producción (kg MS/ha)	Proteína bruta (%)
Testigo	14	0	2790	16.2
Fertilizado	25	55	4320	18.4

>. FERTILIZACIÓN DE MAÍZ PARA SILO

La fertilización nitrogenada en maíces con destino a silo fue evaluada en diversas zonas representativas de la Región Pampeana, incluyendo Franck y Gobernador Crespo (Santa Fe) y la cuenca de Abasto (Buenos Aires). En cada localidad se aplicaron diferentes dosis de nitrógeno, utilizando principalmente UAN o Urea como fuente, y se evaluaron tanto los rendimientos de biomasa como la eficiencia agronómica (Tabla 3). En Franck, las dosis crecientes de nitrógeno (0 a 220 kg N/ha) lograron un incremento de biomasa de hasta 5000 kg MS/ha respecto al testigo, con una eficiencia promedio de 25 kg MS/kg N. En Gobernador Crespo, el máximo aumento de biomasa alcanzado fue de 4000 kg MS/ha, con eficiencias entre 20 y 30 kg MS/kg N dependiendo del híbrido. En Castelli y General Belgrano (Buenos Aires), los aumentos de biomasa respecto a los testigos fueron de aproximadamente 2200 kg MS/ha y 3000 kg MS/ha respectivamente, con eficiencias agronómicas de 48 kg MS/kg N en bajas dosis y de 18-28 kg MS/kg N en dosis mayores. A pesar de las diferencias en ambientes y manejo, la fertilización nitrogenada mostró una respuesta positiva consistente en todas las localidades.

Tabla 2. Dosis de fertilización nitrogenada (kg N/ha) en ensayos de maíz con destino a silo en la Región Pampeana, Respuesta (kg MS/ha) y Eficiencia Agronómica (kg MS/kg N).

Sitio	Dosis de N (kg/ha)	Respuesta (kg MS/ha)	Eficiencia Agronómica (kg MS/kg N)
Franck (Santa Fe)	0 - 220	+5000	~45
Gobernador Crespo (Santa Fe)	0 - 220	+5000	~45
Castelli (Buenos Aires)	0 - 74	+2200	~35
General Belgrano (Buenos Aires)	0 - 216	+3000	~23

Además de las fuentes minerales, se evaluó el uso de fertilización orgánica en la localidad de Rafaela (Santa Fe), mediante la aplicación de digestatos de biodigestores combinados con urea. La combinación de fertilización orgánica y mineral permitió alcanzar rendimientos de biomasa superiores en comparación con el uso exclusivo de fertilizantes químicos. Se observó que la aplicación de digestatos complementados con urea resultó en un aumento de 5720 kg MS/ha respecto al testigo sin fertilizar, aunque los digestatos utilizados como única fuente de nitrógeno mostraron una eficiencia inicial más baja. Estos resultados indican que las fuentes orgánicas pueden ser una estrategia válida para complementar la fertilización nitrogenada, especialmente en sistemas que buscan integrar sostenibilidad ambiental.

La calidad de la biomasa de maíz para silo también fue influenciada por la fertilización nitrogenada. En Santa Fe, se observaron incrementos de 1-2% en el contenido de proteína cruda con las dosis más altas, y mejoras significativas en la digestibilidad de la fibra (TTNDFD). En Buenos Aires, la comparación entre métodos de cosecha manual y mecánica mostró diferencias en la biomasa absoluta, pero no en las tendencias de respuesta a la fertilización. Aunque no siempre se detectaron cambios importantes en el contenido de almidón, la mayor producción de biomasa contribuyó a incrementar la oferta de energía digestible por hectárea, mejorando el potencial productivo de los sistemas.

>. CONCLUSIONES

La fertilización de forrajeras anuales de invierno y verano se confirma como una estrategia eficiente para maximizar la productividad de los sistemas ganaderos y lecheros de Argentina. En verdeos de invierno, la fertilización nitrogenada no solo incrementa la producción de materia seca, sino que también mejora significativamente la calidad del forraje. En maíces para silo, la fertilización con nitrógeno permite alcanzar altos rendimientos de biomasa con buena calidad nutricional, integrando en algunos casos fuentes orgánicas como complemento. La correcta elección de dosis, fuente y momento de aplicación resulta fundamental para optimizar los retornos económicos y agronómicos de la práctica. Finalmente, la fertilización ajustada al ambiente y al objetivo de producción contribuye a mejorar la eficiencia de uso de los recursos y la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas de producción animal.

Nutriente estratégico para mejorar productividad de pasturas en suelos en la región pampeana

► ► Álvarez, C^{1,2}; R. Fernández^{1,2*}; A. Quiroga^{1,2}

¹ INTA Anguil, ² Facultad Agronomía UNLPam

✉ alvarez.cristian@inta.gob.ar

En la Región Pampeana (RP), la producción ganadera se encuentra sobre pasturas perennes donde, la alfalfa es el principal cultivo. En términos generales, existe un balance negativo en planteos agrícolas, debido a las cosechas (grano-forraje) y a las bajas tasas de reposición lo que lleva a una disminución de la disponibilidad. En pasturas base alfalfa, la fertilización con fósforo (P) y azufre (S) resulta clave para maximizar producción. La exportación de nutrientes y la escasa reposición preocupan en planteos mixtos de producción generando esta escasa nutrición cada vez mas manchoneo en estas y cultivos agrícolas. El objetivo del trabajo es presentar resultados de respuestas al incorporar fertilización con P y S, sobre la productividad y eficiencia de uso de agua (EUA) de la pastura, y ii) cuantificar la exportación de P, S, zinc (Zn) y cationes en pasturas establecidas en dos suelos diferenciados por su potencial de producción, y cuantificar el efecto del manchoneo sobre la productividad y balance de nutrientes en suelos afectados por compactación. La experiencia se llevó a cabo sobre un Haplustol Éntico (MD) y sobre un Paleustol Petrocálcico, (SM). En ambos suelos se sembró aproximadamente 10 kg ha⁻¹ de alfalfa. Se establecieron cuatro tratamientos de fertilización aplicados al voleo: Sin aporte de nutrientes (T); con 9 kg ha⁻¹ de P (P); sin P y con 40 kg de S ha⁻¹ (S) y con 9 kg ha⁻¹ de P y 40 kg de S ha⁻¹ (P+S). Durante 3 años se cortó biomasa aérea para determinar el forraje cosechado y se lo expresó como materia seca (MS). Las muestras fueron molidas, y se les determinó el contenido en biomasa aérea de N, P, S, Zn, calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg). La fertilización con P+S, aumentó la productividad de la pastura en SM (entre el 16% y 38%) y la EUA, mientras que en MD no hubo respuestas a la fertilización. En ambos sitios el aporte de S incrementó significativamente la extracción de P y Zn. La exportación de nutrientes fue función de la producción de biomasa aérea y no de la concentración de los mismos. En SM el manchoneo de alfalfa se cuantificó los siguientes parametros: Se realizaron 10 cortes de biomasa y humedad de suelo. En 2023 sobre ambientes de parches y normal se evaluó conductividad hidráulica saturada (CH), densidad aparente (DA), porosidad total (PT), infiltración básica (IB), materia orgánica total (MO) y contenido de fósforo extractable (P). La producción de biomasa fue un 41 y 46 % menor bajo manchón con respecto a la situación normal en A y A+F, respetivamente. En ambas pasturas se encontró que la CH y PT medida en 6-12 y 12-18 cm fue mayor en el sector normal, con respecto al área de parche. El contenido de P sobre parches fue mayor en un 59 y 20 % para 0-10 y 10-20 cm de profundidad, respectivamente, con respecto al sector normal. Con respecto al contenido de MO el valor inicial fue similar al medido en el año 2023 en el sector de parche para 0-10 cm de profundidad, en cambio en el sector normal el contenido de MO aumentó un 16 %. En A+F, también el contenido de MO en el sector de parche en el año 2023 fue similar al contenido inicial, pero en el sector normal, el aumento fue del 11 %. Los indicadores de suelos

evaluados en las áreas de parche en A y A+F presentan menores valores de CH, PT y MO con respecto a las áreas de suelo normales, en cambio el contenido de P fue mayor bajo manchón debido probablemente a la menor extracción del nutriente a través de los años. Resultaría necesario trabajar en estrategias de reposición para conservar o aumentar los nutrientes del suelo, realizando chequeos de problemas físicos que condicionan la respuesta en producción de forraje, persistencia, y Calidad.

>.TRABAJOS PUBLICADOS

Fernández, R., Álvarez, C. O., Kloster, N. y Quiroga, A. R. (2025). Evaluación de indicadores edáficos y biomasa aérea en pasturas con áreas de parches en la región semiárida pampeana. *Semiárida*, 35(1), 45-53.

Fernández, R; C Álvarez; M Uhaldegaray; E Noellemeyer; A Quiroga. 2024. Efecto de la fertilización sobre biomasa aérea y extracción de nutrientes de alfalfa en suelos contrastantes. *Cienc. Suelo* 42 (2): 126-137.

Calibración de métodos de diagnóstico de potasio basados en el análisis de suelo

► ► **Avila, O.^{1*}, Eyherabide, M.^{1,2}, Carciochi, W.^{1,3}, Reussi Calvo, N.^{1,3}, Wyngaard, N.^{1,3}, Barbieri, P.^{2,3}, Salvagiotti, F.⁴, Orcellet, J.⁵, Stahringer, N.⁶, Neiff, N.⁶, Pagani, A.⁸, Cerliani, C.⁷, Biassoni, M.M.⁴, Tovar Hernández, S.¹, Lapaz, A.¹, Kettler, B.⁶, Nalli, F.⁶, Romero, J.¹, Martín, M.⁶, Rodríguez, G.⁶, Boscarino, S.⁶, Nieto, G.⁶, Frias, E.⁶, Gaian, N.⁶, Larrea, G.¹, Sainz Rozas, H.^{1,2,3*}**

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata; ² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria Balcarce; ³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; ⁴ Grupo Manejo de Cultivos, Suelo y Agua, EEA INTA Oliveros; ⁵ Nidera Semillas; ⁶ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste; ⁷ Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto; ⁸ Clarion, 9 de Julio, Buenos Aires.

✉ oscar.avila.ec@gmail.com / sainzrozas.hernan@inta.gob.ar

>. INTRODUCCIÓN

El potasio (K) es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, no obstante, la fertilización potásica ha recibido menos atención en comparación con otros nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre, debido a los altos niveles de K en la gran mayoría de los suelos de la región Chaco-Pampeana de Argentina (Morrás et al., 2002). La baja reposición y la continua extracción a causa de la intensificación de cultivos genera un balance negativo de este nutriente en el suelo (Correndo et al., 2021; Larrea et al., 2023). Como consecuencia, se ha registrado una disminución del K intercambiable (Ki) a niveles inferiores a $0,51 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ (200 mg kg^{-1}) en suelos agrícolas ubicados cerca de los ríos Uruguay y Paraná, así como en otras áreas del noreste argentino (Sainz Rozas et al., 2019, 2024). Esta tendencia destaca la necesidad de definir umbrales críticos (UC) de K que permitan predecir con precisión la probabilidad de respuesta en rendimiento de los cultivos a la fertilización en la región. Antecedentes de calibración en suelos de Uruguay en 2011 reportaron un UC de $0,34 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ (133 mg kg^{-1}), por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta (Barbazán et al., 2011). Una década más tarde, se definieron rangos críticos de $0,40$ a $0,54 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ (157 a 213 mg kg^{-1}) en suelos de la región pampeana de Argentina (Orcellet et al., 2025). En ambos estudios, para la calibración utilizaron métodos de análisis de suelo que emplean al Ki como indicador de su disponibilidad en el suelo.

El K en solución mantiene un equilibrio dinámico con el Ki y el K no intercambiable (Kni), y en conjunto estas tres fracciones determinan la disponibilidad de K en el suelo (Bilias & Barbayiannis, 2017; Huang, 2005). Un método comúnmente utilizado para determinar K disponible extrae el Ki mediante intercambio con acetato de amonio (AcNH_4) y se ha empleado en distintos tipos de suelos (McLean & Watson, 1985). Aunque este método también extrae el K en solución, su aporte es insignificante en suelos no salinos (Helmke & Sparks, 1996). Sin embargo, el Kni puede constituir una fracción significativa del K disponible en suelos con alta capacidad de fijación y predominio de illita en las arcillas (Núñez & Morón, 2017). A su vez, los UC pueden variar según la proporción de minerales arcillosos 2:1 expansivos y no expansivos, como la esmectita y la illita (Breker et al., 2019).

La calibración del K_i , extraído con $AcNH_4$, en suelos de Iowa con un 80-90 % de esmectitas e illita, mostró una baja correlación ($R^2 \sim 0,25$) con la respuesta en rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) y soja (*Glycine max* L.) (Barbagelata & Mallarino, 2013). Esta situación resalta la necesidad de mejorar el diagnóstico de la fertilidad potásica del suelo mediante la calibración de métodos analíticos que, además del K_i , consideren la contribución del K_{ni} a la disponibilidad de K, particularmente en suelos con elevada capacidad de fijación de K. Cox et al. (1999) desarrollaron un método con tetrafenilborato de sodio ($NaBPh_4$) para extraer la forma más lábil de K_{ni} fijado en las interláminas de las arcillas, además del K_i y el K en solución. Sus resultados mostraron una alta relación entre el K extraído con $NaBPh_4$ y el K absorbido en plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) bajo condiciones controladas. Así, la calibración del K_{ni} podría mejorar la predicción de la respuesta en rendimiento a la fertilización en suelos de regiones templadas. La información local disponible se ha centrado en la medición del K_i en suelos de la región pampeana de Argentina, por lo que es necesario extender estos estudios de calibración a la región Chaco-Pampeana e incorporar la determinación del K_{ni} .

El objetivo de este trabajo fue calibrar la respuesta en rendimiento en maíz y soja a la fertilización potásica en función del K disponible en suelo (0-20 cm de profundidad), determinado mediante dos métodos analíticos que extraen distintas fracciones de K: acetato de amonio ($AcNH_4$; K_i) y tetrafenilborato de sodio ($NaBPh_4$; K_{ni}).

> MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

Durante cinco campañas agrícolas (2019/2020 a 2023/2024), se llevaron a cabo 39 experimentos en maíz y 19 experimentos en soja en diferentes campos comerciales y experimentales de la región Chaco-Pampeana de Argentina (**Figura 1**). Se utilizaron híbridos y cultivares adaptados a cada localidad, considerando las prácticas de manejo recomendadas en cada zona.

Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con tres o cuatro repeticiones según experimento. Los tratamientos de fertilización potásica se evaluaron mediante un testigo (0 kg K ha^{-1}) y distintas dosis de K, con rangos de 25 a 125 kg K ha^{-1} en maíz y de 40 a 200 kg K ha^{-1} en soja. La fuente de K fue cloruro de potasio (KCl), aplicándose la dosis total al voleo y al momento de la siembra. No se trabajó con limitaciones de algún otro nutriente en maíz y en soja.

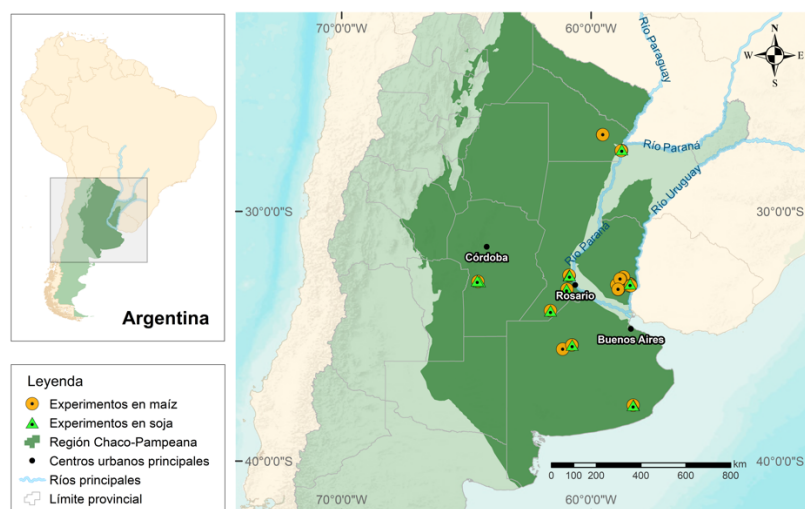


Figura 1. Ubicación de los experimentos de respuesta a la fertilización potásica en maíz y soja bajo siembra directa en la región Chaco-Pampeana de Argentina (campañas agrícolas desde 2019/2020 hasta 2023/2024).

Determinaciones en suelo y rendimiento en grano

Previo a la siembra, en cada experimento se tomó una muestra compuesta de suelo por bloque (constituida por ocho submuestras), a una profundidad de 0-20 cm. Las muestras de suelo fueron secadas a 40 °C, molidas y tamizadas a 2 mm. En cada muestra se determinó pH en agua (1:2,5 v:v) (Peech, 1965), materia orgánica (Shulte & Hopkins, 1996), P-Bray (Bray & Kurtz, 1945) y textura (Robinson, 1922). El Ki se extrajo con AcNH_4 1M a pH 7 mediante 5 minutos de agitación (Warncke & Brown, 1998), mientras que el Kni se extrajo con NaBPh_4 durante 5 minutos de incubación (Cox et al., 1999). Tanto el Ki como el Kni se cuantificaron por fotometría de llama. Además, se seleccionó una muestra de suelo por provincia en Buenos Aires, Córdoba, Corrientes, Chaco y Entre Ríos para la identificación preliminar de la mineralogía en la fracción arcilla (Biscaye, 1965), sin realizar su cuantificación.

A madurez fisiológica, el rendimiento en grano se determinó mediante cosecha manual en áreas de 10 m² para maíz y 3,4 m² para soja. Los rendimientos se expresaron con una humedad estándar del 14,5 y 13 % en maíz y soja, respectivamente.

Análisis de datos

El rendimiento relativo (RR; expresado en %) se calculó como la relación entre el promedio del tratamiento sin K y el mayor rendimiento promedio obtenido (Pearce et al., 2022). Para cada método de análisis de suelo, la relación entre el RR y la concentración de K en suelo se modeló mediante la curva de calibración arcoseno-logaritmo (Correndo et al., 2017). En los modelos se compararon los UC y sus intervalos de confianza al 90 % ($\text{IC}_{90\%}$) para detectar diferencias entre cultivos y métodos.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características edáficas de los sitios experimentales

La información preliminar sobre la mineralogía de la fracción arcilla permitió identificar illita en los sitios de Buenos Aires, Corrientes, Córdoba y Chaco, mientras que en Entre Ríos se detectó montmorillonita (esmeclita). En términos geográficos, la illita estuvo presente en el sitio cercano al río Paraná, así como en los ubicados al oeste y al sur, mientras que la montmorillonita se encontró en el sitio más próximo al río Uruguay (datos no mostrados). Por otro lado, el contenido de arcilla presentó una variabilidad similar entre los experimentos de ambos cultivos, con valores que oscilaron entre 3,4 y 51,1 % en los experimentos de maíz y entre 3,4 y 45,8 % en los experimentos de soja (**Tabla 1**).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las propiedades del suelo (0-20 cm) a la siembra de maíz y soja en los sitios experimentales de la región Chaco-Pampeana. Campañas agrícolas entre 2019/2020 y 2023/2024.

Cultivo	pH	MO %	P-Bray mg kg ⁻¹	Arcilla ----- % -----	Arcilla + limo ----- % -----	Ki ---- cmol ₍₊₎ kg ⁻¹ ----	Kni
Maíz (n = 39)							
Promedio	5,86	3,27	13,17	27,86	65,07	0,76	1,45
DE	0,35	0,93	10,45	13,85	26,96	0,51	0,83
Mínimo	5,37	1,80	3,30	3,40	13,00	0,11	0,16
Máximo	7,05	5,92	38,77	51,11	93,49	2,38	3,80
Soja (n = 19)							
Promedio	5,86	2,90	25,36	20,71	51,02	0,98	2,05
DE	0,34	1,24	21,38	11,45	27,54	0,42	0,90
Mínimo	5,50	0,62	8,73	3,40	13,00	0,22	0,27
Máximo	6,57	4,73	85,90	45,80	89,90	1,97	3,67

Abreviación: MO, materia orgánica; P-Bray, fósforo extractable; Ki, potasio intercambiable; Kni, potasio no intercambiable; DE, desviación estándar.

Los valores promedio de pH, MO y P-Bray se ubicaron dentro de los valores reportados por Sainz Rozas et al. (2019). En cuanto a las fracciones de K, el contenido de Ki varió entre 0,11 y 2,38 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en soja. El Kni varió entre 0,16 y 3,8 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en maíz y entre 0,27 y 3,67 cmol₍₊₎ kg⁻¹ en soja. Esta variabilidad en el Ki y Kni permitió una adecuada calibración de los métodos de extracción.

Rendimiento en grano y respuesta a la fertilización potásica

El rendimiento en grano de maíz varió desde 1493 hasta 16527 kg ha⁻¹, con un promedio de 8430 kg ha⁻¹ en los tratamientos sin K y 9342 kg ha⁻¹ en los tratamientos fertilizados con K. En soja, el rendimiento varió desde 1044 hasta 5101 kg ha⁻¹, con un promedio de 2767 kg ha⁻¹ en los tratamientos sin K y 2957 kg ha⁻¹ en los tratamientos con K. Además, la respuesta en rendimiento presentó una alta variabilidad, con valores que oscilaron entre 284 y 1536 kg ha⁻¹ en maíz y entre -57 y 252 kg ha⁻¹ en soja dentro del rango intercuartílico (Q1-Q3; **Figura 2A**), con incrementos superiores al 7% en el 50 % de los casos (**Figura 2B**).

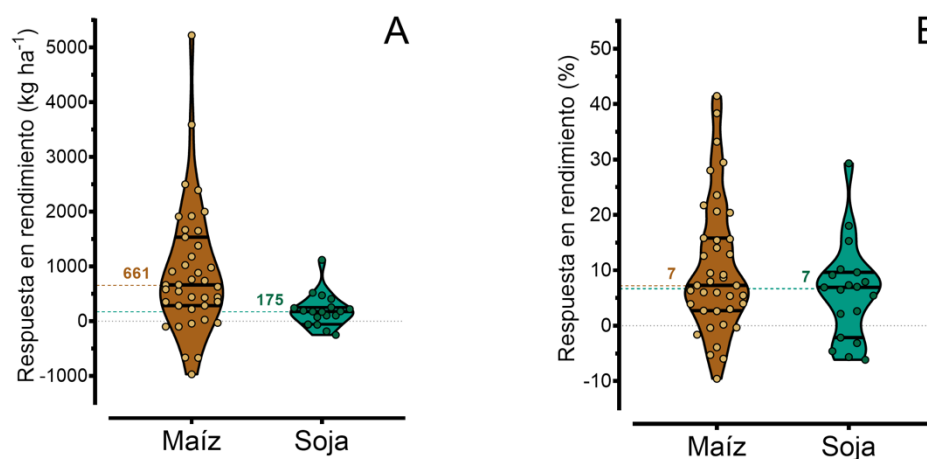


Figura 2. Distribución de la respuesta en rendimiento a la fertilización potásica en maíz y en soja en la región Chaco-Pampeana de Argentina, expresada en kg ha^{-1} (A) y en porcentaje (B), entre las campañas agrícolas 2019/2020 y 2023/2024. En los gráficos de violín, las regiones más anchas representan una mayor densidad de observaciones. Las líneas horizontales superior e inferior representan a los cuartiles Q1 y Q3, respectivamente, mientras que la línea discontinua horizontal y su valor indican la mediana de la respuesta.

Calibración de métodos de diagnóstico de potasio

Se modeló el RR en función de la concentración de K_i y K_{ni} para maíz y soja, y se determinó que los $IC_{95\%}$ del UC no difieren entre cultivos ($p > 0,05$, datos no mostrados). Por lo tanto, la **Figura 3** muestra el modelo de calibración arcoseno-logaritmo que incluyó a ambos cultivos para cada método de extracción. Estudios previos de calibración en suelos de la región pampeana de Argentina y Uruguay también informaron un solo UC para más de un cultivo extensivo (Barbazán et al., 2011; Orcellet et al., 2022, 2025).

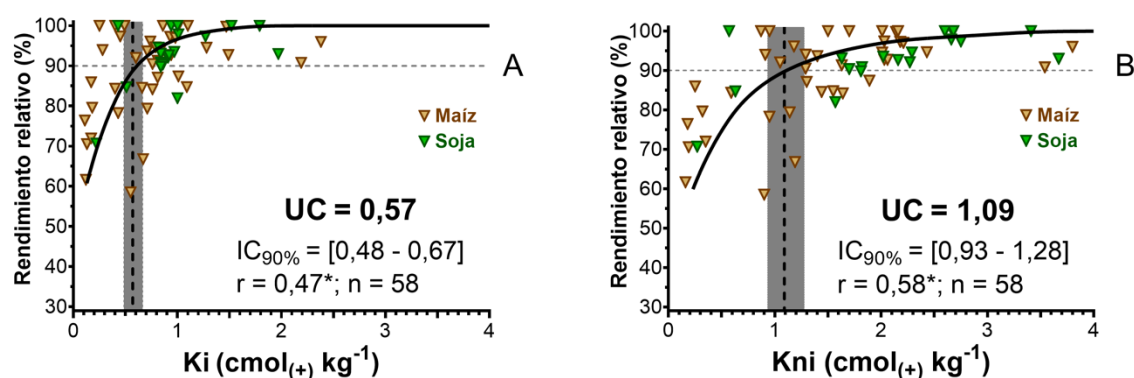


Figura 3. Relación entre el rendimiento relativo en maíz y soja en función de la concentración de K intercambiable (K_i) y K no intercambiable (K_{ni}) en los primeros 0-20 cm del suelo. Las líneas verticales discontinuas indican el umbral crítico (UC) al 90% de rendimiento relativo en K_i (A) y K_{ni} (B), mientras que la región sombreada en gris representa su intervalo de confianza al 90% ($IC_{90\%}$). Abreviación: r, coeficiente de correlación de Pearson; *, correlación significativa ($p < 0,05$); n, cantidad de observaciones.

Se observó una correlación significativa entre el RR de ambos cultivos y el K_i y K_{ni} ($r = 0,47$ y $r = 0,58$, respectivamente; $p < 0,05$), siendo superior el modelo que consideró K_{ni} . Orcellet et al. (2022) informaron una correlación mayor ($r = 0,55$) entre el RR y el K_i extraído con AcNH_4 en suelos de la Mesopotamia de Argentina. En un estudio posterior, Orcellet et al. (2025) reportaron una correlación similar a la del presente estudio ($r = 0,49$) en suelos de la región pampeana. Esta diferencia podría atribuirse a una mayor variabilidad en la composición mineralógica y en el contenido de arcillas de los suelos incluidos en estudios de mayor cobertura geográfica.

El UC de K_i determinado por el modelo ($0,57 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) fue mayor que el UC de $0,34 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ reportado por Barbazán et al. (2011) en suelos agrícolas de Uruguay. A su vez, el $IC_{90\%}$ ($0,48-0,67 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) fue ligeramente mayor que el $IC_{90\%}$ ($0,40-0,54 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) informado por Orcellet et al. (2025). Por otro lado, el UC de K_{ni} ($1,09 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) fue un 91 % mayor que el UC de K_i . También superó ligeramente los UC de K_{ni} reportados por Breker et al. (2019) en suelos de Dakota del Norte, Estados Unidos. En dicho estudio, los UC determinados con NaBPh_4 fueron de $0,85 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ en el modelo lineal-plateau ($R^2 = 0,33$; $p > 0,05$) y $0,99 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ en el modelo cuadrático-plateau ($R^2 = 0,36$; $p > 0,05$).

Los UC calibrados de K_i y K_{ni} son consistentes con la información presentada en la **Tabla 1**, debido a que los valores de K_{ni} fueron siempre mayores que los de K_i . Dado que el $NaBPh_4$ extrae el K en solución, junto con el K_i y el K_{ni} , se sugiere que esta última fracción de K contribuyó de manera relevante al K disponible en los suelos de esta región. Por otro lado, la mayor relación entre el RR y K_{ni} , en comparación con el K_i , se atribuyó a la menor cantidad de experimentos sin respuesta a la fertilización ubicados en el cuadrante superior izquierdo del modelo (**Figuras 3A y 3B**). Estos datos respaldan el uso del K_{ni} como método de diagnóstico de potasio en suelos con alta variabilidad mineralógica y de contenido de arcillas.

>. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que tanto la determinación de K_i como K_{ni} permiten calibrar la respuesta en rendimiento para maíz y soja en suelos de la región Chaco-Pampeana. Aunque K_i presentó un umbral crítico de $0,57 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ (223 mg kg^{-1}), K_{ni} se destacó como una alternativa superior para predecir la respuesta a la fertilización con K, con un umbral crítico de $1,09 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ (426 mg kg^{-1}).

>. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los productores, asesores y técnicos de campo que contribuyeron a la ejecución de los ensayos en campo, así como a todos los integrantes del grupo “Relación Suelo-Cultivo” del IPADS Balcarce por su valiosa colaboración. Esta investigación fue financiada por el proyecto INTA 2023-PE-L01-I012 (Intensificación Sostenible de la Agricultura Extensiva en la Región Pampeana) y el laboratorio de suelos del IPADS Balcarce.

>. REFERENCIAS

- Barbazán, M., Bautes, C., Beux, L., Bordoli, M., Cano, J. D., Ernst, O., García, A., García, F., & Quincke, A. (2011). Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay*, 15(2), 93–99.
- Barbagelata, P. A., & Mallarino, A. P. (2013). Field correlation of potassium soil test methods based on dried and field-moist soil samples for corn and soybean. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), 318–327.
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39–45.
- Breker, J. S., DeSutter, T., Rakkar, M. K., Chatterjee, A., Sharma, L., & Franzen, D. W. (2019). Potassium requirements for corn in North Dakota: Influence of clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 83(2), 429–436.
- Bilias, F., & Barbayiannis, N. (2017). Evaluation of sodium tetraphenylboron ($NaBPh_4$) as a soil test of potassium availability. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4), 468–476.
- Biscaye, P. E. (1965). Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76(7), 803–832.
- Correndo, A. A., Salvagiotti, F., García, F. O., & Gutiérrez-Boem, F. H. (2017). A modification of the arcsine–log calibration curve for analysing soil test value–relative yield relationships. *Crop and Pasture Science*, 68(3), 297–304. <https://doi.org/10.1071/CP16444>

- Correndo, A. A., Rubio, G., García, F. O., & Ciampitti, I. A. (2021).** Subsoil-potassium depletion accounts for the nutrient budget in high-potassium agricultural soils. *Scientific Reports*, 11, 11597. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90297-1>
- Cox, A. E., Joern, B. C., Brouder, S. M., & Gao, D. (1999).** Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 902–911.
- Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996).** Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (Vol. 5, pp. 551–574). Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Huang, P. M. (2005).** Chemistry of potassium in soils. In M. A. Tabatabai & D. L. Sparks (Eds.), *Chemical processes in soils* (pp. 227–292). Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Larrea, G., Wyngaard, N., Eyherabide, M., Reussi Calvo, N. I., Puricelli, M. M., Barbieri, P., Angelini, H. P., Salvagiotti, F., & Sainz Rozas, H. R. (2023).** Cation nutrient reserves decline markedly under intensive cropping of Pampas Mollisols. *Catena*, 223, 106916. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106916>
- McLean, E. O., & Watson, M. E. (1985).** Soil measurements of plant-available potassium. In R. D. Munson (Ed.), *Potassium in agriculture* (pp. 277–308). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Morrás, H., Altinier, M. V., Castiglioni, M., Grasticini, G., Ciari, G., & Cruzate, G. (2002).** Origen y distribución del potasio en suelos de la región Chaco-pampeana. En M. E. Melgar, H. Magen, & R. A. Lavado (Eds.), *El potasio en sistemas agrícolas argentinos* (pp. 35–47). Buenos Aires, Argentina: Instituto Internacional de la Potasa – INTA.
- Núñez, A., & Morón, A. (2017).** Potassium dynamics in Western Uruguayan agricultural Mollisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(21), 2558–2572.
- Orcellet, J. M., Quintero, C., Figueroa, E., González San Juan, M. F., & García, F. O. (2022).** Potasio en cultivos extensivos del litoral argentino. En *Memorias del XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* (pp. 710–714). Buenos Aires, Argentina.
- Orcellet, J.M., Quintero, C., Salvagiotti, F., Sainz Rozas, H., Ventimiglia, L., Ferraris, G., Figueroa, E., Boxler, M., Kehoe, E., Biassoni, M.M., Damianidis, D., González Sanjuan, M.F., Ciarlo, E., García, F (2025).** Potasio: Explorando deficiencias y respuestas a la fertilización en las regiones pampeana y mesopotámica argentinas. Aceptado, En Prensa – Ciencia del Suelo.
- Pearce, A. W., Slaton, N. A., Lyons, S. E., Bolster, C. H., Bruulsema, T. W., Grove, J. H., Jones, J. D., McGrath, J. M., Miguez, F. E., Nelson, N. O., Osmond, D. L., Parvej, M. R., Pena-Yewtukhiw, E. M., & Spargo, J. T. (2022).** Defining relative yield for soil test correlation and calibration trials in the Fertilizer Recommendation Support Tool. *Soil Science Society of America Journal*, 86(5), 1338–1353. <https://doi.org/10.1002/saj2.20450>
- Peech, M. (1965).** Hydrogen-ion activity. In C. A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (pp. 914–926). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Robinson, G. W. (1922).** A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *The Journal of Agricultural Science*, 12(3), 306–321.

- Sainz Rozas, H. R., Eyherabide, M., Larrea, G., Martínez Cuesta, N., Angelini, H., Reussi Calvo, N. I., & Wyngaard, N. (2019).** *Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana* (Informe técnico, 42 pp.). Balcarce, Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Sainz Rozas, H.R., Avila, O., Romero, J., Eyherabide, M., Aparicio, V., García, F., Reussi Calvo, N., Wyngaard, N., González San Juan, M.F., Ciarlo, E., Angelini, H., Sanzano, A., Torrieli, S., Saperdi, A., Saperdi, A.J., Orcellet, J., & Stahringer, N. (2024).** Impacto de la agricultura sobre los cationes básicos en el NOA y el NEA argentino. En *Libro de actas XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* (pp. 678-683). Catamarca, Argentina.
- Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (1996).** Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. In F. R. Magdoff, M. A. Tabatabai, & E. A. Hanlon Jr. (Eds.), *Soil organic matter: Analysis and interpretation* (SSSA Special Publication 46, pp. 21–31). Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Warncke, D., & Brown, J. R. (1998).** Potassium and other basic cations. In J. R. Brown (Ed.), *Recommended chemical soil test procedures for the North Central region* (North Central Regional Publication No. 221 (Rev.), Missouri Experiment Station Publication SB 1001, pp. 31–33). Columbia, MO: University of Missouri.

Modelos para apoyar el manejo sitio-específico de la fertilización nitrogenada en trigo en el centro oeste bonaerense

► ► Rompani J.M.¹, Mercau J.L.² y Pagani A.³

¹Profesional Independiente; ²INTA, AER San Luis, Argentina; ³Clarion, 9 de Julio, Buenos Aires

✉ juanmrompani@gmail.com

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron i) caracterizar la variabilidad espacial y temporal del rendimiento, la respuesta óptima económica a nitrógeno (RespN), la dosis óptima económica de N (DOE) y la eficiencia agronómica del uso de N del fertilizante (EUNf) para el cultivo de trigo en el centro oeste bonaerense y ii) generar modelos predictivos del rendimiento de trigo sin N (RendN0), el rendimiento a la dosis óptima económica (RendDOE) y la DOE para apoyar el manejo de la fertilización nitrogenada. Se realizaron 63 ensayos en micro parcelas a campo, durante 7 campañas entre 2013 y 2022. Se relevaron 21 variables explicativas estáticas y dinámicas hasta el momento de la fertilización, a inicios del estadio de macollaje. Se cuantificó la variabilidad espacio-temporal de las variables respuesta y se desarrollaron modelos para explicar el RendN0, el RendDOE y la DOE. Las predicciones más robustas resultaron de la combinación de variables explicativas estáticas y dinámicas mediante modelos multivariados de aprendizaje automático no paramétricos de árboles de decisión. El modelo para el RendN0 presentó una bondad de ajuste del 72% de la variabilidad, con una raíz del cuadrado medio del error absoluto (RMSE) de 622 kg de trigo ha⁻¹ y relativo (RRMSE) de 17%. El RendDOE presentó un 61% de ajuste con un RMSE de 1039 kg de trigo ha⁻¹ y RRMSE de 20%. Para la DOE el ajuste fue del 51%, RMSE de 49 kg N ha⁻¹ y RRMSE de 49%. La precipitación acumulada en el periodo marzo-julio (Pp_mar_jul) y la elevación relativa del terreno (Rel_Elev) fueron los factores de mayor relevancia dentro de los árboles para explicar las variables respuesta. Variables clásicas de diagnóstico de N, como el contenido de N-NO₃ a 60 cm (N-nitrato) y el nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan), no fueron suficientes para explicar la DOE utilizadas de manera independiente.

>. PALABRAS CLAVE

Trigo, nitrógeno, manejo sitio-específico, dosis óptima económica, respuesta a nitrógeno, variabilidad, espacial, temporal, árboles de decisión, aprendizaje automático.

>. INTRODUCCIÓN

La “brecha de rendimiento” (van Ittersum et al., 2013) del trigo argentino es mayor al 40% y se podría reducir a la mitad (Aramburu Merlos et al. 2015). La limitación nutricional es una de sus principales causas (Monzón y Grassini, en preparación) siendo el nitrógeno (N) el nutriente más relevante (Havlin et al., 2005). El exceso de N, representa una pérdida económica, porque no genera respuesta adicional en el rendimiento y es una fuente potencial de contaminación de los recursos agua y aire (Rockström et. al. 2020). El déficit de N, limita el rendimiento por disminuir la fotosíntesis y la partición de biomasa hacia estructuras reproductivas (Abbate et al., 2017), pudiendo también reducir la rentabilidad (Scharf y Lory, 2000) y provocar minería del suelo (Angus y Grace, 2017). En Argentina, la acumulación de años sin reposición de nutrientes provocó la aparición paulatina de suelos empobrecidos y con respuestas de gran magnitud a la fertilización nitrogenada (García y San Juan, 2013). Como además los fertilizantes nitrogenados tienen alta importancia relativa dentro del costo productivo, resulta crítico contar con herramientas para determinar el nivel de este insumo que maximiza la rentabilidad del cultivo (Jaynes et al, 2011).

Para elaborar recomendaciones de fertilización de N en trigo, existen métodos de diferente grado de complejidad, que consideran con distinto énfasis el requerimiento de N por parte del cultivo (demanda) y el aporte de N del suelo (oferta). Una metodología simple ampliamente utilizada para determinar las necesidades de N del trigo y otros cereales consiste en estimar la demanda de N en función de un rendimiento que sería factible lograr en el lote (Stanford, 1973) multiplicado por una variable empírica local que estima el N adicional requerido para optimizar ese rendimiento (Halvorson et al., 1987). El método de balance (de Wit, 1953), agrega complejidad al descomponer por un lado la demanda, en la absorción de N (Bray, 1954) y su eficiencia de conversión en grano, es decir, la eficiencia fisiológica de utilización de N (EUN), y por otro, contemplar distintos componentes de la oferta de N en el sistema y su eficiencia de captura (Gastal et al., 2015). En cuanto a la oferta de N, se adicionan la disponibilidad inicial en el suelo, el aporte durante el cultivo de la mineralización desde la MO, la descomposición de los residuos remanentes de cultivos anteriores y el agregado en los fertilizantes, a los que se restan las pérdidas a las que esos aportes, en distinto grado, están expuestos por volatilización, desnitrificación y lixiviación (García y Berardo, 2005). La oferta de N inicial del suelo se suele estimar midiendo la cantidad de N-NO₃ en los primeros 60 cm de profundidad (N-nitrato), asumiendo que el contenido por debajo en el perfil del suelo es poco o muy poco variable entre años (Meisinger, 1984). También, suele estimarse el aporte por mineralización como fracción del N orgánico total o del N potencialmente mineralizable, mediante incubaciones de suelo en laboratorio (Schepers y Meisinger, 1994). Dada la variabilidad de todos sus parámetros (Neeteson, 1990), los balances dan resultados medios aceptables, pero con demasiada variabilidad para su aplicación en cada lote (Álvarez et al., 2013).

Aunque los balances han tenido cierto grado de adopción, el enfoque habitual para el diagnóstico de N en trigo que domina en Argentina es la simple combinación del análisis del contenido de N-nitrato al momento de la siembra (Magdoff et al., 1984) y un umbral al que se debe alcanzar mediante la adición de fertilizantes para no limitar el rendimiento, en base a relaciones empíricas previas (Barbieri et al., 2012). A esta metodología de diagnóstico se le ha incorporado recientemente la determinación del N incubado en anaerobiosis (Nan) como estimador de la variabilidad de oferta por mineralización durante el ciclo del cultivo (Reussi Calvo et al., 2013). Por otra parte, se han propuesto métodos ópticos reactivos que comparan al cultivo durante el ciclo respecto a una condición de suficiencia de N mediante determinaciones de clorofila en hoja o la cuantificación de la cobertura o la intensidad de verdor del canopeo para decidir la fertilización en etapas más avanzadas del desarrollo del cultivo (Raun et al., 2002). También, se han desarrollado modelos funcionales simples de la variabilidad de los parámetros de los métodos de balances, mediante relaciones empíricas robustas entre variables ambientales y las respuestas del cultivo (González Montaner et al., 1997) y más complejos que simulan la acción e interacción de distintos procesos que explican el crecimiento de los cultivos y la dinámica de la oferta y

captura de agua y nutrientes desde el suelo, dentro de los cuales existen de paso diario (Ritchie y Otter, 1985) o basados en simulaciones previas (Satorre et al., 2005). Sin embargo, la efectividad de estos enfoques se ve comprometida por la variabilidad temporal y espacial de la demanda y la oferta de N y su consecuente asincronía (Tremblay et al., 2012), o su utilización es limitada por la disponibilidad de los datos de entrada requeridos (Basso et al., 2011) y el entrenamiento del usuario.

Para manejar la fertilización afrontando el efecto de la variabilidad ambiental sobre la oferta y demanda de N, es útil distinguir entre variables estáticas, que en un sitio no cambian entre campañas o lo hacen muy lentamente, y variables dinámicas, cuyos valores experimentan importantes cambios interanuales o dentro de una misma campaña (Puntel et al., 2019). El contenido de MO y la textura han sido indicados como las propiedades edáficas que mejor describen las variaciones en la productividad de los cultivos (Díaz-Zorita et al., 1999). Sin embargo, el relevamiento de estas variables a una escala espacial muy detallada representa un costo económico muy elevado, no resultando “costo-efectivo”. Por lo tanto, es útil el relevamiento de variables correlacionadas menos costosas como la topografía o la CEa (Kitchen et al., 2003).

Frente a la variabilidad espacial edáfica y topográfica intra lote, la dosificación uniforme de fertilizante nitrogenado puede resultar en excesos e insuficiencias de N (Fiez et al., 1995). El manejo sitio-específico de la nutrición nitrogenada es un enfoque que permite optimizar la EUN (Mamo et al., 2003) mediante la identificación de zonas dentro de un lote de producción con características semejantes, en las que la combinación de los factores limitantes del rendimiento y la respuesta a N se consideran homogéneos, siendo potencialmente factible implementar una estrategia de manejo común (Doerge y Gardner, 1999). Sin embargo, la información sitio-específica sobre las respuestas de los cultivos a N es limitada (Trevisan et al., 2021) y los beneficios de esta tecnología a menudo no son comprendidos (Lobell, 2007).

Dado que la fertilización impacta en la producción, tiene un costo económico y su exceso puede aumentar el impacto ambiental negativo, la recomendación de la dosis de fertilizante debe basarse en maximizar el beneficio económico en lugar del rendimiento del grano (Mallarino, 2004). El máximo retorno a la fertilización nitrogenada (Sawyer et al., 2006) se logra utilizando la dosis óptima económica de N (DOE), que es la cantidad de N del fertilizante necesaria para lograr un rendimiento económico máximo, considerando los costos de los insumos y su relación con el precio del producto (Loewy y Ron, 1995). Esta recomendación proporciona un N crítico por encima del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización decrece abruptamente y el incremento de rendimiento por unidad de N adicional no cubre el costo del insumo agregado (Correndo et al., 2021a).

Las metodologías de aprendizaje automático, como los algoritmos no paramétricos de árboles de decisión, son herramientas útiles para modelar respuestas que incluyen no linealidad, interacción entre variables explicativas y problemas de multicolinealidad (Grömping, 2009). Estos modelos permiten identificar patrones repetibles en grandes conjuntos de datos y brindan la oportunidad de incrementar la previsibilidad en sistemas complejos (Jordan y Mitchell, 2015). Existen casos en que se los ha implementado como una herramienta relativamente simple, potente y de fácil interpretación en la predicción de la variación del rendimiento dentro de lotes de producción (Ransom et al., 2019).

Aunque los principios del manejo sitio-específico son transferibles entre regiones, las estrategias de fertilización con dosis variable deben ser modeladas localmente porque las condiciones edáficas y climáticas son variables (Anselin, 2004). Este tipo de abordaje requiere de bases de datos lo suficientemente grandes y balanceadas para poder entender interacciones complejas. En el centro oeste bonaerense no existe suficiente información sobre la variabilidad espacial y temporal del rendimiento, la respuesta a N, la DOE y la eficiencia agronómica del uso de N del fertilizante (EUNf) para manejar el cultivo de trigo en un planteo de agricultura de precisión por lo que los objetivos de este trabajo fueron i) caracterizar la variabilidad espacial y temporal del rendimiento, la respuesta óptima económica a nitrógeno (RespN), la DOE y EUNf para el cultivo de trigo en el centro oeste bonaerense y ii) generar modelos predictivos del rendimiento de trigo sin N (RendNO), el rendimiento a la dosis óptima económica (RendDOE) y la DOE para apoyar el manejo de la fertilización nitrogenada.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo 63 ensayos en micro parcelas (3 m de largo y 2 m de ancho) a campo, con dosis creciente de N 0, 25, 50, 100, 150, 200 y 250 kg ha⁻¹, en un diseño de bloques completos aleatorizados, con tres repeticiones para los tratamientos fertilizados y seis repeticiones para los testigos sin N. Los sitios, en posiciones del paisaje y tipos de suelo contrastantes, se localizaron en 7 campos de los partidos de 9 de Julio, 25 de Mayo y General Viamonte, Buenos Aires, Argentina, durante 7 campañas (2013 – 2022). Los suelos presentaron textura franco-arenosa, siendo Hapludoles típicos, Hapludoles énticos, Hapludoles árgicos y thapto-árgicos. La fuente de N utilizada fue urea granulada aplicada al voleo en forma manual, entre la siembra y el inicio de macollaje del trigo (Z20-Z23). Se relevaron 21 variables explicativas estáticas y dinámicas, mediante caracterización ambiental intensiva con rastra Veris 3100 y GPS RTK, muestreo y análisis de suelo y recolección de información meteorológica de cada campaña hasta el momento de fertilización (Tabla 1). La relación entre el rendimiento y la dosis de N se sintetizó a partir de modelos matemáticos de respuesta cuadráticos plateau y cuadráticos (significativos cuando $P < 0,1$ y en caso contrario, sin respuesta a N), desde los cuales se calcularon las variables “componentes de la respuesta” a la fertilización, estableciendo la derivada primera de la curva de respuesta ajustada a una relación de precios histórica de 6:1 para el N y el precio del grano de trigo (US\$ kg⁻¹ N: US\$ kg⁻¹ grano). Se cuantificó la variabilidad espacio-temporal del RendN0 (kg de trigo ha⁻¹), el RendDOE (kg de trigo ha⁻¹), la RespN (kg de trigo ha⁻¹), la DOE (kg N ha⁻¹) y la EUNf (kg de trigo kg N⁻¹). El nivel de fertilización económicamente óptimo se determinó como la dosis para la cual la eficiencia agronómica marginal (la derivada) es igual a la relación de precios insumo-producto. La RespN, se calculó como la diferencia entre el RendDOE y el RendN0. La EUNf se calculó mediante la relación entre la RespN y la DOE. Cuando el experimento no tuvo respuesta significativa al agregado de N se asumió RendDOE y RendN0 iguales al promedio del ensayo, y DOE, RespN y EUNf igual a cero. El rendimiento en grano fue determinado mediante la cosecha manual de espigas y ajustado a 14% de humedad. Se desarrollaron modelos de regresión lineal simple y múltiple (MLM) con el paquete “leaps” del software R y se construyeron árboles de decisión mediante la biblioteca “rpart”, para explicar el RendN0, el RendDOE y la DOE. La evaluación se realizó por validación cruzada con 10 subgrupos y se seleccionaron los mejores modelos mediante R², raíz del cuadrado medio del error absoluto (RMSE) y relativo (RRMSE).

Tabla 1. Descripción y valores observados de las variables estáticas y dinámicas relevadas en los ensayos de N en trigo para las campañas 2013-2022 en el centro oeste bonaerense.

Acronimo	Explicación	Unidad	Rango observado	Promedio
Variables estáticas (cambian lentamente a través del tiempo o no cambian)				
MO	Materia orgánica del suelo (0-20 cm de profundidad)	%	1,5-5,7	3,1
Arena	Contenido de arena (0-20 cm de profundidad)	%	25-80	55
Arena_20_60	Contenido de arena (20-60 cm de profundidad)	%	25-82,5	60
Arcilla	Contenido de arcilla (0-20 cm de profundidad)	%	6,5-23	13,5
Arcilla_20_60	Contenido de arcilla (20-60 cm de profundidad)	%	7-30	15
CS	Contenido de arcilla y limo (0-20 cm de profundidad)	%	20-75	45
CS_20_60	Contenido de arcilla y limo (20-60 cm de profundidad)	%	18-75	40
MO_CS	Materia orgánica del suelo en relación a partículas finas (0-20 cm de profundidad)	-	0,045-0,113	0,069
CEa30	Conductividad eléctrica aparente del suelo (30 cm de profundidad)	mS m ⁻¹	4-37	11
CEa90	Conductividad eléctrica aparente del suelo (90 cm de profundidad)	mS m ⁻¹	4-52	15
Rel_Elev	Elevación relativa	m	-1,8-2,4	0,06
SCA	Área de cuenca específica	valor de pixel	0,1-331	30
TWI	Índice topográfico de humedad	valor de pixel	4-12	7
Pendiente	Pendiente del terreno	%	0,1-3,1	1
PEF	Profundidad efectiva del suelo	cm	55-sin limitantes	-
Variables dinámicas (cambian rápidamente a través del tiempo)				
SW	Agua inicial (0-100 cm de profundidad)	mm	142-417	252
N-nitrato	Contenido de N-NO ₃ (0-60 cm de profundidad)	kg ha ⁻¹	17-110	53
N _{an}	Nitrógeno incubado en anaerobiosis (0-20 cm de profundidad)	mg kg ⁻¹	23-106	63
N _{an_CS}	Nan en relación a la partículas finas (0-20 cm de profundidad)	-	0,6-3	1,4
N _{an_MO}	Nan en relación a la materia orgánica del suelo (0-20 cm de profundidad)	-	7,5-34,7	21,3
Pp_mar_jul	Precipitaciones acumuladas en el periodo marzo-julio	mm	132-603	324

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observó una amplia variabilidad de las variables respuesta en los 63 ensayos de N durante el periodo 2013-2022 (Figura 1). El RendN0 promedio fue 3613 kg ha⁻¹ con un rango explorado desde 1484 hasta 5880 kg ha⁻¹, similar a lo informado por Barraco et al. (2009) en el noroeste bonaerense. La campaña 2019 fue la de mayor RendN0 promedio con 4943 kg ha⁻¹ y 2022 la de menor, con 2378 kg ha⁻¹. El RendDOE promedio fue 5068 kg ha⁻¹ (Figura 1), un 43% superior al promedio zonal de 3540 kg ha⁻¹ (Andrade y Satorre, 2015), posiblemente debido al material genético y rendimiento potencial inferior de las variedades implementadas en ese estudio. El RendDOE mostró una variación desde 1500 hasta 8350 kg de trigo ha⁻¹, similar a lo reportado por Videla Mensegue et al. (2021) en condiciones edáficas y climáticas comparables.

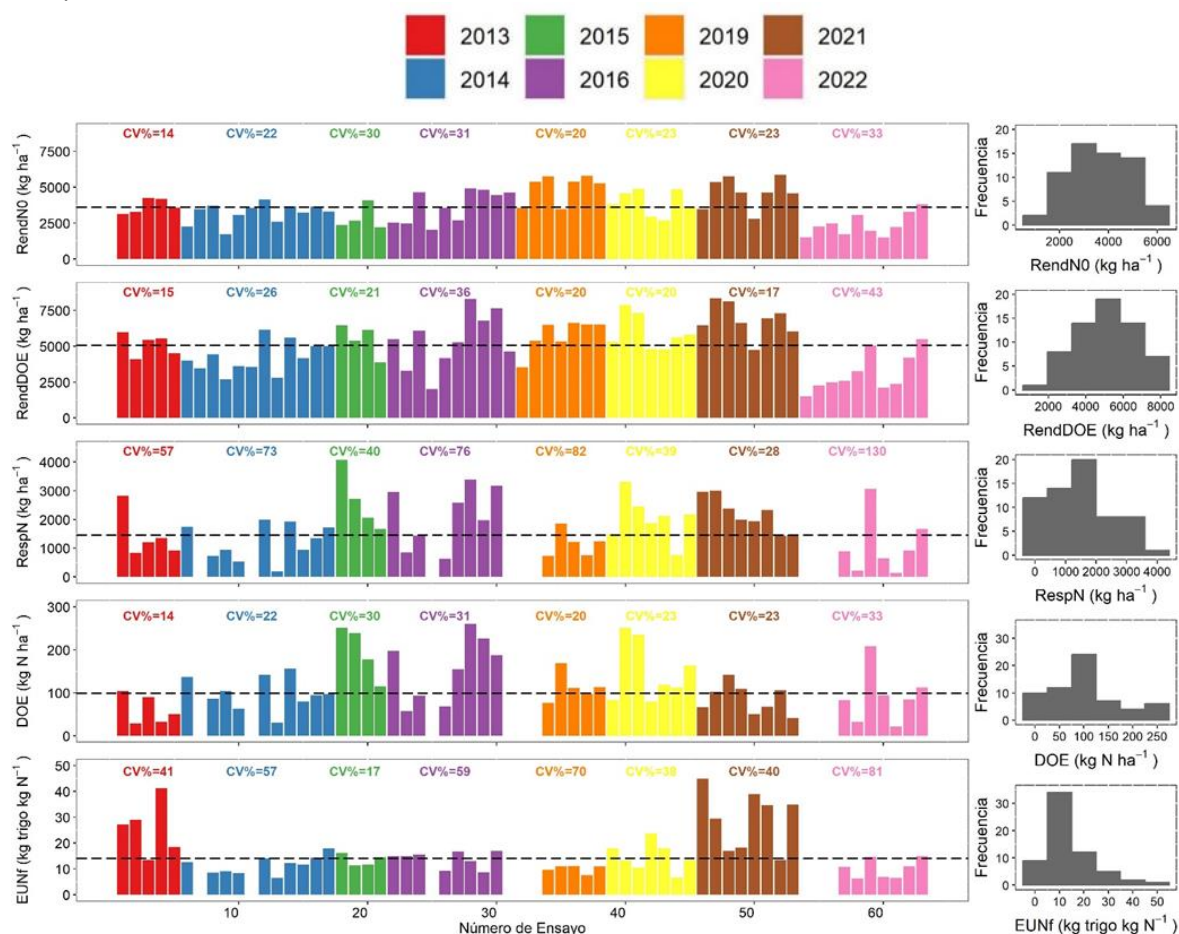


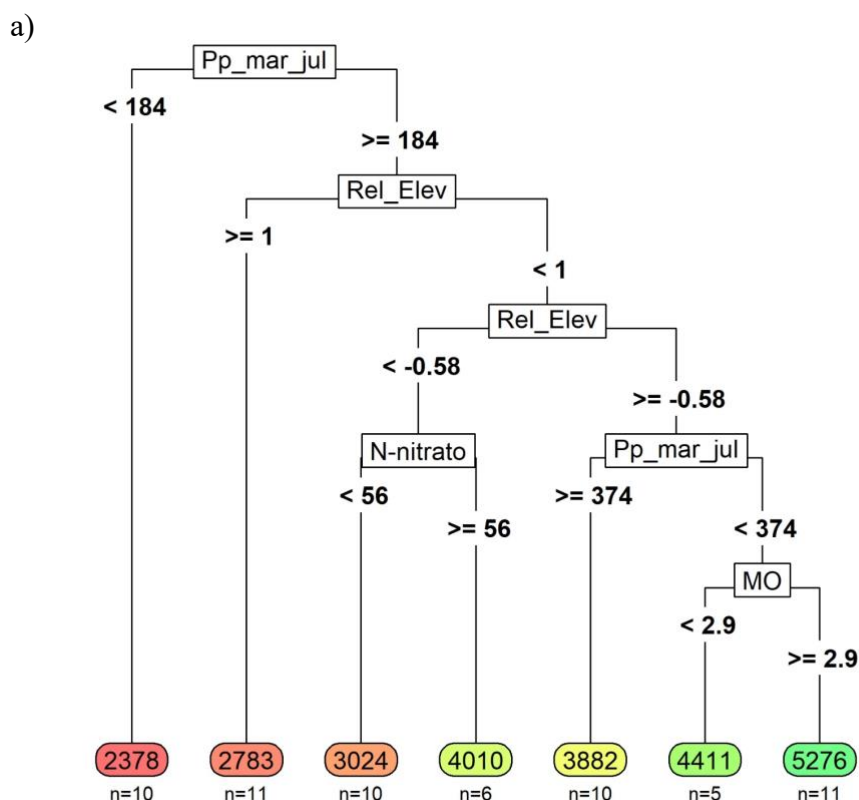
Figura 1. Variabilidad observada del rendimiento testigo sin N (RendN0), el rendimiento a la DOE (RendDOE), la respuesta a N (RespN), la dosis óptima económica (DOE) y la eficiencia de uso de N del fertilizante (EUNf) en cada ensayo de N en microparcelas de trigo para las campañas 2013-2022 (cada color es una campaña) en el centro oeste bonaerense. El histograma de frecuencias presenta la distribución de cada variable en el rango explorado. La línea punteada indica el valor promedio de cada variable.

La RespN varió desde 0 hasta 4076 kg de trigo ha⁻¹, con un promedio de 1455 kg ha⁻¹, que representa un 40% de incremento de rendimiento con respecto al tratamiento sin fertilizar con N, en línea con lo reportado por de Lara et al. (2023). La campaña de mayor RespN promedio fue la 2015 (muy húmeda) con 2628 kg de trigo ha⁻¹ (81% superior al promedio de los ensayos) y la de menor fue 2022 (muy seca) con un promedio de 752 kg de trigo ha⁻¹ de RespN (48% inferior al promedio de los ensayos; Figura 1).

La DOE promedio de los 63 ensayos fue 99 kg N ha^{-1} , un 39% superior a la dosis promedio nacional de 71 kg N ha^{-1} (Bolsa de Cereales, 2020), con una variación espacio-temporal de 0 a 260 kg N ha^{-1} (Figura 1). El grado de variabilidad, producto de las relaciones complejas entre el suelo, el clima y el manejo que gobiernan los rendimientos en respuesta al N en cereales (Morris et al., 2018), confirma que la DOE no puede ser generalizada en una región o lote de producción (Scharf et al., 2005). En el 65% de los casos (41 ensayos) la DOE estuvo por encima de la media utilizada a nivel de producción, respaldando la existencia de una importante brecha nutricional en el cultivo (Mueller et al., 2012). La campaña de mayor DOE promedio fue 2015 con 195 kg N ha^{-1} (97% superior al promedio de todos los ensayos), que fue el año de mayores excesos hídricos y sitios con valores bajos de N-nitrato, MO y Nan (datos no mostrados). Contrariamente, 2013 fue la campaña de menor DOE, 61 kg N ha^{-1} (68% inferior al promedio de los ensayos), con bajas precipitaciones y demanda de N (RendDOE bajo; Figura 1).

El promedio de EUNf fue $14 \text{ kg de grano de trigo kg N}^{-1}$, similar a la determinada para el sudeste de la provincia de Buenos Aires (González Montaner et al., 1991) y superior a otros ensayos en la región. En el noroeste bonaerense, Barraco et al (2009) obtuvieron un promedio inferior de $8,9 \text{ kg de grano kg N}^{-1}$, relativamente similar a los $7 \text{ kg de grano kg N}^{-1}$ reportados hacia el oeste arenoso y La Pampa por Bono y Álvarez (2009). Pacin (2004) informó $3,5 \text{ kg de grano kg N}^{-1}$ en el sudoeste bonaerense. Una mayor disponibilidad hídrica durante todo el ciclo del cultivo, respecto a otras zonas de menor pluviometría, y el avance genético que el cultivo ha experimentado durante la última década (Cassman y Dobermann, 2022), podrían explicar las mayores eficiencias. La EUNf explorada varió desde 0 hasta $45 \text{ kg de trigo kg N}^{-1}$, siendo 2021 la campaña de mayor EUNf promedio con $29 \text{ kg de trigo kg N}^{-1}$ (207% superior) y 2022 la de menor con $7 \text{ kg de trigo kg N}^{-1}$ (50% inferior; Figura 1).

La predicción más robusta de las variables respuesta resultó de la combinación de variables estáticas y dinámicas mediante modelos de aprendizaje automático no paramétricos de árboles de decisión. El modelo para el RendNO presentó un desempeño satisfactorio con una bondad de ajuste del 72% de la variabilidad, RMSE de $622 \text{ kg de trigo ha}^{-1}$ y RRMSE de 17% (Figura 2).



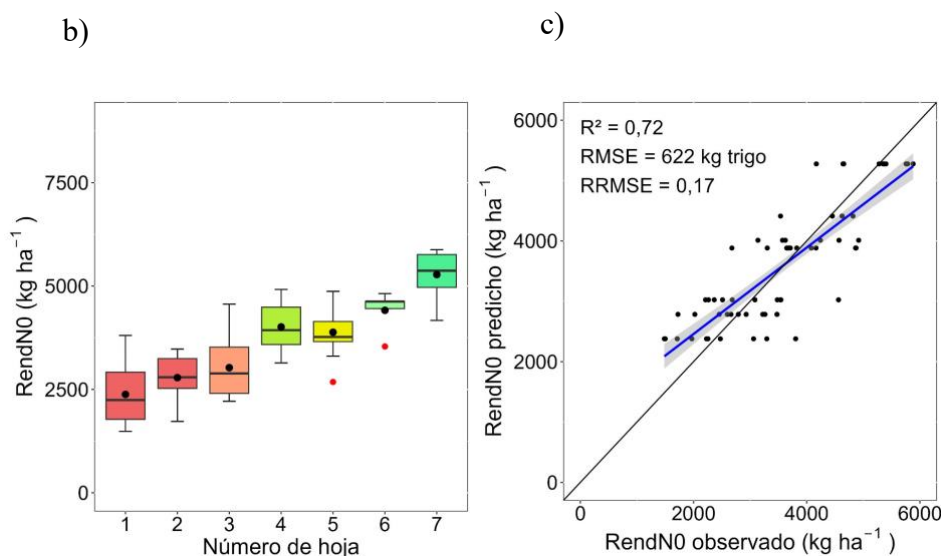
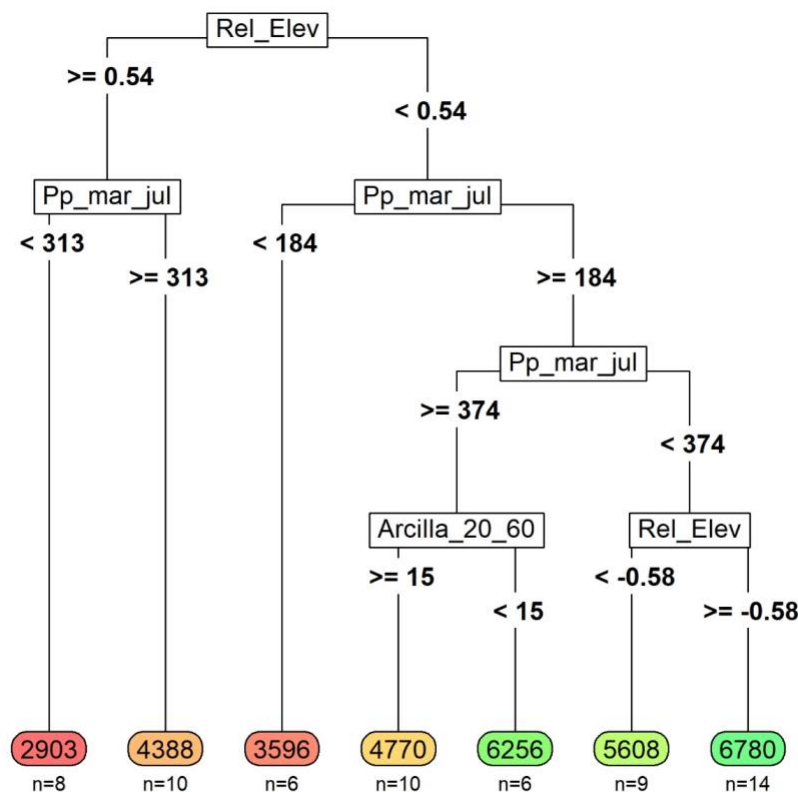


Figura 2. Árbol de decisión al momento de fertilización (AF) para el rendimiento sin nitrógeno aplicado (RendN0; a) que incluye como variables explicativas a las precipitaciones acumuladas en el período marzo-julio (Pp_mar_jul), la elevación relativa (Rel_elev), la materia orgánica (MO) y el contenido de nitrógeno como nitrato a 60 cm (N-nitrato); gráfico de cajas para las hojas del árbol (b) y relación observados-predichos (c).

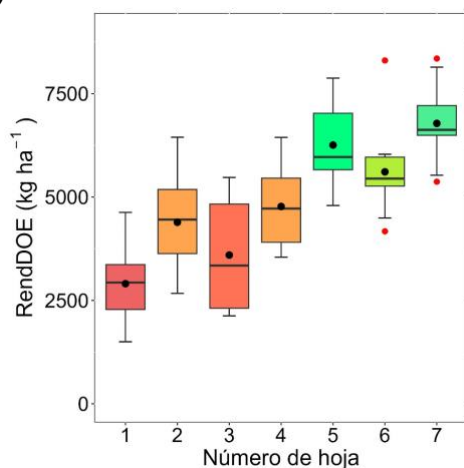
La Pp_mar_jul fue la variable que más contribuyó en explicar el RendN0, seguido de la Rel_Elev en interacción con variables como la MO y el N-nitrato, principalmente asociadas con la oferta de N del suelo. Sitios con menor Pp_mar_jul (<184 mm) y en posiciones topográficas elevadas (Rel_Elev > 1 m) presentaron los menores RendN0. Una restricción hídrica frecuentemente más severa y, una baja oferta de N del suelo, podrían explicar esa separación. En los sitios con menor Rel_Elev (<-0,58 m) de mayor disponibilidad hídrica, un mayor nivel de N-nitrato (>56 kg N ha⁻¹) incrementó el RendN0. En posiciones del relieve intermedias, años muy húmedos (Pp_mar_jul >374 mm) resultaron en menor RendN0, atribuible al incremento de pérdidas de N del suelo y al efecto intrínseco del exceso hídrico sobre el crecimiento del cultivo. En situaciones sin limitación hídrica ni excesos evidentes, el RendN0 se incrementó a mayor nivel de MO (>2,9%), posiblemente por una mayor contribución de la mineralización a la nutrición del cultivo (Figura 19). Trabajos de maíz en la zona, también observaron incrementos del RendN0 con mayores contenidos de MO, relacionado al aporte de N por mineralización (Puntel y Pagani, 2013).

El árbol de decisión para el RendDOE presentó un 61% de ajuste con un RMSE de 1039 kg trigo ha⁻¹ y RRMSE de 20% (Figura 3). La topografía, mediante la Rel_Elev, fue la variable más importante para explicar el RendDOE, siendo los sitios más elevados los que frecuentemente tuvieron menor RendDOE. Otros trabajos también han reportado una influencia importante de la elevación del terreno sobre la performance del cultivo (Sudduth et al., 1997). La Pp_mar_jul fue la segunda variable en orden de importancia para predecir el RendDOE. En sitios de posiciones topográficas elevadas (>0,54m) y baja Pp_mar_jul (<313 mm), se observaron los menores RendDOE. Cuando la Pp_mar_jul fue muy baja (<184 mm), posiciones topográficas intermedias y bajas (<0,54m), también limitaron el RendDOE (Figura 20). La recarga del perfil, posiblemente más abajo que el primer metro medido en SW, y tal vez el ascenso de la napa, podrían explicar un aumento del RendDOE. Es importante destacar que en sitios con abundante Pp_mar_jul (>= 374 mm) y elevado contenido de Arcilla_20_60 (>15%) se observó menor RendDOE que en aquellos de textura más gruesa. Esa combinación de precipitaciones y posibles impedancias en el perfil para infiltración, o el uso de agua en profundidad, pueden generar anegamientos que penalizan la productividad del cultivo (Nosseto et al., 2009). La presencia de impedancias físicas asociada a una menor PEF, aun no siendo un impedimento tan fuerte, pueden restringir el normal crecimiento del cultivo (Passioura y Stirzaker, 1993). Otros sitios con Pp_mar_jul suficiente (de 184 a 374 mm), presentaron los mayores RendDOE en posiciones topográficas intermedias (Rel_Elev desde -0,58m hasta 0,54m) y disminuyeron hacia posiciones inferiores (Figura 3).

a)



b)



c)

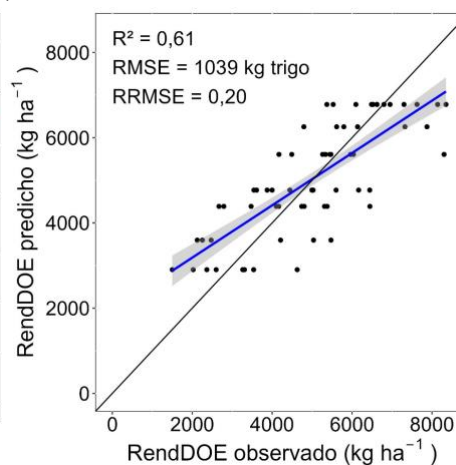
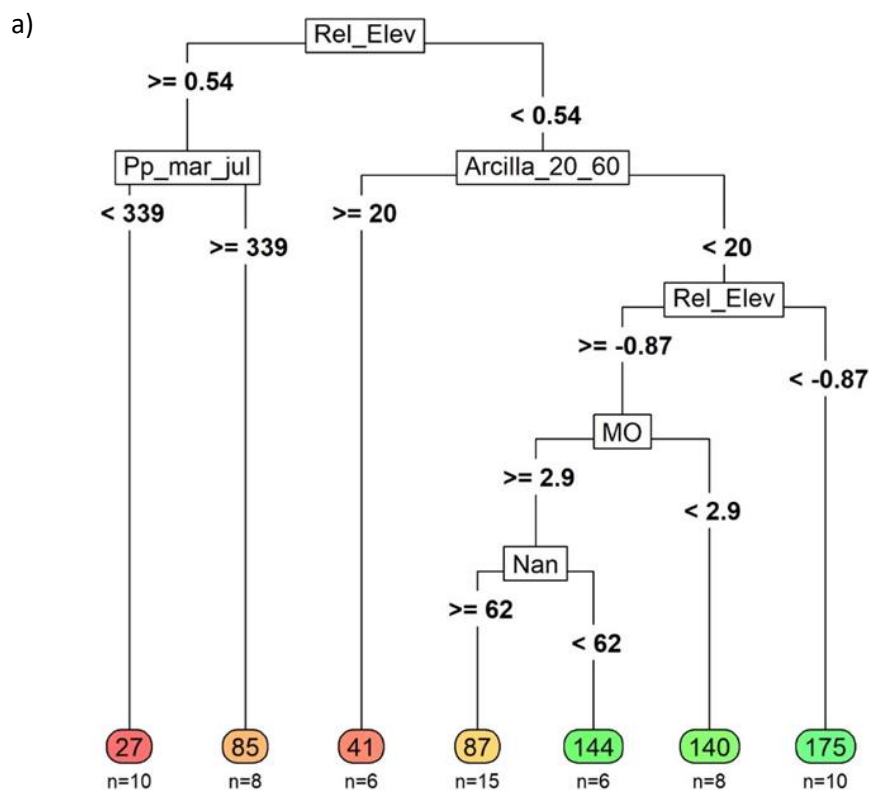


Figura 3. Árbol de decisión al momento de fertilización (AF) para el rendimiento a la dosis óptima económica de nitrógeno (RendDOE; a) que incluye como variables explicativas a las precipitaciones acumuladas en el período marzo-julio (Pp_mar_jul), la elevación relativa (Rel_elev) y el contenido de arcilla del suelo 20-60 cm (Arcilla_20_60); gráfico de cajas para las hojas del árbol (b) y relación observados-predichos (c).

Para la DOE el ajuste del modelo fue del 51% de la variabilidad, con un RMSE de 49 kg N ha⁻¹ y RRMSE de 49% (Figura 4). Si bien la magnitud de este error supera lo aceptable para utilizar esta herramienta en forma estricta en una recomendación de dosis de fertilización nitrogenada, se considera como un marco de referencia sólido sobre el cual pueden ajustarse las decisiones contemplando otros factores. Otros trabajos, han informado modelos de predicción de DOE de N en cereales con despeños comparables a los

aquí presentados (Ransom et al., 2023; Thorburn et al., 2024). La variable de mayor importancia para explicar la DOE fue la Rel_Elev, disminuyendo la DOE hacia posiciones topográficas más elevadas (Rel_Elev >0,54 m) y sitios de menor Pp_mar_jul, que indicaría limitantes para el crecimiento asociadas al déficit hídrico con precipitaciones insuficientes. También, la DOE fue baja en sitios con elevado contenido de Arcilla_20_60 (>20%), que pueden limitar la exploración radical y disponibilidad hídrica (Sadras y Calviño, 2001). Los sitios de menor Rel_Elev (<-0,87m) y contenido de Arcilla_20_60 inferior a 20%, fueron los de mayor DOE predicha, probablemente relacionados a una mayor demanda de N debido a una elevada capacidad de almacenaje de agua del perfil del suelo y a mayores pérdidas potenciales de N del sistema (Johnson II et al., 2022). La DOE predicha para las posiciones topográficas intermedias, dependieron del nivel de MO y Nan como indicadores de la oferta de N del suelo (Figura 4). Jaynes et al. (2011), trabajando en una región húmeda de EEUU, en campañas con niveles de precipitación promedio, observaron mayor DOE en zonas de mayor elevación dentro de un lote respecto de las zonas más deprimidas y atribuyeron este comportamiento al menor aporte de N edáfico. Sin embargo, estos autores reportaron también un comportamiento inverso en una campaña con precipitaciones por encima del promedio y sugirieron que las mayores DOE, en las zonas más deprimidas, podrían deberse a procesos de pérdidas de N. En un estudio realizado en Córdoba, en años con precipitaciones mayores al promedio histórico, la DOE en maíz fue superior en posiciones elevadas de la topografía y menor en sitios bajos (Bongiovanni, 2002). Por el contrario, en años secos, esta relación se invirtió drásticamente siendo conveniente fertilizar solamente en las zonas de menor elevación. Según Girón (2019), en ensayos de maíz de campañas húmedas del oeste bonaerense, la DOE fue mayor en las áreas con presencia de horizonte thapto que en las áreas de suelo profundo. En este sentido, Varsa et al. (2003) y Ruffo et al. (2006) también observaron mayor DOE en zonas de menor drenaje y por lo tanto más propensas a sufrir pérdidas de N por desnitrificación.

Cabe mencionar que la concentración de arena en el suelo presentó la mayor explicación de la DOE como variable simple mediante una relación cuadrática ($r^2 = 0,42$; RMSE = 62 kg N ha⁻¹ y RRMSE = 63%). Mientras que variables clásicas utilizadas en modelos zonales de diagnóstico de N como el N-nitrato y el Nan no fueron significativas para explicar la DOE de manera independiente. A su vez, la potencia de los MLM se vio limitada debido a su dificultad para modelar efectos no lineales (datos no mostrados).



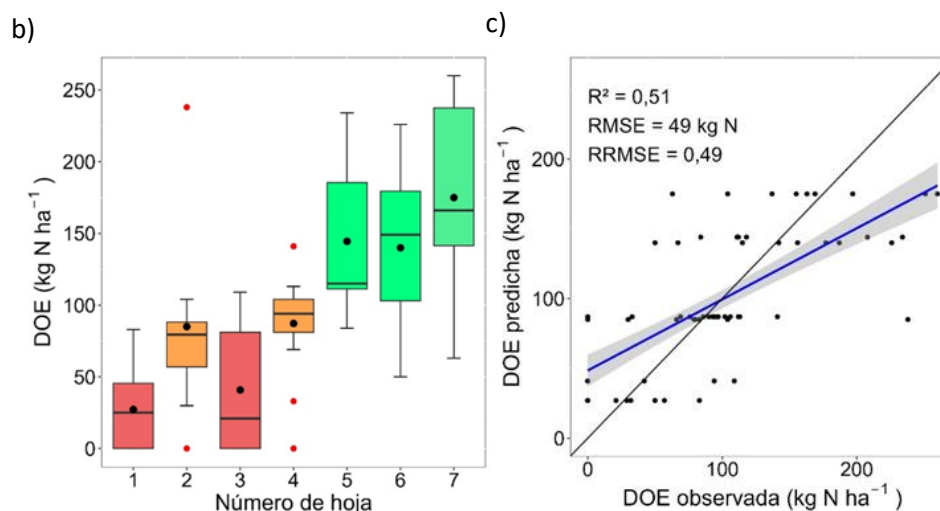


Figura 4. Árbol de decisión al momento de fertilización (AF) para la dosis óptima económica (DOE; a) que incluye como variables explicativas a la elevación relativa (Rel_elev), las precipitaciones acumuladas en el período marzo-julio (Pp_mar_jul), el contenido de arcilla del suelo 20-60 cm (Arcilla_20_60), la materia orgánica (MO) y el nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan); gráfico de cajas para las hojas del árbol (b) y relación observados-predichos (c).

>. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación de siete años, sobre 63 ensayos de fertilización nitrogenada en el centro oeste bonaerense, en el cual se relevaron un total de 21 variables, se cuantificó simultáneamente la magnitud de la variabilidad espacio-temporal de la DOE, información hasta el momento inexistente en la región y se desarrollaron modelos para guiar en la toma de decisión de la fertilización nitrogenada, que consideran tanto la variabilidad edáfica y topográfica como la meteorológica. Los modelos desarrollados son sitio-específicos y cubren el espacio entre modelos simples (de una sola variable) y más complejos como los de simulación. El nivel de error fue razonable y dentro de los rangos reportados por otros estudios de manejo de N en cereales.

El modelo de aprendizaje automático no paramétrico de árbol de decisión, que contempla la no linealidad e interacción entre los factores, presentó la mayor capacidad explicativa del RendN0, el RendDOE y la DOE. Las variables clásicas de diagnóstico de N, como el N-nitrato y el Nan, no fueron significativas para explicar la DOE utilizadas de manera independiente. La precipitación marzo-julio (Pp_mar_jul) y la elevación relativa (Rel_Elev) fueron las variables explicativas más relevantes.

>. AGRADECIMIENTOS

A los productores agropecuarios y asesores que colaboraron con la experimentación: familia Lugano (Establecimiento “El Arapey”, 9 de Julio), Germán Molea (Zavalía, Gral. Viamonte), Norma Pedemonte (establecimiento “Don Atilio”, 9 de Julio), Ana Laura Rebottaro, familia Pagani (establecimientos “San Lorenzo” y “El Señuelo”, 9 de Julio), Alejandro Mulcahy (Establecimiento “Las Chicas”, 9 de julio), Zacarías Nicola (Escuela Inchausti, 25 de Mayo) y Lisandro Torrens Baudrix (INTA 9 de Julio).

A los investigadores Matías Ruffo, Fernando Miguez, Paula Girón, Gustavo Striker, Flavio Gutierrez-Boem, Fernando Salvagiotti y Pablo Calviño quienes realizaron aportes muy valiosos que enriquecieron este trabajo. Al equipo de trabajo de Clarion, Guadalupe Picardo, Fermín Aristi y Gerónimo González, quienes participaron de la investigación.

>. REFERENCIAS

- Abbate, P.E. 2017. Bases ecofisiológicas del manejo del cultivo de trigo en la región pampeana. Pp. 33–52 en Divito, G.A. y García, F. (eds.) Manual del Cultivo de Trigo. International Plant Nutrition Institute.
- Álvarez, R., Prystupa, P., Rodríguez, M.B. y Álvarez, C.R. 2013. Fertilización de cultivos y pasturas. diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Andrade, J. y Satorre, E., 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, 177: 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.008>
- Angus, J.F. y Grace, P.R. 2017. Nitrogen balance in Australia and nitrogen use efficiency on Australian farms. *Soil Research*, 55: 435. <https://doi.org/10.1071/SR16325>
- Anselin, L., Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. 2004. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management and corn production. *American Journal of Agricultural Economics*, 86 (3): 675-687.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J. P., Mercáu, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., Jobbagy, E., Cassman, K. G. y Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184: 145–154. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2015.10.001>
- Barbieri, P.A., Echeverría H.E. y Saíenz Rozas, H.R. 2012. Alternatives for nitrogen diagnosis for wheat with different yield Potentials in the Humid Pampas of Argentina. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(11): 1512-1522, DOI: 10.1080/00103624.2012.675388
- Barraco, M., Díaz-Zorita, M., Brambilla, C., Álvarez, C. y Sciancia, C. 2009. Respuesta del trigo a la fertilización nitrogenada y nitroazufrada en suelos arenosos. EEA INTA General Villegas. *Ciencia del suelo*, 27: 217–224.
- Basso, B., Ritchie, J.T., Cammarano y D., Sartori, L. 2011. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *European Journal of Agronomy* 35: 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.06.004>
- Bongiovanni, R. 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN (EUA), 280 p.
- Bono, A. y Álvarez, R. 2009. Rendimiento de trigo en la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana: un modelo predictivo de la respuesta a la fertilización nitrogenada. International Plant Nutrition Institute. *Informaciones Agronómicas*, 41: 18-21. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2009-1>
- Bray, R.H. 1954. A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. *Soil Science*, 104:9-22.
- Brye, K.R., Norman, J.M., Gower, S.T. y Bundy, L.G. 2003. Methodological limitations and N-budget differences among a restored tall grass prairie and maize agro-ecosystems. *Agric Ecosyst Environ* 97: 181–198. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00067-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00067-7)
- Cassman, K.G. y Dobermann, A. 2022. Nitrogen and the future of agriculture: 20 years on. *Ambio*, 51: 17–24. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01526-w>
- Correndo, A.A., Gutiérrez-Boem, F.H., García, F.O., Álvarez, C., Álvarez, C., Angeli, A., Barbieri, P., et al. 2021a. “Attainable Yield and Soil Texture as Drivers of Maize Response to Nitrogen: A Synthesis Analysis for Argentina.” *Field Crops Research*, 273: 108-299. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>.
- de Lara, A., Mieno, T., Luck, J.D. y Puntel, L.A. 2023. Predicting site-specific economic optimal nitrogen rate using machine learning methods and on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*, 24: 1792–1812. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10018-8>

- de Wit, C. T. 1953. A physical theory on placement of fertilizers. [external PhD, WU]. Staatsdrukkerij. <https://edepot.wur.nl/345397>
- Díaz Valdéz, S.T., García, F.O. y Caviglia, O.P. 2020. Calibración de umbrales críticos de nitrógeno disponible en el suelo para maíz tardío en Entre Ríos. *Ciencia del Suelo*, 38: 106–120.
- Doerge, T.A. y Gardner, D.L., 1999. On-Farm Testing Using the Adjacent Strip Comparison Method. Pp. 603–609 en *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/1999.precisionagproc4.c59>
- Fiez, T.E., Pan, W.L. y Miller, B.C. 1995. Nitrogen efficiency analysis of winter wheat among landscape positions. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 1666-1671.
- García, F. y Berardo, A. 2005. Trigo. Pag. 233-253. En H. Echeverría y F. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- García, F. y González Sanjuan, M. F. 2013. La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 9:2-7. International Plant Nutrition Institute, Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2013-9>.
- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J.L. y Louarn, G. 2015. Chapter 8 - Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. Pp. 161–206 en Sadras, V.O., Calderini, D.F. (Eds.), *Crop Physiology (Second Edition)*. Academic Press, San Diego. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00008-X>
- Girón, P. 2019. Manejo sitio - específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el noroeste bonaerense". Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados. <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2021gironpaula>
- González Montaner, J., Maddonni, G., Mailland, N. y Porsborg, M. 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). *Ciencia del Suelo*, 9:41-51.
- González Montaner, J., Maddonni, G. y Dinapoli, M. 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research*, 51: 241-252. [10.1016/S0378-4290\(96\)03459-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)03459-4).
- Grömping, U., 2009. Variable importance assessment in regression: linear regression versus random forest. *The American Statistician*, 63: 308–319. <https://doi.org/10.1198/tast.2009.08199>.
- Halvorson, A.D., Alley, M.M. y Murphy, L.S. 1987. Nutrient Requirements and Fertilizer Use. Pp. 345–383 in: *Wheat and Wheat Improvement*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr13.2ed.c18>
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L y Nelson, W.L. 2005. *Soil fertility and fertilizers* 7th ed. Pp. 515. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Jaynes, D.B., Kaspar T.C. y Colvin, T.S. 2011. Economically Optimal nitrogen Rates of Corn: Management Zones Delineated from Soil and Terrain Attributes. *Agronomy Journal*, 103: 1026-1035.
- Johnson II, F.E., Lerch, R.N., Motavalli, P.P., Veum, K.S. y Scharf, P.C. 2022. Spatial variability of denitrification enzyme activity and actual denitrification emissions on Missouri claypan soils. *Soil Science Society of America Journal* 86, 1582–1596. <https://doi.org/10.1002/saj2.20457>
- Jordan, M.I. y Mitchell, T.M., 2015. Machine learning: trends, perspectives, and prospects. *Science* 349, 255–260. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>.
- Kitchen, N.R., Drummond, S.T., Lund, E.D., Sudduth, K.A. y Buchleiter, G.W. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal*, 95: 483–495.
- Lobell, D.B., 2007. The cost of uncertainty for nitrogen fertilizer management: A sensitive analysis. *Field Crops Research*, 100: 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.007>.
- Loewy, T. y Ron, M. 1995. Nitrogen fertilization recommendations for wheat in Southwestern Buenos Aires, Argentina. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 26: 2041–2049. <https://doi.org/10.1080/00103629509369427>

- Magdoff, F.R., Ross, D. y Amadon, J. 1984. A soil test for nitrogen availability to maize. *Soil Science Society of America Journal*, 48:1301-1304.
- Mallarino, A.P. 2004. Testing of soils. Pp. 143–149 In: Hillel D, Hatfield JL (eds) *Encyclopedia of soils in the environment*. Elsevier, Amsterdam
- Mamo, M., Malzer, G., Mulla, D., Huggins, D. y Stroock, J. 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agronomy Journal*, 95:958-964.
- Meisinger, J. 1984. Evaluating Plant-Available Nitrogen in Soil-Crop Systems. Pp. 389-416 in Hauck, R.D. (ed) *Nitrogen in Crop Production*. John Wiley & Sons, Ltd, <https://doi.org/10.2134/1990.nitrogenincropproduction.c26>
- Melchiori R. 2000. Variabilidad espacial del rendimiento en trigo, asociación con parámetros edáficos y evaluación de aplicación de nitrógeno para sitios específicos. Tesis para optar el título de Magister en Ciencias Agrárias. Universidad Nacional de Mar del Plata - Facultad de Ciencias Agrárias Balcarce. 95 p
- Morris, T.F., Murrell, T.S., Beegle, D.B., Camberato, J.J., Ferguson, R.B., Grove, J., Ketterings, Q., Kyveryga, P.M., Laboski, C.A.M., McGrath, J.M., Meisinger, J.J., Melkonian, J., Moebius-Clune, B.N., Nafziger, E.D., Osmond, D., Sawyer, J.E., Scharf, P.C., Smith, W., Spargo, J.T., van Es, H.M. y Yang, H., 2018. Strengths and Limitations of Nitrogen Rate Recommendations for Corn and Opportunities for Improvement. *Agronomy Journal*, 110: 1–37. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.02.0112>
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N., Foley, J.A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490: 254–257. <https://doi.org/10.1038/nature11420>
- Neeteson, J.J. 1990. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fertilizer Research*, 26: 291–298. <https://doi.org/10.1007/BF01048767>
- Nosetto, M., Jobbágy, E., Jackson, R. y Sznaider, G., 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research*, 113: 138–148.
- Pacin, F. 2004. Análisis de los factores determinantes del rendimiento del trigo en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires Trabajo Final de la Especialización en Fertilidad y uso de Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, 30 p.
- Passioura, J.B. y Stirzaker, R.J. 1993. Feedforward Responses of Plants to Physically Inhospitable Soil. Pp. 715–719 in: *International Crop Science I*. John Wiley & Sons, Ltd, <https://doi.org/10.2135/1993.internationalcropscience.c114>
- Puntel, L. y Pagani, A. 2013. Site-specific analysis of maize yield response to nitrogen in Argentina. *ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings*, Madison, WI, USA.
- Puntel, L.A., Pagani, A. y Archontoulis, S.V., 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *European Journal of Agronomy* 105, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.003>
- Ransom, C., Kitchen, N., Camberato, J., Carter, P., Ferguson, R., Fernández, F., Franzen, D., Laboski, C., Myers, D., Nafziger, E., Sawyer, J. y Shanahan, J. 2019. Statistical and machine learning methods evaluated for incorporating soil and weather into corn nitrogen recommendations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164: 104872. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104872>
- Ransom, C., Kitchen, N., Camberato, J., Carter, P., Ferguson, R., Fernández, F., Franzen, D., Laboski, C., Myers, D., Nafziger, E. y Sawyer, J. 2023. Combining Corn N Recommendation Tools for an Improved Economical Optimal Nitrogen Rate Estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 87: 902–917. <https://doi.org/10.1002/saj2.20539>
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Mullen, R.W., Freeman, K.W., Thomason, W.E. y Lukina, E.V. 2002. Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Grain Production with Optical Sensing and Variable Rate Application. *Agronomy Journal*, 94: 815–820. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.8150>
- Reussi Calvo, N.I., Sainz Rozas, H.R., Echeverría H.E. y Berardo, A. 2013. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agronomy Journal*, 105:321-328.

- Ritchie, J.T. y Otter, S. 1985. Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. ARS wheat yield project, 38: 159-175.
- Rockström, J., Edenhofer, O., Gaertner, J. y DeClerck, F. 2020. Planet-proofing the global food system. Nat Food, 1: 3–5. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>
- Ruffo, M. L., Bollero, G. A., Bullock, D. S. y Bullock, D. G. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. Precision Agriculture, 7(5): 327–342. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9016-7>
- Sadras, V.O. y Calviño, P.A., 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. Agronomy Journal, 93: 577–583. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.933577x>
- Satorre, E.H., Menéndez, F., Tinghitella, G y Cavasassi, J.L. 2005. TRIGUERO: Un sistema de apoyo a la fertilización nitrogenada de Trigo. Convenio AACREA y PROFERTIL S.A., software de aplicación agronómico.
- Sawyer, J.E., Nafziger, E.D., Randall, G.W., Bundy, L.G., Rehm, G.W. y Joern, B.C. 2006. Concepts and Rationale for Regional Nitrogen Rate Guidelines for Corn.
- Scharf, P.C. y Lory, J.A. 2000. Calibration of remotely-sensed corn color to predict nitrogen needs. In Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- Scharf, P.C., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Davis J.G., Hubbard, V.C. y Lory, J.A. 2005. Field-Scale Variability in Optimal Nitrogen Fertilizer Rate for Corn. Agronomy Journal, 97: 452-461.
- Schepers, J.S. y Meisinger, J.J., 1994. Field Indicators of Nitrogen Mineralization. Pp. 31–47 in: Soil Testing: Prospects for Improving Nutrient Recommendations. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub40.c3>
- Shaner, D., Khosla, R., Brodahl, M., Buchleiter, G. y Farahani, H. 2008. How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? Agronomy Journal, 100:1472-1480.
- Stanford, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. Journal of Environmental Quality, 2:159–166.
- Sudduth, K.A., Drummond, S., Birrell, S. y Kitchen, N. 1997. Spatial modeling of crop yield using soil and topographic data. Precision Agriculture, 97.
- Thorburn, P.J., Biggs, J.S., Puntel, L.A., Sawyer, J.E., Everingham, Y.L. y Archontoulis, S.V. 2024. The nitrogen fertilizer conundrum: why is yield a poor determinant of crops' nitrogen fertilizer requirements? Agronomy for Sustainable Development, 44(2): 18. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00955-7>
- Tremblay, N., Bouroubi, Y.M., Belec, C., Mullen R.W., Kitchen N.R., Thomason, W.E., Ebelhar, S., Mengel, D.B., Raun, W.R., Francis, D.D., Vories, E.D. y Ortiz-Monasterio I. 2012. Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather. Agronomy Journal, 104:1658–1671.
- Trevisan, R., Bullock, D. y Martin, N. 2021. Spatial variability of crop responses to agronomic inputs in on-farm precision experimentation. Precision Agriculture, 22(2): 342–363. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09720-8>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>.
- Varsa, E.C., Ebelhar, S.A., Wyciskalla, T.D., Hart, C.D. y Robertson, G.K. 2003. Using historical yield patterns in fields as a management tool to variably apply nitrogen. In Proceedings North-Central Extension-Industry Soil Fertility Conference, 19:61–75. Potash and Phosphate Institute, Brookings. SD.
- Videla Mensegue, H., Barraco, M., Álvarez, C., Miranda, W., Rampo, M., Pereyro, A., Macchiavello, A., Ferro, M. y Varillas, G. 2021. Estimación del rendimiento de trigo en función del agua disponible y la profundidad de napa. IX Congreso Nacional de Trigo. Calidad y sustentabilidad. Tres Arroyos, Argentina.

Gestión del nitrógeno en maíz: balance entre productividad y sostenibilidad

► ► Iglesias, MP^{1*}, Wyngaard N^{1,2}, Sainz Rozas HR^{1,2,3},
Lewczuk N³, Toribio M⁴, García FO¹ & Reussi Calvo NI^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP. ²CONICET. ³EEA INTA Balcarce. ⁴Profertil S.A.

✉ paulliglesias11@gmail.com

>. INTRODUCCIÓN

La baja recuperación del nitrógeno (N) por parte de los cultivos durante la estación de crecimiento (~50%) (Herrera et al., 2016; Norton & Ouyang, 2019) se debe a procesos de pérdidas como lavado de nitrato (Aparicio et al., 2015), volatilización de amoníaco (NH₃) y emisión de óxido nitroso (N₂O) (Lassaletta et al., 2014). Esta baja recuperación implica pérdidas de rendimiento, bajas eficiencias en el uso de N y un impacto ambiental negativo. Dado que el N es uno de las principales limitantes en el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.), luego de la disponibilidad de agua, es fundamental seleccionar la dosis, fuente, momento y método de aplicación correcto que permitan sincronizar la oferta del nutriente con la demanda del cultivo (You et al., 2023), y en consecuencia, reducir las pérdidas de N (Woodley et al., 2020; Ferland et al., 2024).

Se ha determinado que los híbridos modernos de maíz, en ambientes sin limitaciones hídricas, pueden absorber hasta el 40% del N acumulado a madurez fisiológica durante la etapa post-floración (Maltese et al., 2024). Esta característica fisiológica permitiría aplicar parte del N al inicio y el resto en etapas avanzadas del cultivo, sin afectar la absorción de N por parte del cultivo. Estas aplicaciones divididas de N ayudarían a disminuir las externalidades de la fertilización, dado que algunas investigaciones previas indicaron que aplicaciones de N en V₁₃ como urea (46-0-0) pueden reducir las emisiones de NH₃ y N₂O bajo distintos escenarios climáticos (Kabir et al., 2021). Sin embargo, estos resultados provienen de simulaciones y no de ensayos a campo, lo que subraya la necesidad de estudios experimentales que validen estos hallazgos en condiciones reales de producción.

Además del fraccionamiento de la dosis de N, existen otras estrategias para reducir el impacto ambiental de la fertilización. En este sentido, varios investigadores han enfocado su estudio en el efecto de los inhibidores de la nitrificación o de la actividad ureásica (Thapa et al., 2016, Silva et al., 2016), o la interacción de estos con diferentes dosis de N, formas de aplicación (Silva et al., 2016; Drury et al. 2017; Woodley et al., 2020), o momentos de aplicación (i.e. siembra o estados vegetativos tempranos) sobre las pérdidas gaseosas (Martins et al., 2017). Sin embargo, no hay información que compare en simultáneo el efecto del riego, el fraccionamiento de la dosis de N y la fuente sobre las pérdidas gaseosas.

A su vez, algunos trabajos como el de Said et al. (2023) indican que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, por ende, la huella de carbono (C) estarían siendo sobreestimadas según las estimaciones realizadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), por lo que es necesario contar con información local. Por lo tanto, los objetivos de este trabajo fueron evaluar el efecto del fraccionamiento de la dosis combinado con diferentes fuentes de N en maíz bajo condiciones de riego y secano sobre: a) las pérdidas de N por volatilización, b) la emisión de N_2O , c) el rendimiento en grano y d) la huella de carbono.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio y diseño experimental

Se realizó un experimento bajo condiciones de riego y secano durante dos campañas (2022-2023 y 2023-2024, campaña 1 y 2, respectivamente) en Balcarce. Se seleccionó un híbrido adaptado a la región (Pioneer 1815). La fecha de siembra fue el 24 y 17 de octubre para la campaña 1 y 2, respectivamente. Se evaluó un tratamiento testigo (0 kg N ha^{-1}), una dosis de 200 kg N ha^{-1} aplicada en el estado de cuatro hojas desarrolladas (V_4) (Ritchie y Hanway, 1982) y la misma dosis de N fraccionada en V_4 y floración (R_1) del maíz (120 y 80 kg N ha^{-1} , respectivamente); combinadas con tres fuentes de N [Urea, Urea-Limus (inhibidor de la actividad ureásica) y Urea-DMPP (inhibidor de la nitrificación)], en condiciones de riego y secano. El diseño experimental se realizó en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Se trabajó sin limitaciones de fósforo (P) y azufre (S) para lo cual se aplicó a la siembra 20 kg P ha^{-1} y 20 kg S ha^{-1} , respectivamente.

A partir de las variables precipitación, lámina de riego y evapotranspiración potencial, se realizó un balance hídrico para el cultivo de maíz, adaptando el modelo de Della Maggiora et al. (2003). Dicho balance permitió monitorear la demanda del cultivo y así programar el momento y la lámina de riego a aplicar. A la siembra del cultivo se realizó una caracterización inicial del sitio experimental, para lo cual se tomaron muestras de suelo en superficie (0-20 cm) para determinar pH (Thomas y Hargrove, 1984), materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), nitrógeno mineralizado en incubación anaeróbica (Nan) (Keeney y Nelson, 1983), P-Bray (Bray y Kurtz, 1945) y zinc (Lindsay y Norvell, 1978); y en el perfil (0-20, 20-40 y 40-60 cm) para N-nitrato ($N-NO_3^-$) (Keeney y Nelson, 1983) (**Tabla 1**).

Tabla 1. Variables edáficas para cada campaña. MO: materia orgánica, Nan: nitrógeno mineralizado en incubación anaeróbica, P-Bray: P extractable, Zn-DTPA: zinc, N-NO₃⁻: nitrato en 0-60 cm.

Campaña	pH	MO (g kg ⁻¹)	Nan (mg kg ⁻¹)	P-Bray (mg kg ⁻¹)	Zn-DTPA (mg kg ⁻¹)	N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)
		-----0-20 cm-----				0-60 cm
1	5,6	44	40	67	1,4	97
2	6,1	47	57	37	1,6	28

Determinación de las pérdidas gaseosas

Se determinó la volatilización diaria de N-NH₃ utilizando un sistema estático semiabierto (Miola et al., 2015). Las mediciones se iniciaron en el momento de la aplicación del fertilizante, luego de V₄ en todos los tratamientos y luego de R₁ en los tratamientos testigo y de dosis fraccionada. Dichas mediciones se continuaron hasta que las pérdidas de los tratamientos fertilizados fueron insignificantes e igualaron al testigo, o se registró una lluvia mayor a 10 mm (Silva et al., 2017). A su vez, empleando la metodología de cámaras estáticas ventiladas (Clough et al., 2020), se determinó la emisión de N-N₂O a los 4, 8 y 12 días desde la fertilización y luego a intervalos semanales hasta que el cultivo alcanzó la madurez fisiológica (R₆) (14 mediciones). Las muestras se tomaron a intervalos de tiempos regulares (0, 20, 40 y 60 minutos). La concentración de N₂O (mg kg⁻¹) se determinó mediante cromatografía gaseosa con detección de captura electrónica (Agilent 7890). A partir de los datos de concentración se calcularon los flujos de emisión diarios mediante regresión lineal.

Determinación de rendimiento en grano

A madurez fisiológica, en cada unidad experimental, se determinó el rendimiento en grano mediante la cosecha manual de espigas sobre los dos surcos centrales (6 m) y se midió el contenido de humedad en grano. El rendimiento se expresó al 14,5% de humedad.

Cálculos y análisis de datos

La volatilización acumulada (N-NH₃ acum) y la emisión acumulada (N-N₂O acum) resultó de la suma de los valores diarios. A su vez, se calcularon las pérdidas gaseosas netas (N-NH₃ acum net o N-N₂O acum net) como la diferencia entre las pérdidas acumuladas del tratamiento fertilizado y las del testigo. Se calcularon los factores de emisión (FE), dividiendo las pérdidas acumuladas netas por el total del N aplicado y multiplicando por 100 para su expresión en porcentaje (%), según lo propuesto por Piccinetti et al. (2021). Por último, se realizó la estimación de la huella de carbono desde la producción hasta el uso de los fertilizantes considerando las directrices del IPCC (2007). Las emisiones se expresaron en kg CO₂-

eq ha⁻¹ considerando que 1 kg N₂O = 310 kg CO₂-eq. Para ello, se emplearon los FE directa e indirecta definidos por defecto por el IPCC y, por otra parte, los FE determinados en el presente estudio para cada fuente de N, estrategia, régimen hídrico y campaña.

Se determinó el cambio en la magnitud de las pérdidas gaseosas y del rendimiento para cada uno de los factores de tratamiento (régimen hídrico, estrategia de fertilización y fuente de N), respecto a un tratamiento de referencia (Urea completo en secano para las pérdidas gaseosas). Para lo cual se calculó el cociente entre la diferencia de la pérdida acumulada neta de cada tratamiento y la de referencia, dividido la pérdida acumulada neta de referencia multiplicado por 100 para su expresión en porcentaje (%). De la misma manera, se calculó para la huella de carbono (C) aunque considerando como situación de referencia la huella de carbono calculada a partir de los FE propuestos por el IPCC. Finalmente, se evaluó el efecto de los factores (fuente, estrategia, régimen y campaña) sobre las pérdidas gaseosas y la huella de C mediante el Análisis de Varianza empleando el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2008). Cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas se empleó el Test Tukey ($\alpha=0,05$).

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización edafoclimática

En la campaña 1, a pesar de que el contenido de N-NO₃⁻ fue medio-alto (97 kg ha⁻¹) comparado con el promedio regional (~60 kg ha⁻¹), el bajo Nan sugiere una alta probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada. Por su parte, en la campaña 2, aunque los valores de MO fueron similares y el Nan algo superior, el contenido de N-NO₃⁻ inicial resultó más bajo que en la primera campaña, lo cual sugiere también una alta probabilidad de respuesta a N (Orcellet et al., 2017).

Las precipitaciones acumuladas durante el ciclo de cultivo fueron similares entre estaciones de crecimiento (564 mm en la campaña 1 y 539 mm en la campaña 2), siendo el requerimiento hídrico promedio de maíz en Balcarce entre 600 y 700 mm. Para la condición de secano en la campaña 1 (1-Secano), se registró un déficit hídrico de 147 mm durante el período crítico, mientras que en la segunda campaña (2-Secano), el déficit observado fue menor (27 mm). Bajo la condición de riego, las precipitaciones sumadas al riego aplicado resultaron en una adecuada disponibilidad de agua durante gran parte del ciclo del cultivo, alcanzando 841 y 807 mm en la campaña 1 y 2 (1-Riego y 2-Riego), respectivamente.

Rendimiento

El rendimiento en grano varió en promedio entre 15,8 y 19,1 Mg ha⁻¹ en 1-Riego, desde 8,9 hasta 12,9 en 1-Secano, desde 10,8 hasta 15,4 Mg ha⁻¹ en 2-Riego y desde 8,3 hasta 14,4 Mg ha⁻¹ en 2-Secano, dependiendo de la combinación entre estrategia y fuente de N (**Tabla 2**). Los valores obtenidos se encontraron dentro del rango reportado para la Región Pampeana (Correndo et al., 2021). La respuesta media a la fertilización nitrogenada fue de 2,5, 2,5, 3,9 y 4,7 Mg ha⁻¹ en 1-Riego, 1-Secano, 2-Riego y 2-Secano, respectivamente. No se observaron efectos principales o interacción entre fuente y estrategia de fertilización. Si bien se ha demostrado una relación entre el potencial de rendimiento y la respuesta a aplicaciones fraccionadas (Maltese et al., 2024), en el presente trabajo no se determinaron diferencias

entre estrategias de fertilización. Sin embargo, tanto la aplicación fraccionada como el empleo de inhibidores no penalizaron el rendimiento, con lo cual esta estrategia permitiría realizar correcciones a lo largo del ciclo basándose en los pronósticos del tiempo y la demanda del cultivo. La ausencia de diferencias en rendimiento entre fuentes de N puede explicarse en parte debido a que la dosis de N no fue limitante y, por este motivo, las posibles reducciones en la disponibilidad producto de las pérdidas no afectaron la nutrición del cultivo (Silva et al., 2017; Graham et al., 2018; Woodley et al., 2020). Por el contrario, varios autores han determinado incrementos en rendimiento (+ 5 a 8%) por el empleo de inhibidores (Abalos et al., 2014; Drury et al., 2017), lo cual sugiere que sería una estrategia efectiva para mejorar la productividad del cultivo. Sin embargo, existen varios factores que influyen en la efectividad de los inhibidores, como condiciones edafoclimáticas y de manejo (Abalos et al., 2014; Thapa, et al. 2016), las cuales pueden explicar la variabilidad en los resultados respecto al efecto de los inhibidores sobre el rendimiento de maíz.

Pérdidas gaseosas

Se observó interacción entre la fuente y la estrategia de fertilización sobre las pérdidas por volatilización ($p < 0,05$) (**Tabla 2**). No se detectaron diferencias estadísticas entre campañas y regímenes hídricos, lo cual sugiere que las precipitaciones previas a la fertilización no limitaron la hidrólisis de la urea. Los FE-NH₃ variaron entre 2,6 y 24,8%, dependiendo del tratamiento (**Tabla 2**), los cuales están dentro del rango propuesto por Pan et al. (2016) para América del Sur (1,7-31,8 %), aunque son superiores a los determinados en Balcarce por Sainz Rozas et al. (1999). Este último resultado puede explicarse en parte por la mayor dosis de N, la presencia de residuo húmedo en superficie y a temperaturas medias diarias mayores, condiciones que favorecen la actividad de la ureasa y en consecuencia, las pérdidas por volatilización (Cantarella et al., 2018). Cabe destacar que los FE-NH₃ no superaron el valor propuesto por el IPCC (15%) excepto en los tratamientos completos de Urea y Urea-DMPP.

La tendencia observada para las fuentes fue: Urea = Urea-DMPP > Urea-Limus (**Tabla 2**). Por lo tanto, el empleo del inhibidor de la actividad ureásica redujo las pérdidas por volatilización entre un ~62% y ~75%, comparado con la Urea sin inhibidor (**Tabla 2**), al igual que lo reportado por Drury *et al.* (2017) y Wang *et al.* (2020). A su vez, el fraccionamiento de N disminuyó las pérdidas de NH₃ bajo todas las combinaciones de campaña, condición hídrica y fuente (**Tabla 2**). Estos resultados indican que demorar la aplicación de N hasta estados avanzados del cultivo no incrementan las pérdidas de NH₃, favoreciendo el monitoreo del estado nitrogenado del cultivo y permitiendo intervenir durante el ciclo. En la campaña 1, la disminución promedio para ambas condiciones hídricas fue de 31%, 35% y 43% para Urea, Urea-DMPP and Urea-Limus, respectivamente. Similares resultados se observaron durante la campaña 2 (**Tabla 2**).

Tabla 2. Análisis de la varianza y valores medios acumulados de volatilización ($\text{kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$), emisión de óxido nitroso ($\text{g N-N}_2\text{O ha}^{-1}$), factores de emisión (%), huella de carbono ($\text{kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$) y rendimiento (t ha^{-1}), para cada estrategia de fertilización, fuente de N, régimen hídrico y campaña.

Campaña- Régimen hídrico	Estrategia de fertilización	Fuente	NH ₃ -acum	FE-NH ₃	N ₂ O-acum	FE-N ₂ O	Huella C	Rendimiento
			kg ha ⁻¹	%	g ha ⁻¹	%	kg CO ₂ -eq ha ⁻¹	t ha ⁻¹
1-Riego	Testigo		1,6		40,1			15,8
	Fraccionado	Urea	36,1 a	17,2	237,8	0,10	1458 a	18,1
		Urea-DMPP	27,5 a	13,0	139,2	0,05	1351 ab	18,0
		Urea-Limus	10,1 b	4,3	267,8	0,11	1296 b	18,3
	Completo	Urea	51,1 a	24,8	134,6	0,06	1519 a	17,9
		Urea-DMPP	46,0 a	22,2	127,2	0,04	1472 a	18,4
		Urea-Limus	14,0 b	6,2	96,0	0,03	1241 b	19,0
1-Secano	Testigo		1,6		168,7			8,9
	Fraccionado	Urea	33,0 a	15,8	289,6	0,06	1400 a	11,5
		Urea-DMPP	27,1 a	12,8	241,6	0,04	1338 a	11,3
		Urea-Limus	11,1 b	4,8	249,1	0,04	1199 b	11,5
	Completo	Urea	46,8 a	22,7	179,7	0,01	1456 a	10,8
		Urea-DMPP	46,4 a	22,5	233,8	0,03	1467 a	12,9
		Urea-Limus	16,5 b	7,5	247,5	0,04	1271 b	10,5
2-Riego	Testigo		3,9		79,8			10,8
	Fraccionado	Urea	24,5 a	10,2	313,7	0,12	1381 a	15,4
		Urea-DMPP	26,6 a	11,3	248,3	0,08	1364 a	14,6
		Urea-Limus	9,1 b	2,6	174,5	0,05	1208 b	14,3
	Completo	Urea	43,0 a	20,1	361,4	0,14	1538 a	15,4
		Urea-DMPP	40,7 a	18,9	206,6	0,06	1447 a	14,1
		Urea-Limus	17,6 b	7,4	333,1	0,13	1351 b	14,3
2-Secano	Testigo		3,8		66,6			8,3
	Fraccionado	Urea	32,6 a	14,5	132,8	0,03	1356 a	12,1
		Urea-DMPP	29,9 a	13,1	330,0	0,13	1434 a	14,4
		Urea-Limus	13,8 b	5,1	232,0	0,08	1276 b	12,7
	Completo	Urea	49,4 a	23,1	165,2	0,05	1496 a	12,7
		Urea-DMPP	46,2 a	21,5	135,0	0,03	1453 a	13,1
		Urea-Limus	22,3 b	9,5	194,0	0,06	1319 b	13,0

Para determinada campaña, régimen hídrico y estrategia de fertilización, letras minúsculas distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre fuentes de N.

La interacción entre campaña, régimen hídrico y estrategia fue significativa para la emisión acumulada neta de N_2O . No hubo efecto significativo o interacción entre fuente y estrategia, independientemente de las combinaciones de campaña y condición hídrica (**Tabla 2**). La emisión acumulada neta fue un 69% superior en la campaña 2 respecto a la campaña 1 y un 63% superior en el sistema bajo riego que en secano (**Tabla 2**). La inconsistencia en el efecto de los inhibidores en la reducción de las pérdidas puede ser atribuido a diferencias en las prácticas de manejo, propiedades del suelo y condiciones ambientales

(Graham et al., 2018; Ferland et al., 2024). Por su parte, los FE-N₂O variaron entre 0,01 y 0,14% según tratamientos, y resultaron menores a los registrados en estudios locales (Piccinetti et al., 2021; Vangeli et al., 2022). Las bajas emisiones acumuladas de N₂O se deben principalmente al bajo porcentaje de poros llenos de agua (datos no mostrados), el cual en la mayor parte del ciclo no superó el 70%, lo cual coincide con lo reportado por Sainz Rozas et al. (2001).

Se observó cómo tendencia ($p>0,05$) menores pérdidas al aplicar la dosis completa en V₄ respecto a la aplicación fraccionada (-10% hasta -51%). En la mayoría de los casos, la Urea-DMPP redujo las pérdidas de N₂O comparado con Urea sin inhibidor (-8% hasta -55%); y solo en determinados tratamientos la Urea-Limus (-10% a -90%). Por lo tanto, estos resultados coinciden parcialmente con aquellos trabajos en los cuales se ha detectado que el fraccionamiento no afecta las pérdidas de N₂O (Nasielski et al., 2020) y que el empleo de los inhibidores de la nitrificación reducen las emisiones (Yang et al., 2016).

Huella de carbono

La huella de C varió entre 1199 y 1538 kg CO₂-eq ha⁻¹ (**Tabla 2**). Las estimaciones del IPCC sobrestimaron la huella de C en ~198% (2716 kg CO₂-eq ha⁻¹ según IPCC), lo cual se explica por el empleo de FE no ajustados localmente. Se detectó interacción entre campaña, régimen y estrategia, y entre campaña, fuente y estrategia. No hubo interacción entre fuente y estrategia, excepto para 1-Riego. El fraccionamiento de la dosis de N redujo un ~6% la huella de C respecto a la aplicación completa de N. Tomando como referencia la Urea, el empleo de Urea-DMPP y Urea-Limus redujeron las emisiones totales en un 2% y 12%, respectivamente. Estos resultados se explican principalmente por las menores pérdidas por volatilización.

Síntesis de gestión de nitrógeno

La aplicación de riego complementario redujo en promedio las pérdidas por volatilización en un 1%, mientras que la reducción fue mayor al fraccionar la dosis de N (- 33%) (**Figura 1a**). En cuanto al empleo de fuentes alternativas a la Urea, se lograron reducciones promedio del 3% y 62% al aplicar Urea-DMPP y Urea-Limus, respectivamente. A su vez, la aplicación de riego complementario y la fertilización fraccionada con Urea-Limus disminuyeron en promedio las pérdidas un 84%. Respecto a la emisión de N₂O, la incorporación de riego y el fraccionamiento de N incrementaron las pérdidas en un 520% y 475%, respectivamente (**Figura 1b**). En cuanto a las fuentes alternativas, se observaron reducciones del 58% para Urea-DMPP y aumentos del 324% para Urea-Limus. El rendimiento se incrementó en promedio un 44% al incorporar riego y un 1% al fraccionar la dosis de N (**Figura 1c**). En cuanto al empleo de fuentes alternativas, se observó un incremento del 11% al aplicar Urea-DMPP ($p>0,05$), mientras que no hubo variaciones al aplicar Urea-Limus. Considerando la combinación de prácticas de manejo (riego, fraccionamiento y Urea-Limus) el rendimiento aumentó un 41%. Es importante destacar que el cambio en la magnitud de rendimiento debido a la aplicación de riego siempre fue positivo, a diferencia del fraccionamiento y el empleo de fuentes alternativas que presentaron algunos valores negativos.

Por su parte, el empleo de FE locales para el cálculo de la huella de C resultó en reducciones del ~49%, independientemente de la incorporación o no de riego complementario (**Figura 1d**). Cuando se fraccionó la dosis de N, la disminución de las emisiones totales fue mayor que al aplicar la dosis completa de N (-51% vs. -48%). Sumado a esto, el empleo de fuentes alternativas a la Urea presentaron mayores reducciones en la huella de C (48%, y 53% para Urea-DMPP y Urea-Limus, respectivamente). Cuando se combinaron la aplicación de riego complementario, el fraccionamiento de la dosis de N y el empleo de Urea-Limus la Huella de C se redujo en un 54%. Estos resultados demuestran que el empleo de tecnologías de procesos (fraccionamiento) y de insumos

(fuentes) permitiría reducir principalmente las pérdidas por volatilización y, por ende, contribuir a un manejo más eficiente de N. A su vez, los datos obtenidos en este estudio confirman la evidencia de que el IPCC sobreestima las emisiones de GEI para Argentina (Said *et al.*, 2023). Por este motivo, generar información local permite mejorar el inventario nacional de GEI de Argentina.

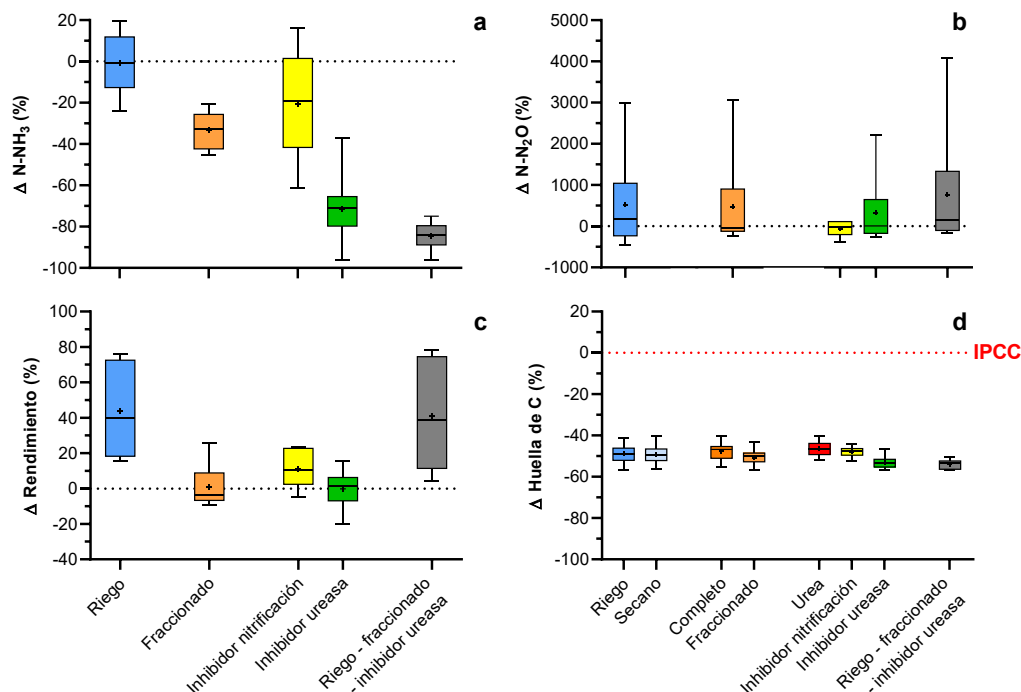


Figura 1. Cambio en las pérdidas por volatilización de NH_3 (a), en la emisión de N_2O (%) (b), en el rendimiento (c) y en la huella de carbono (d) respecto a una situación de referencia, para cada uno de los factores evaluados (régimen hídrico, estrategia de fertilización y fuente de N) (a y b). Para las figuras a, b y c, la línea punteada indica el tratamiento de referencia (Dosis completa de Urea aplicada en V4 bajo condiciones de secano) ($45,8 \text{ kg ha}^{-1}$, $69,4 \text{ g ha}^{-1}$ y $11,8 \text{ t ha}^{-1}$ para volatilización, emisión de N_2O y rendimiento, respectivamente), mientras que para la figura d, la situación de referencia es la huella de carbono calculada con los factores de emisión propuestos por el IPCC ($2716 \text{ kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$).

>. CONCLUSIÓN

Los resultados del presente trabajo demuestran que una correcta gestión del nitrógeno basada en el empleo de tecnologías de procesos (fraccionamiento) y de insumos (fuentes) permite reducir principalmente las pérdidas por volatilización y, por ende, contribuir a una menor huella de C y a un manejo más eficiente de N, sin afectar la productividad del maíz.

>. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Profertil S.A y a la Fundación Williams por el financiamiento de la investigación, además de los proyectos PICT 2020- 0605, AGR 704/23 e INTA 2023-PE-L01-I012.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Abalos, D.; Jeffery, S.; Sanz- Cobena, A.; Guardia, G.; Vallejo, A. 2014. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 189: 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>.
- Aparicio, V.; Costa, J. L.; Sainz Rozas, H.; Gimenez, D.; García, F. 2015. Comparing nitrate-N losses through leaching by field measurements and nitrogen balance estimations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 46: 1229–1243. DOI: 10.1080/00103624.2015.1033533.
- Aramburu Merlos, F.; J. P. Monzon; J. L. Mercu; M. Taboada; P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Fields Crops Research*. 184:145-154. DOI: 10.1016/j.fcr.2015.10.001.
- Bray, R. H. & Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*. 59(1), 39-46.
- Cantarella, H.; Otto, R.; Rodrigues Soares, J.; Gomes de Brito Silva, A. 2018. Agronomy efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review. *Journal of Advanced Research*. 13: 19-27. DOI: 10.1016/j.jare.2018.05.008.
- Clough T. J.; Rochette, P.; Thomas, S. M.; Pihlatie, M.; Christiansen, J. R.; Thorman, R. E. 2020. Global Research Alliance N₂O chamber methodology guidelines: Design considerations. *Journal of Environmental Quality*. 49: 1081–1091. DOI: 10.1002/jeq2.20117.
- Correndo, A. A., Gutiérrez-Boem, F. H., García, F. O., Alvarez, C., Alvarez, C., Angeli, A., ... Salvagiotti, F. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research*, 273, 108299. DOI: 10.1016/j.fcr.2021.108299
- Della Maggiora, A. I.; Irigoyen, A.; Gardiol, J. M.; Caviglia, O. & Echarte, L. 2003. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. *Revista Argentina de Agrometeorología*. 2: 167-176.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. 2008. InfoStat, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Drury, C. F., Yang, X., Reynolds, W. D., Calder, W., Oloya, T. O., Woodley, A. L. 2017. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields. *Journal of Environmental Quality*, 46(5), 939-949. DOI:10.2134/jeq2017.03.0106.
- Fernandez, J.A., J. DeBruin, C.D. Messina, y I.A. Ciampitti. 2020. Late-season nitrogen fertilization on maize yield: A meta-analysis. *F. Crop. Res.* 247(February): 107586.
- Ferland, D., Wagner-Riddle, C., Brown, S. E., Bourgault, M., Helgason, W., Farrell, R. E. & Congreves, K. A. 2024. Improved nitrogen fertilizer management reduces nitrous oxide emissions in a northern Prairie cropland. *Science of the Total Environment* 956, 177211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177211>
- Graham, R. F.; Greer, K. D.; Villamil, M. B.; Nafziger, E. D.; Pittelkow, C. M. 2018. Enhanced- efficiency fertilizer impacts on yield-scaled nitrous oxide emissions in maize. *Soil Science Society of America Journal*. 82 (6): 1469–1481. DOI:10.2136/sssaj2018.05.0196.

Herrera, J. M., Rubio, G., Häner, L. L., Delgado, J. A., Lucho-Constantino, C. A., Islas-Valdez, S., Pellet, D. 2016. Emerging and established technologies to increase nitrogen use efficiency of cereals. *Agronomy*, 6(2), 25.

Kabir, T., De Laporte, A., Nasielski, J. & Weersink, A. 2021. Adjusting nitrogen rates with split applications: modelled effects on N losses and profits across weather scenarios. *European Journal of Agronomy*, 129, 126328. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126328>

Keeney, D. R. & Nelson, D. W. 1983. Nitrogen—inorganic forms. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*. 9: 643-698.

Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J. & Garnier, J. 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*, 9(10), 105011. DOI:10.1088/1748-9326/9/10/105011

Lindsay, W. L.; Norvell, W. A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 421–428. DOI:10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.

Maltese, N. E., Carciochi, W. D., Caviglia, O. P., Sainz Rozas, H. R., García, M., Lapaz, A. O., Ciampitti, I. A. & Reussi Calvo, N.I. (2024). Assessing the effect of split and additional late N fertilisation on N economy of maize. *Field Crops Research*, 308 (March), 109279. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109279>

Martins, M. R.; Sant'Anna, S. A. C.; Zaman, M.; Santos, R. C.; Monteiro, R.C.; Alves, B. J. R.; Jantalia, C. P.; Urquiaga, S. 2017. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: impact on N₂O and NH₃ emissions, fertilizer 15N recovery and maize yield in a tropical soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 247: 54-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.021>

Miola, E. C.; Aita, C.; Rochette, P.; Chantigny, M. H.; Angers, D. A.; Bertrand, N.; Gasser, M. O. 2015. Static chamber measurements of ammonia volatilization from manured soils: impact of deployment duration and manure characteristics. *Soil Science Society of America Journal*. 79(1): 305-313. DOI: 10.2136/sssaj2014.07.0305.

Nasielski, J., Grant, B., Smith, W., Niemeyer, C., Janovicek, K. & Deen, B. 2020. Effect of nitrogen source, placement and timing on the environmental performance of economically optimum nitrogen rates in maize. *Field Crops Research*, 246, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107686>

Norton, J. & Ouyang, Y. 2019. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils. *Frontiers in Microbiology*. 10: 1931. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01931.

Orcellet, J. M.; Reussi Calvo, N. I.; Sainz Rosas, H. E.; Wyngaard, N. & Echeverría, H. E. 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn, *Agronomy Journal*, 109:1-8. DOI:10.2134/agronj2016.02.0115.

Pan, B., Lam, S. K., Mosier, A., Luo, Y., & Chen, D. 2016. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 283-289.

Piccinetti, C. F.; Bacigaluppo, S.; Di Ciocco, C. A.; De Tellería, J. M.; Salvagiotti, F. 2021. Soybean in rotation with cereals attenuates nitrous oxide emissions as compared with soybean monoculture in the Pampas región. *Geoderma*. 402: 115-192.

- Ritchie, S.W. y J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service, Iowa, EEUU. Special Report N°48. pp. 24.
- Said, A.; Posse, G.; Vangeli, S.; Popper, A. 2023. ¿Podemos mejorar las estimaciones de las emisiones de N₂O en Argentina? Revista Ciencia del Suelo, 41(1), 99-115.
- Sainz Rozas, H.; Echeverría, H. E.; Studdert, G. A.; Andrade, F. H. 1999. No-till maize nitrogen uptake and yield: effect of urease inhibitor and application time. Agronomy Journal, 91, 950-955. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.916950x>
- Sainz Rozas, H.; Echeverría, H. E.; and Picone, L. I. 2001. Denitrification in maize under no-tillage: effect of nitrogen rate and application time. Soil Sci. Soc. Am. J., 65, 1314–1323. DOI: 10.2136/sssaj2001.6541314x
- Silva, A. G. B.; Sequeira, C. H.; Sermarini, R. A.; Otto, R. 2017. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. Agronomy Journal. 109: 1-13. DOI:10.2134/agronj2016.04.0200.
- Thapa, R.; Chatterjee, A.; Awale, R.; McGRanahan, D. A.; Daigh, A. 2016. Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: a meta-analysis. Soil Science Society of America Journal. 80(5): 1121–1134. DOI:10.2136/sssaj2016.06.0179.
- Thomas, G. W. & Hargrove, W. L. 1984. The chemistry of soil acidity. Soil acidity and liming. 12: 3-56.
- Vangeli, S.; Posse, G.; Beget, M. G.; Otero Estrada, E.; Valdetaro, R. A.; Oricchio, P.; Kandus, M.; Di Bella, C. M. 2022. Effects of fertilizer type on nitrous oxide emission and ammonia volatilization in wheat and maize crops. Soil Use and Management. 00: 1–13. DOI: 10.1111/sum.12788.
- Walkley, A. & Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science. 37(1): 29-38.
- Wang, H., Köbke, S., Dittert, K. 2020. Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing ammonium nitrate and urea. Global Ecology and Conservation, 22, e00933. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e00933
- Woodley, A. L., Drury, C. F., Yang, X. Y., Phillips, L. A., Reynolds, D. W., Calder, W., Oloya, T. O. 2020. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yield as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. Soil Science Society of America Journal, 84, 1327–1341. DOI: 10.1002/saj2.20079.
- Yang, M.; Fang, Y.; Sun, D.; Shi, Y. 2016. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. Scientific Reports. 6: 1-10. DOI: 10.1038/srep22075.
- You, L., Ros, G. H., Chen, Y., Shao, Q., Young, M. D., Zhang, F. & de Vries, W. 2023. Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices. Nature Communications, 14, 5747. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41504-2>

Estrategias de largo plazo para mejorar la nutrición

► ► Ciarlo, E.^{1,2}, Saks M.³, Díaz Zorita M.⁴, Quintero C.⁵,
Hernandez, JP.⁵, Sanzano, A.⁶, Drganc, D.⁷, Espósito, G.⁸, Cerliani, C.⁸,
Alvarez, C.⁹, Ventimiglia, L.¹⁰ & González Sanjuan M.F.

¹ Fertilizar AC ² Cátedra de Edafología de la FA-UBA– eciarlo@fertilizar.org.ar

³ Bunge ⁴ UNLPam, CONICET ⁵ UNER ⁶ EEAOC ⁷ Lab. Agrofertil ⁸ UNRC ⁹ INTA Anguil ¹⁰ INTA 9 de Julio

✉ eciarlo@fertilizar.org.ar

>. JUSTIFICACIÓN DE LA RED DE ESTRATEGIAS

La implementación de modelos de recomendación regionales de nutrición balanceada permite mejorar la producción de cultivos y la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados con respecto a las prácticas frecuentes de fertilización, pero es necesario su estudio en cada ambiente productivo.

>. METODOLOGÍA

Desde 2016 se vienen instalando ensayos de larga duración, con 4 tratamientos principales con diferentes dosis y cantidades de nutrientes aplicados en cultivos que siguen la secuencia del productor. La dosis es variable entre cultivos y sitios:

Tratamiento	Nutrientes aportados (kg/ha)			
	N	P	S	Zn
Testigo	0	0	0	0
Frecuente	4 a 114	0 a 50	0 a 47	0
Mejorado	20 a 170	2 a 70	1 a 75	0
Completo	46 a 230	11 a 70	5 a 56	0 a 2

>. RESULTADOS

La aplicación de dosis crecientes de nutrientes aumentó significativamente (hasta un 41%) los rendimientos de los cultivos (Fig. 1), y las diferencias entre los tratamientos se fueron incrementando a medida que se fueron repitiendo estos tratamientos en la secuencia (Fig. 2).

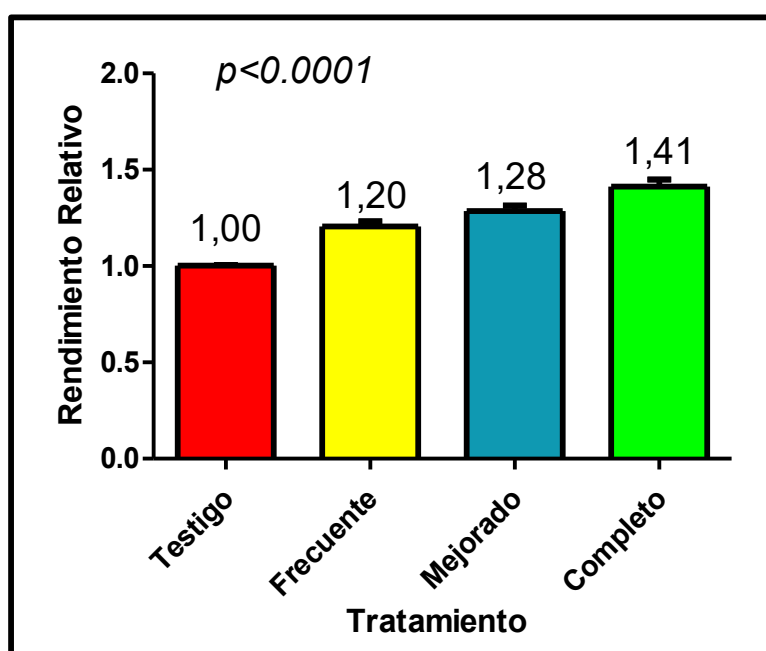


Fig. 1. Rendimientos de los tratamientos Frecuente, Mejorado y Completo relativos al Testigo sin fertilizar (promedio de todos los sitios y años (2016-2024). Diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p<0,0001$).

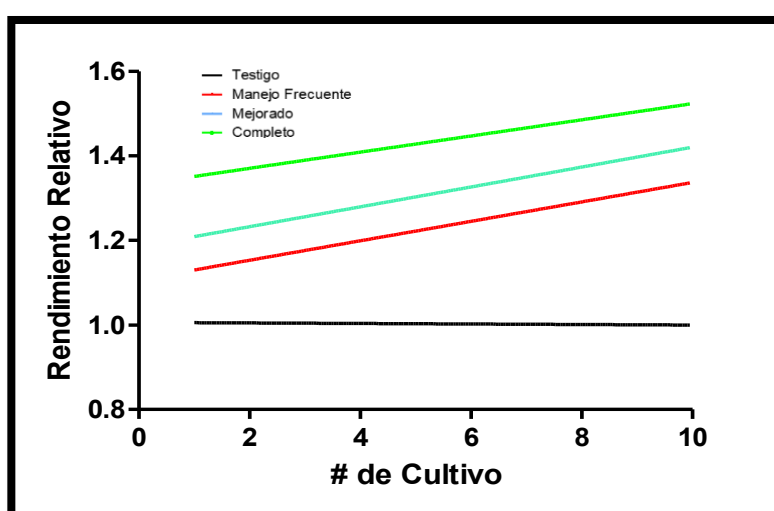


Fig. 2 Cambio de los rendimientos relativos de los tratamientos aplicados en el tiempo, con respecto al tratamiento Testigo (RR: 1).

Nutrición en la Rotación: La experiencia de la región CREA Córdoba Norte

► ► **Vecchio Daniela^{1*}, Marianela Rivelli¹, Lucas Feroli²,
Sebastián Etchegoyhen², Nahuel I. Reussi Calvo³
y Fernando O. García^{4*}**

¹ Región CREA Córdoba Norte, ²Nutrien Ag Solutions, ³CONICET-Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, ⁴Consultor Balcarce, Buenos Aires

✉ areatecnicaen@crea.org.ar / fgarcia1957@gmail.com

La región Córdoba Norte del movimiento CREA, con el auspicio de Nutrien Ag Solutions, lleva adelante la red de ensayos de largo plazo Nutrición en la Rotación, iniciada en la campaña 2008/09 y reformulada en la campaña 2014/15. Desde 2014/15 a 2022/23 se evaluaron de manera permanente tres sitios: Colonia Almada, Piquillín y Totoral incluyendo, por algunos años, sitios en Cañada de Luque y Sarmiento. En las campañas 2022/23 y 2023/24 se sumaron ensayos en franjas para evaluar la fertilización nitrogenada en maíz.

Los objetivos generales de esta red de ensayos son:

1. Determinar respuestas (directas y residuales) de los cultivos dentro de la rotación a la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) en diferentes ambientes de la región
2. Evaluar algunas metodologías de diagnóstico de la fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada
3. Evaluar deficiencias y respuestas potenciales a micronutrientes: boro (B) y zinc (Zn)
4. Conocer la evolución de los suelos bajo distintos esquemas de fertilización determinando índices relacionados con su calidad

Este escrito presenta los resultados obtenidos entre 2014 y 2022 en la red Nutrición en la Rotación y la evaluación de fertilización nitrogenada en maíz en los ensayos en franjas de 2022/23 y 2023/24.

>. RED NUTRICIÓN EN LA ROTACIÓN

Los sitios evaluados se muestran en la Fig. 1 y la información de los mismos en la Tabla 1. Los tratamientos de fertilización y dosis evaluadas se indican en Tabla 2. Los tratamientos se repitieron anualmente sobre las mismas parcelas. Las fuentes de fertilizante utilizadas fueron urea (46-0-0), fosfato monoamónico (11-22-0), yeso azufertil (0-0-0-19S), B10 y Zn 40. Entre 2014 y 2022 se evaluaron 18 sitios/año con soja, 15 con maíz, 3 con trigo y 1 con garbanzo entre 2014 y 2023.



Fig. 1. Ubicación de los ensayos de Nutrición en la Rotación.

Tabla 1. Información de los sitios de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte.

Sitio	Colonia Almada	Piquillín	Totoral
CREA	Laguna Larga	Rio I	Totoral
Zona Agroecológica	Zona 2	Zona 1	Zona 1
Serie Suelo	Oncativo	MNtc-7	MNen-57
Tipo suelo	Haplustol éntico	Haplustol típico	Haplustol éntico y típico
Textura	Franco limoso	Limoso fino	Limoso fino
Años de Agricultura a 2023	24	29	24
Rotación propuesta	S-T/M-T/S	M-S-T/S	M-S

Tabla 2. Tratamientos de fertilización de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte.

Tratamiento	N	P	S	Zn	B
Dosis de Nutrientes (kg/ha)					
Soja					
Testigo	0	0	0	0	0
PS	0	20-25	10-15	0	0
NS	0	0	10-15	0	0
NP	0	20-25	0	0	0
NPS	0	20-25	10-15	0	0
NPSZnB	0	20-25	10-15	0.5	1
Maíz					
Testigo	0	0	0	0	0
PS	0	20-25	10-15	0	0
NS	100	0	10-15	0	0
NP	100	20-25	0	0	0
NPS	100	20-25	10-15	0	0
NPSZnB	100	20-25	10-15	1	0.5

>. RENDIMIENTOS Y RESPUESTAS A LA FERTILIZACIÓN

La Fig. 2 muestra los rendimientos promedio y por sitio de soja para los seis tratamientos de fertilización. El análisis global de los 18 sitios-año de soja, no muestra diferencias significativas entre tratamientos, con rendimientos promedio entre 3500 y 3600 kg/ha.

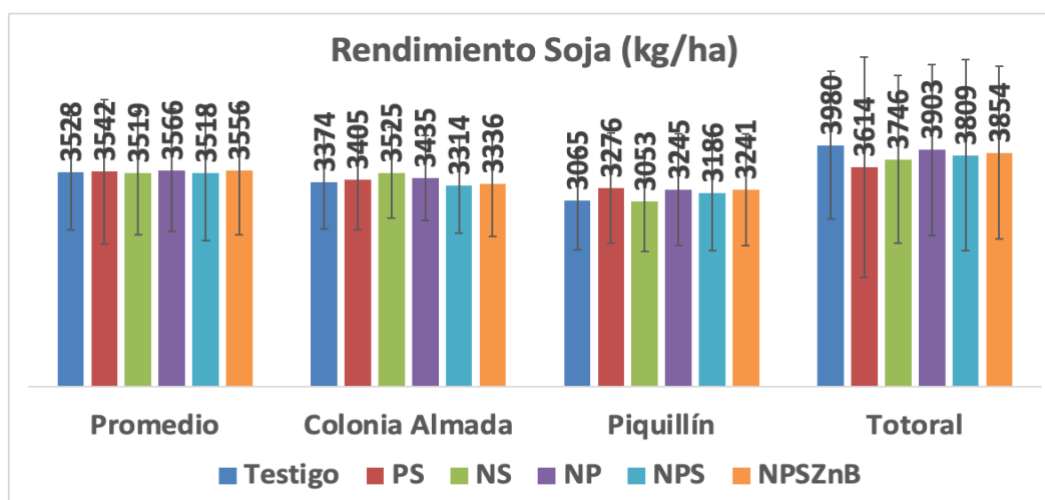


Fig. 2. Rendimientos promedio y por sitio de soja. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte 2014-23. Las barras verticales indican el desvío estándar.

En el caso de maíz (15 sitios-año), la Fig. 3 muestra los rendimientos promedio y por sitio para los seis tratamientos de fertilización. El análisis global muestra diferencias significativas: Testigo < PS < NS = NP = NPS = NPSZnB. Entre los sitios, Colonia Almada mostró las mayores respuestas, considerando su prolongada historia agrícola y menor fertilidad inicial, en comparación con Piquillín y Totoral. Las

respuestas a N en maíz fueron generalizadas, pero más frecuentes y elevadas en C. Almada: incrementos relativos de 22%, 2% y 9% en C. Almada, Piquillín y Totoral, respectivamente. La respuesta a PS se observó principalmente en Colonia Almada, con niveles más bajos de P Bray, donde la respuesta estuvo más asociada a P que a S.

Las respuestas a N se relacionaron con el rendimiento del Testigo (Fig. 4), fueron mayores para sitios-año de rendimientos Testigo menores a 6000 kg/ha (+2497 kg/ha, +48%, n=6) correspondientes a dos campañas de C. Almada y una de Totoral; y menores para sitios con rendimientos Testigo mayores a 6000 kg/ha (+214 kg/ha, +2%, n=22) correspondientes a cuatro campañas de Piquillín, tres de Totoral, dos campañas de C. Almada, una de Sarmiento y una de Cañada de Luque. La respuesta a PS fue más generalizada (+727 kg/ha, +9%) (Fig. 4), pero mayor con rendimientos Testigo superiores a 6000 kg/ha (+865 kg/ha, +10%) y menor con rendimiento inferiores (+223 kg/ha, +4%).

Las respuestas a la fertilización en maíz permitieron incrementar la eficiencia de uso del agua (EUA) (Fig. 5). En promedio para todos los maíces (1ra. y 2da.), el Testigo alcanzo 19.3 kg/mm y el NPS 22.0 kg/mm, una diferencia del 14% en EUA. El principal efecto fue de N, todos los tratamientos con N superaron significativamente al Testigo sin fertilizar.

La Fig. 6 superior muestra una baja relación entre los rendimientos de maíz de los tratamientos Testigo y NPS y el abastecimiento de agua (precipitaciones durante el ciclo más 150/200 mm de agua almacenada en el suelo a la siembra, 150 mm para maíz 2da. y 200 mm para maíz 1ra.). La fertilización NPS tiende a mejorar la EUA. La línea negra de la Fig. 10 inferior muestra la función de frontera propuesta por van Ittersum et al. (2013) para cereales, que indica una eficiencia de referencia de 22 kg/ha de maíz o trigo por mm de agua disponible. Muchos de los ensayos evaluados se ubican con EUA cercanas al optimo.

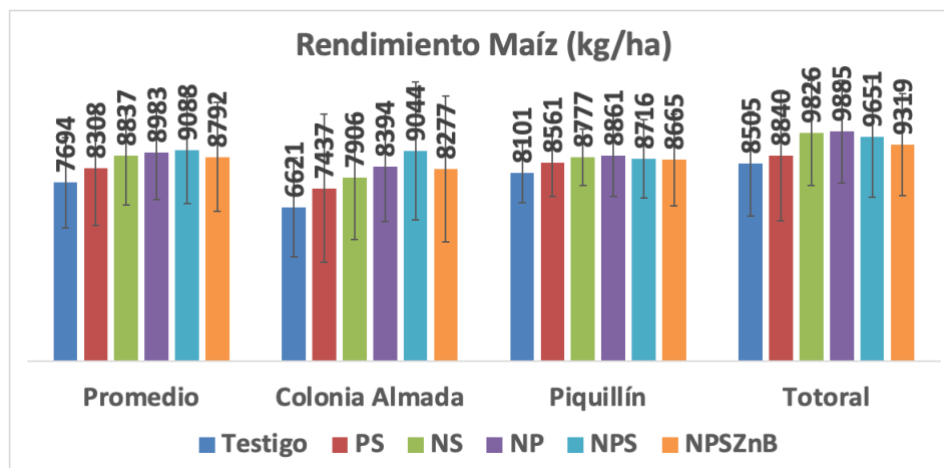


Fig. 3. Rendimientos promedio y por sitio de maíz. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte 2014-23. Las barras verticales indican el desvío estándar.

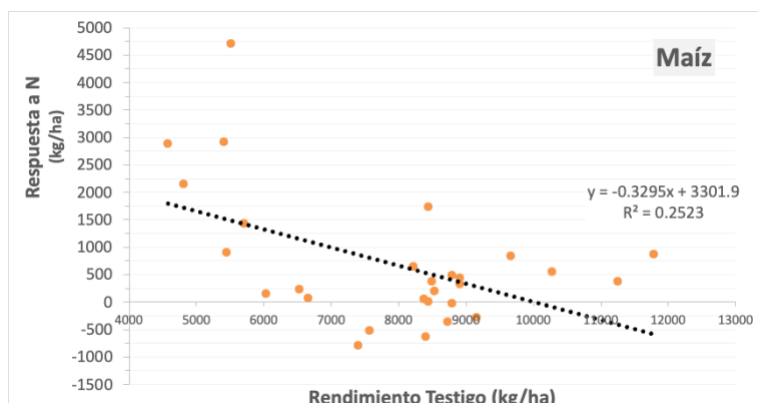
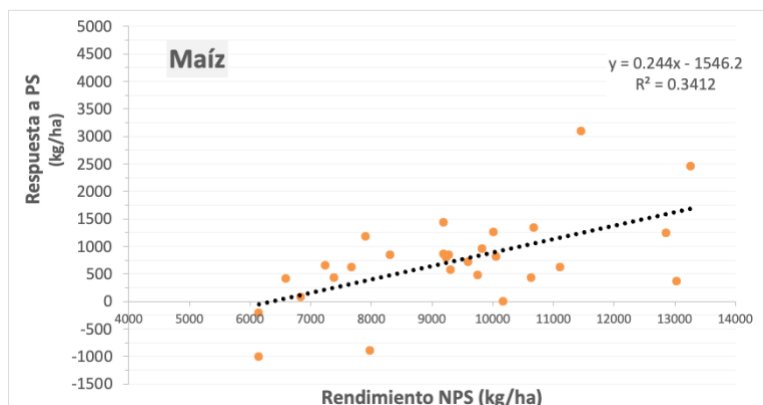


Fig. 4. Relación entre respuesta a N y rendimiento Testigo (superior) y entre respuesta a PS y rendimiento NPS de maíz. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA



Córdoba Norte
2014-23.

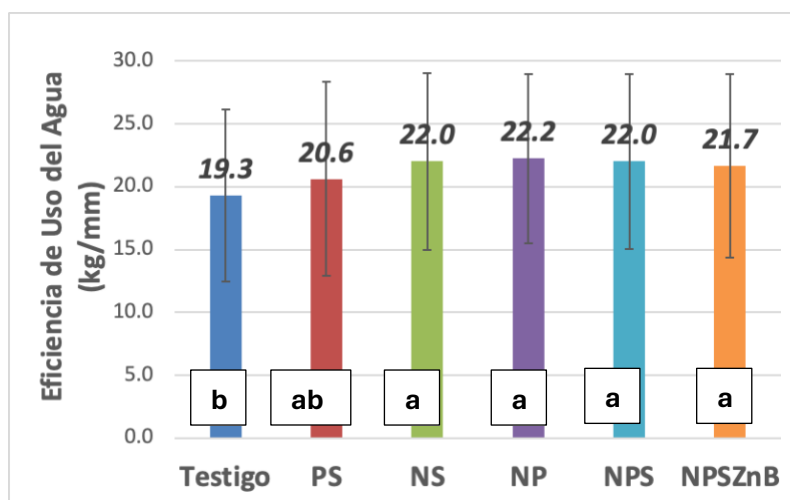
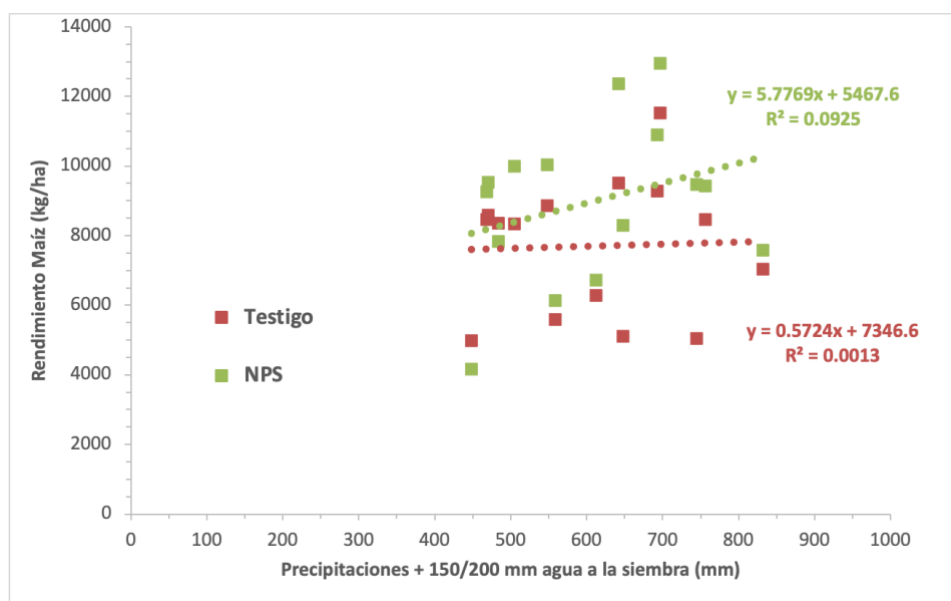


Fig. 5. Eficiencia de uso de agua (EUA) promedio por tratamiento para maíz. Ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte. Campañas 2014/15 a 2022/23. Letras distintas entre tratamientos de fertilización indican diferencias significativas al nivel de probabilidad del 1%.



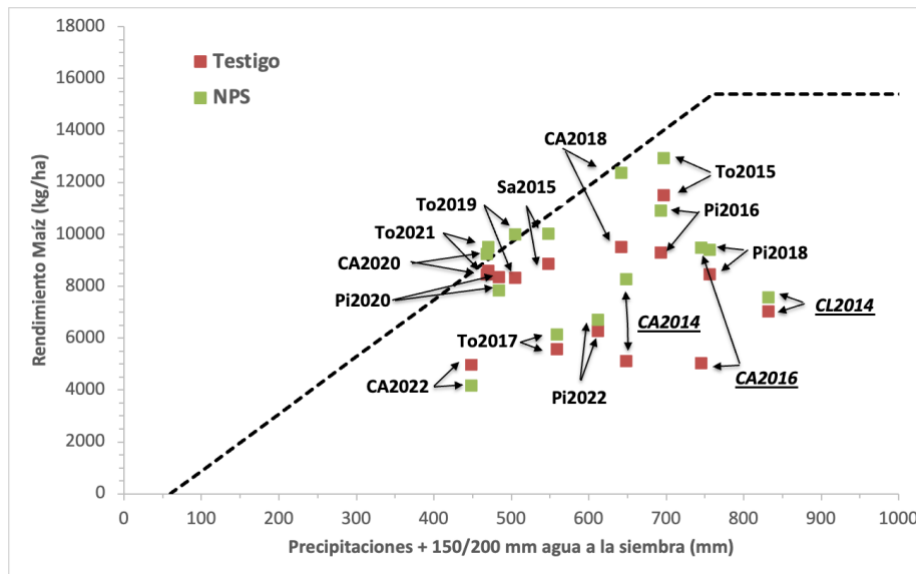


Fig. 6. Relación entre rendimientos de maíz 1ra. (fuente normal) y 2da. (fuente *itálica y subrayado*) de tratamientos Testigo y NPS con el abastecimiento de agua (precipitaciones durante el ciclo más 200 y 150 mm de agua almacenada en el suelo a la siembra de maíz 1ra y maíz 2da., respectivamente). La línea negra punteada muestra la función de frontera propuesta por van Ittersum et al. (2013) para cereales. CL es Cañada de Luque, CA es C. Almada, Pi es Piquillín, Sa es Sarmiento y To es Totoral.

>. ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS A NITRÓGENO EN MAÍZ

Considerando que la respuesta a N en maíz fue el resultado más destacado observado en la red Nutrición en la Rotación, a partir de la campaña 2022/23 se establecieron evaluaciones con franjas de N en lotes de producción de la región que comparan situaciones sin aplicación de N y 2 dosis de N: la del lote y aproximadamente doble dosis del lote (Fig. 7). Las franjas se evaluaron en las campañas 2022/23 (9 sitios) y 2023/24 (8 sitios) para estimar respuestas y eficiencia de uso de N y determinar N disponible (N-nitrato 0-60 cm), Nan (N mineralizado en incubación anaeróbica de 7 días) y materia orgánica (MO) en pre-siembra.

En la campaña 2022/23, varios de las franjas fueron severamente afectadas por la condición de sequía severa, y en la campaña 2023/24, las limitaciones se dieron por falta de agua y por el síndrome de achaparramiento. Los rendimientos de maíz fueron fuertemente disminuidos por estos estreses abióticos y bióticos, por lo tanto, se decidió analizar solamente los sitios en los cuales los testigos sin fertilización nitrogenada rindieron más de 4000 kg/ha. Se considera que, en estos sitios, el cultivo pudo expresar el estado y oferta de N del sitio y la respuesta a N sin otras limitaciones de significancia.

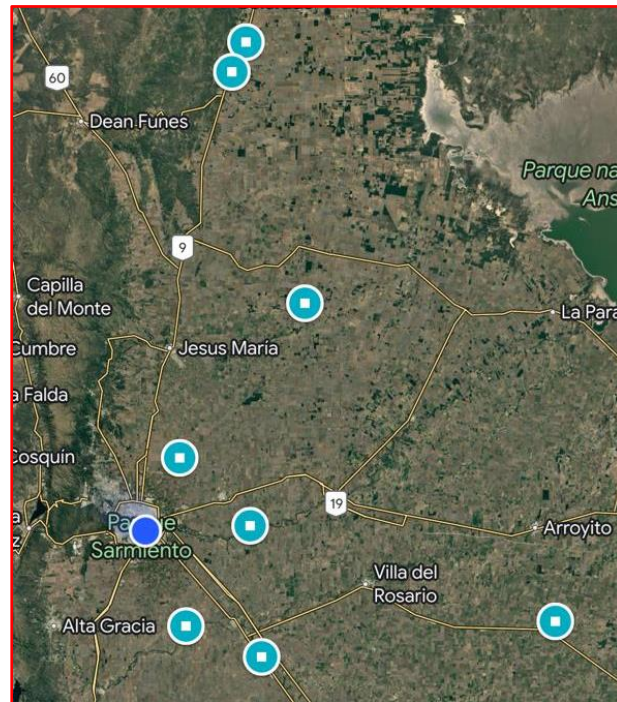


Fig. 7. Ubicación de los sitios de Franjas de N campaña 23/24.

La Fig. 8 muestra los estadísticos de análisis de suelo pre-siembra, el rendimiento sin fertilización nitrogenada y dos estimaciones de respuesta a la fertilización nitrogenada (eficiencia de uso de N, EUN, y productividad parcial de N, PPN) en las 4 franjas de la campaña 2022/23 y 5 franjas de la campaña 2023/24.

Los datos centrales variaron en los rangos de 2.1-2.8% MO, 36-53 ppm Nan, 50-71 kg/ha N-nitrato, 7655-7977 kg/ha, 1.1-14.7 kg maíz/kg N para EUN y 46-104 kg maíz/kg Nf para PPN. Los promedios de MO, Nan y rendimiento sin fertilizar son similares a los determinados en los ensayos de Nutrición en la Rotación. Considerando una relación de precios de 10 kg maíz por kg de N fertilizante, las EUN mostraron eficiencias positivas en 5 de los 9 sitios (56%). La PPN promedio fue de 87 kg maíz por kg Nf, algo superior a los valores de referencia de 60-80 kg maíz por kg Nf.

La Fig. 9 muestra las estimaciones de N mineralizado durante ciclo del cultivo y de kg N min por ppm de N anaeróbico (Nan) y % de materia orgánica (MO). Los datos centrales variaron en los rangos de 130-174 kg N/ha de N min, y de 2.7-5.0 y 49-74 kg N min por ppm Nan y % de MO, respectivamente. Las estimaciones promedio de N min, y de kg N min por ppm Nan o % MO, fueron similares a las estimadas para los sitios de Nutrición en la Rotación.

La información de las franjas se sumó a la observada en los ensayos permanentes de Nutrición en la Rotación. Se relacionaron los rendimientos con la disponibilidad de N en suelo (0-60 cm) + N aplicado como fertilizante (Ns+f) (Fig. 10). Este ajuste indica que se alcanzan los 8000 kg/ha de rendimiento con 100-120 kg Ns+f/ha. En comparación con ajustes similares en otros trabajos en región pampeana, se observa una elevada dispersión y situaciones de altos rendimientos para bajas disponibilidades de Ns+f, indicando altos aportes de N vía mineralización.

La Fig. 11 muestra la relación de rendimientos relativos (rendimiento sin /rendimiento con N) con la disponibilidad de N a la siembra (0-60 cm). Esta relación indica un nivel crítico de 107 kg N/ha para alcanzar el 95% del rendimiento máximo ($r=0.70$). Los rendimientos absolutos incluidos en este ajuste variaron entre 4320 y 12323 kg/ha (ver Fig. de caja en Fig. 11).

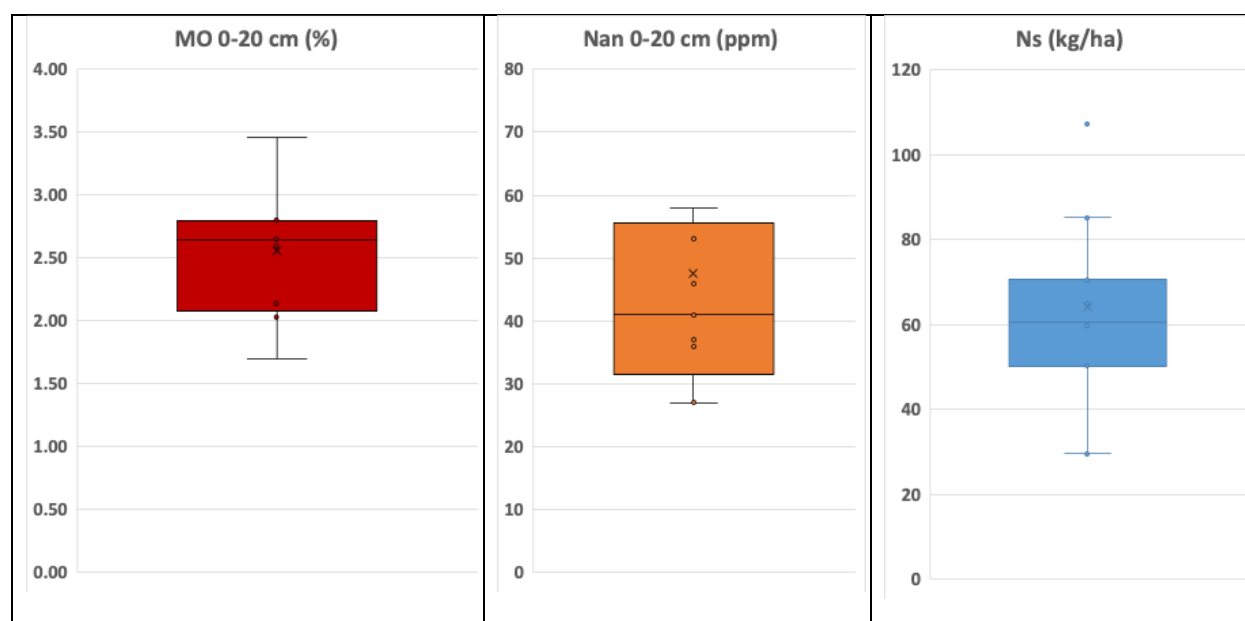
Dada la significancia y variabilidad de la mineralización como aporte de N al cultivo, se busca ajustar Nan y MO como estimadores de dicha mineralización a nivel de lote o ambiente. Las respuestas a N se relacionaron débilmente con los niveles de Nan (Fig. 12), Niveles de Nan menores de 60 ppm parecen ser de mayor probabilidad de respuesta. No hubo relación de respuesta a N con MO ni de EUN con Nan o MO.

Considerando todos los datos de franjas y de los sitios permanentes de Nutrición en la Rotación, las estimaciones realizadas en lotes del norte de Córdoba muestran niveles de:

- Mineralización de N promedio de 153 kg N/ha, rango central de 125 a 179 kg N/ha.
- Nan promedio de 50 ppm, rango central de 36 a 58 ppm.
- MO promedio de 2.5%, rango central de 2.1% a 2.8%.

La mineralización promedio determinada es coincidente con estimaciones de RAVIT (i.e., 147 kg N/ha) y de otras estimaciones zonales (i.e., 164 kg N/ha). A partir de estas estimaciones de mineralización, se calcularon aportes por mineralización (coeficientes) promedio de 3.6 kg N por ppm Nan (rango medio de 2.6 a 5.0 kg por ppm) y de 62 kg N por % MO (materia orgánica) (rango central de 49 a 74 kg N por % MO).

Los factores medios de N mineralizado por % de MO o ppm de Nan indicarían ofertas medias de mineralización de N del orden de 155 a 180 kg N min por ha. Esta disponibilidad de N sería suficiente para 5000-6000 kg/ha de maíz. Sin embargo, estas estimaciones, que asumen factores medios de 3.6 kg/ppm Nan y 62 kg N min/%MO, no muestran un ajuste significativo con el N mineralizado estimado según rendimiento del cultivo (Fig. 13).



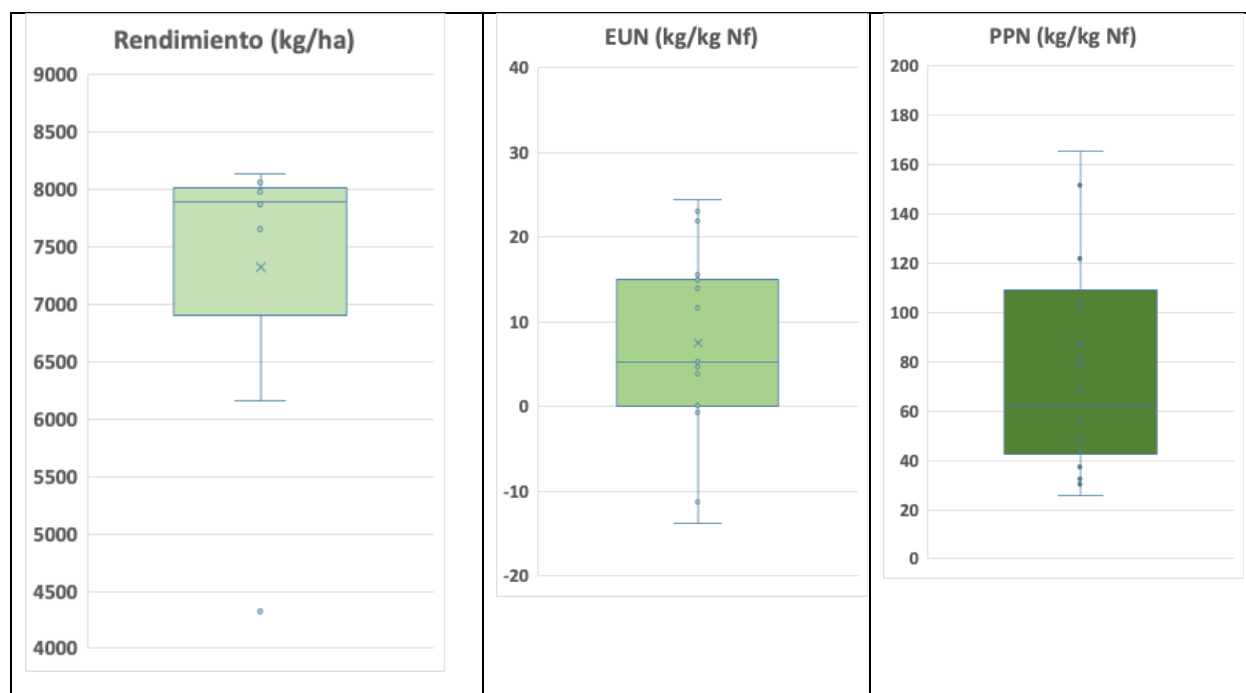


Fig. 8. Estadísticos de materia orgánica (MO), N anaeróbico (Nan), N-nitrato en suelo (0-60 cm) a la siembra, rendimientos sin aplicación de N y respuesta a N en términos de eficiencia (EUN) y productividad parcial de N aplicado como fertilizante (PPN). Franjas de N, CREA Córdoba Norte, 2022/23 y 2023/24, n=9.

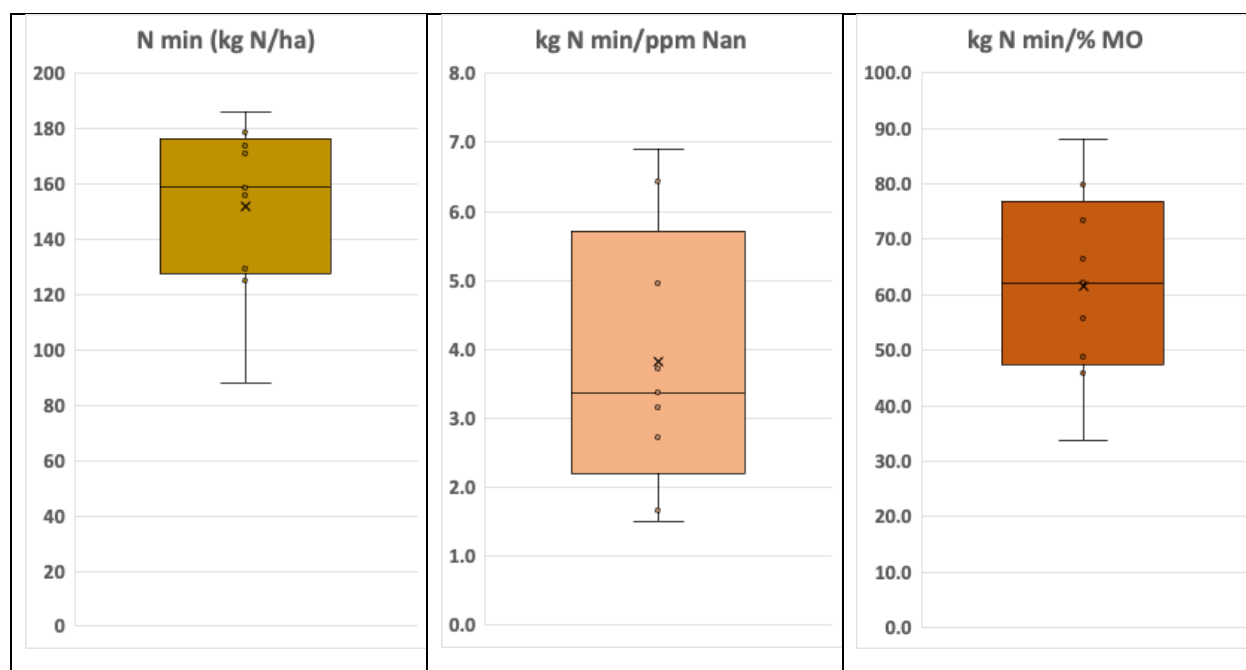


Fig. 9. Estadísticos de estimaciones de N mineralizado en el ciclo del cultivo (Nmin, (Rendimiento sin fertilizar * Requerimiento N suelo/kg maíz) – N-nitrato (0-60 cm)) y kg de N mineralizado por ppm Nan y porcentaje de MO en las franjas sin fertilización nitrogenada. Franjas de N, CREA Córdoba Norte, 2022/23 y 2023/24, n=9.

En síntesis, el diagnóstico de fertilidad nitrogenada para la recomendación de N en maíz muestra que la disponibilidad Ns+f es un predictor débil para la recomendación. Se alcanzarían rendimientos de 8000 kg/ha con 100-120 kg Ns+f. Se logran respuestas superiores al 5% del rendimiento máximo cuando los niveles de N disponible a la siembra son menores de 107 kg N/ha.

El nivel de Nan puede contribuir a una mejor definición de la fertilidad nitrogenada del lote/ambiente, en principio niveles menores de 60 ppm de Nan presentarían mayor probabilidad de respuesta. Los ajustes de aportes por mineralización a partir de Nan y MO muestran alta variabilidad. Futuras evaluaciones deberían reducir la variabilidad de estas estimaciones de mineralización de N a partir de un mayor número de determinaciones de MO y Nan, o incluir otras variables para una mejor modelización de este aporte de N significativo para los cultivos de maíz en la región.

Se propone repetir franjas y estimaciones de mineralización en futuras campañas de manera de poder evaluar mejor estos coeficientes sumando un mayor número de casos y condiciones diferentes a las campañas 2022/23 y 2023/24. Las franjas de N en distintos lotes constituyen una alternativa interesante para poder predecir con mayor certeza las dosis de N a aplicar. Asimismo, deberían buscarse otras variables ambientales y de manejo que puedan estar afectando la oferta del N durante el ciclo del cultivo.

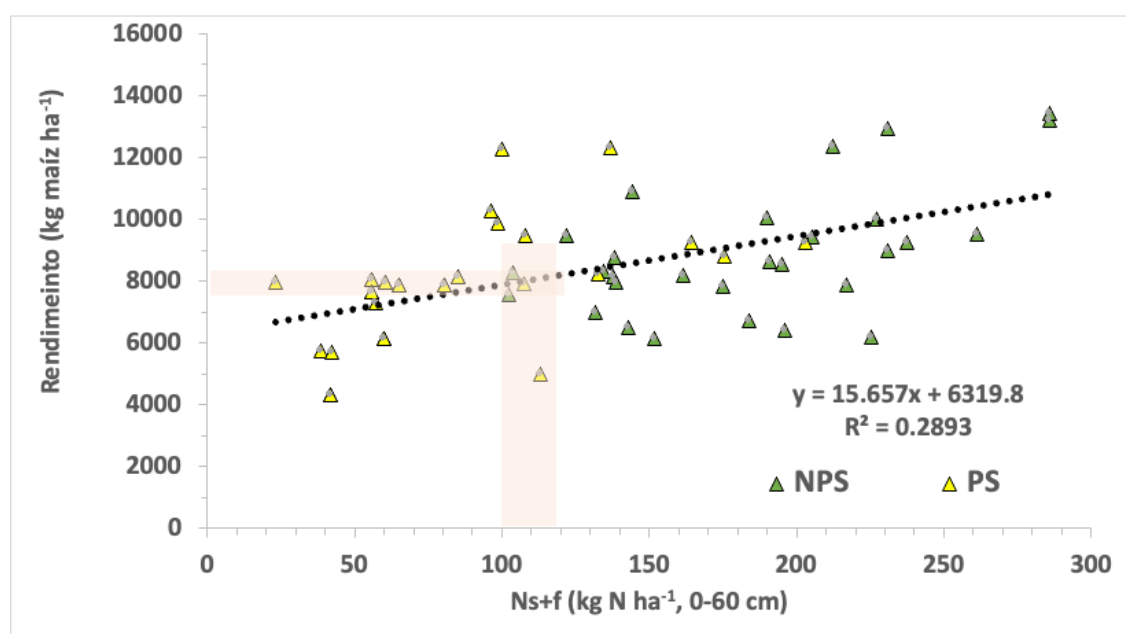


Fig. 10. Relación entre los rendimientos de maíz y la disponibilidad de N (N suelo, 0-60 cm + N fertilizante, Ns+f). Las barras horizontales y verticales rosadas indican niveles de rendimiento de 8000 kg/ha y disponibilidades de Ns+f de 100-120 kg/ha, respectivamente. Sitios de menos de 300 kg Ns+f de Nutrición en la Rotación y Franjas de N de CREA Córdoba Norte, 2014-2023.

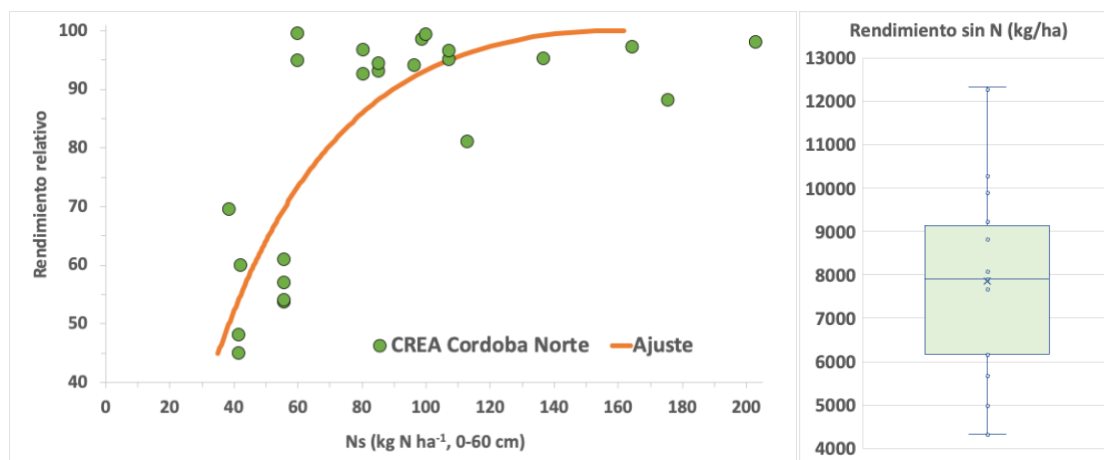


Fig. 11. Relación entre los rendimientos relativos de maíz sin fertilización nitrogenada (rendimiento PS/Rendimiento NPS) y la disponibilidad de N (a la siembra N suelo, 0-60 cm, Ns). La Fig. de caja de la derecha indica la variabilidad de rendimientos utilizados en el ajuste. Sitios de Nutrición en la Rotación y Franjas de N de CREA Córdoba Norte, 2014-2023.

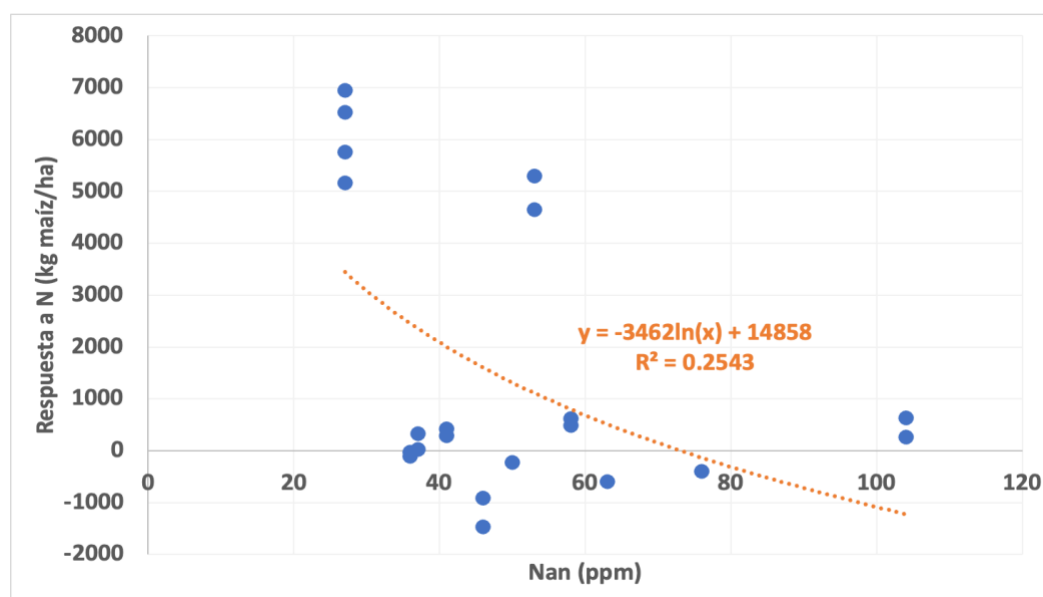


Fig. 12. Relación entre los rendimientos de maíz y el Nan. Sitios de Nutrición en la Rotación y Franjas de N de CREA Córdoba Norte, 2014-2023.

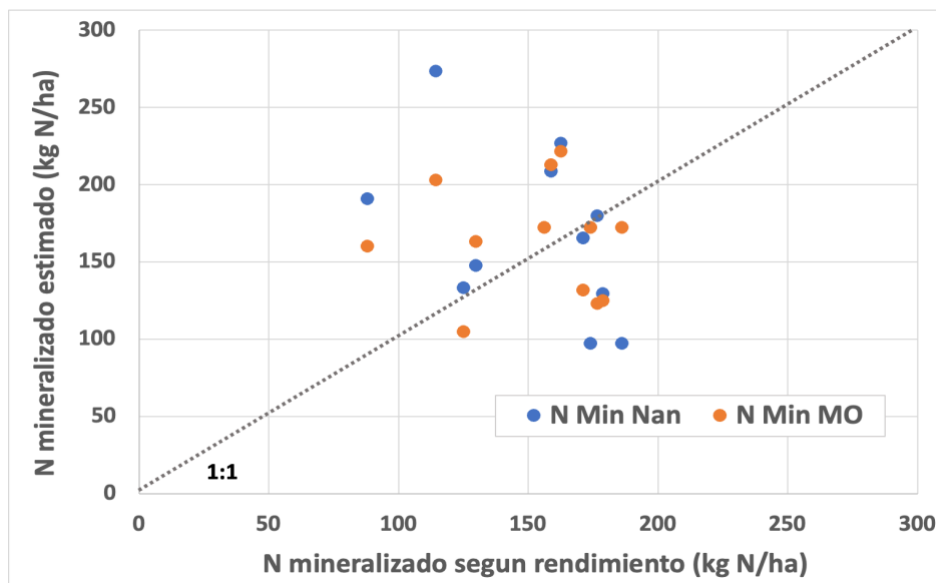


Fig. 13. Relación entre la mineralización de N estimada con factores fijos de MO (62 kg N por %MO) y de Nan (3.6 kg N por ppm Nan) versus N mineralizado según rendimiento del cultivo ($N_{min} = (\text{Rendimiento} \times 30 \text{ kg N/t}) - N_{disponible \text{ a la siembra}}$). Sitios de menos de 300 kg Ns+f de Nutrición en la Rotación y Franjas de N de CREA Córdoba Norte, 2014-2023.

>. ANÁLISIS DE LAS RESPUESTAS A FOSFORO EN SOJA

Los datos de CREA Córdoba Norte se ajustan a las curvas de calibración para P de región pampeana para soja (Fig. 14). Las respuestas a P o interacciones de P con N o S se registraron mayormente en los sitios con menor nivel de P Bray de la red como C. Almada, o que cayeron a través de los años como Piquillín y Sarmiento.

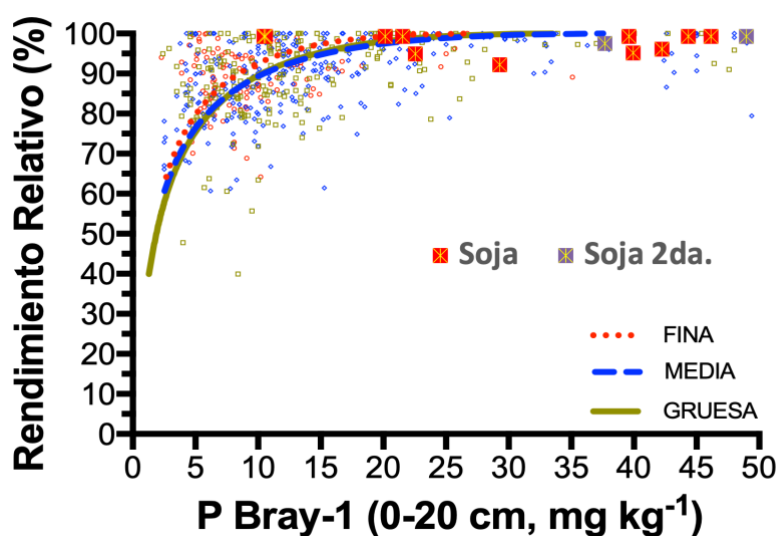


Fig. 14. Relación entre rendimientos relativos de soja (Rendimiento sin P/Rendimiento con P) y nivel de P Bray a 0-20 cm para suelos de distintas texturas según Correndo et al. (2018), y relaciones observadas en los quince sitios de soja 1ra. y dos de soja 2da. de los ensayos Nutrición en la Rotación de la Región CREA Córdoba Norte.

>. EVOLUCIÓN DE ANÁLISIS DE P DEL SUELO Y BALANCES DE NUTRIENTES

A través de ocho años de evaluación, los niveles de P Bray fueron disminuyendo en el tratamiento NS y subiendo moderadamente en el tratamiento NPS (Fig. 15). Estas tendencias se deben a los balances de P negativos en el tratamiento NS y positivos en el tratamiento NPS (Fig. 16). La Fig. 17 muestra la relación entre cambios en P Bray y balances de P. En los tratamientos NS (sin aplicación de P), el P Bray disminuye 0.12 ppm por cada kg de balance negativo de P o, en otras palabras, el P Bray cae 1 ppm cada 8.3 kg de balance negativo de P.

A modo de ejemplo, una soja de 3000 kg/ha de rendimiento remueve unos 12 kg de P por ha, por lo cual, si no se fertiliza, representaría una caída de 1.4 ppm de P Bray:

$$\text{Cambio en P Bray (ppm)} = (\text{Rendimiento (t/ha)} * 3.8 \text{ kg P/t}) * (0.12 \text{ ppm/kg P})$$

$$\text{Cambio en P Bray (ppm)} = (3 \text{ t/ha}) * 3.8 \text{ kg P/t} * (0.12 \text{ ppm/kg P}) = 1.4 \text{ ppm}$$

Igualmente, para un maíz de 8000 kg/ha la remoción es de unos 21 kg P y la caída de P Bray, si no se fertiliza, sería de 2.5 ppm:

$$\text{Cambio en P Bray (ppm)} = (\text{Rendimiento (t/ha)} * 2.6 \text{ kg P/t}) * (0.12 \text{ ppm/kg P})$$

$$\text{Cambio en P Bray (ppm)} = (8 \text{ t/ha}) * 2.6 \text{ kg P/t} * (0.12 \text{ ppm/kg P}) = 2.5 \text{ ppm}$$

Los balances de N fueron negativos para todos los tratamientos ya que las dosis aplicadas en maíz buscaban optimizar rendimientos sin reponer el N removido en granos. El aporte de la fijación biológica de N en soja se consideró del 60% del N absorbido por el cultivo (Fig. 16). La reserva de N del suelo es la materia orgánica (MO) y balances de negativos de 500-600 kg N/ha como se observa para el promedio de los tratamientos Testigo y PS, representarían el N contenido en 0.5% de MO. En los tratamientos con N, el balance sigue siendo negativo porque se usaron dosis bajas de N en gramíneas y no se aporta N en soja.

En el caso de S, las dosis aplicadas, en los tratamientos correspondientes, permitieron mantener balances levemente positivos.

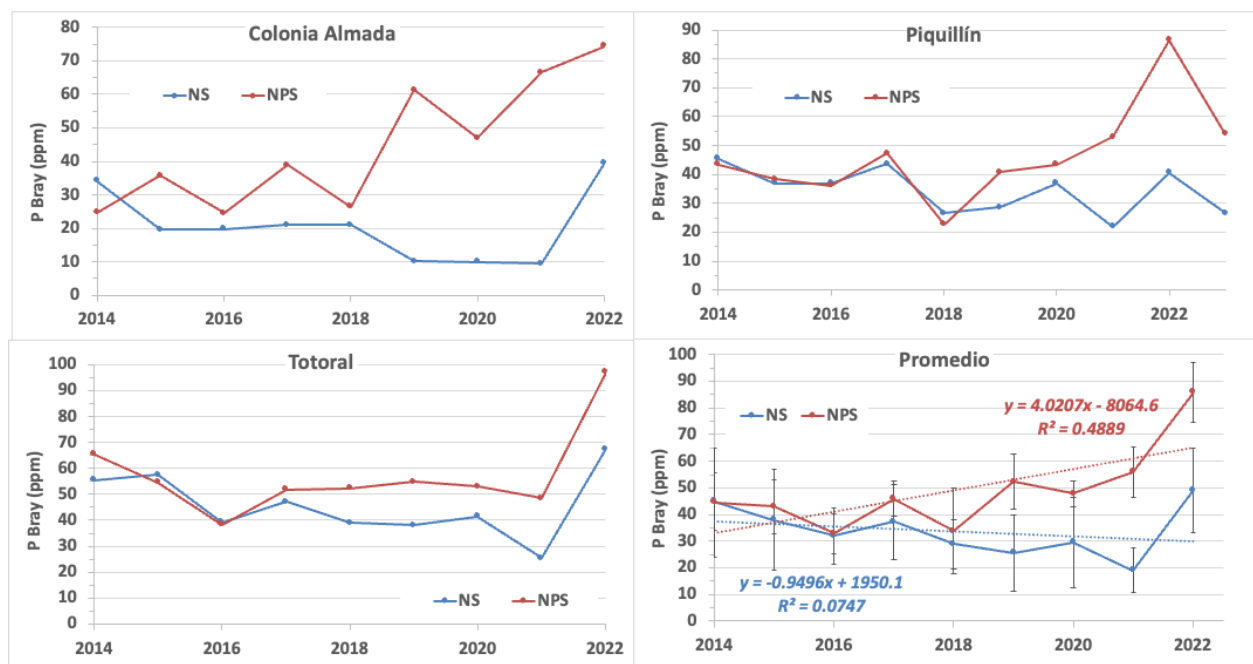


Fig. 15. Evolución de los niveles de P Bray a través de los siete años de evaluación para los tratamientos NS y NPS. Sitios C. Almada, Piquillín y Totoral y promedio de los tres sitios experimentales, 2014/15 a 2022/23 inclusive.

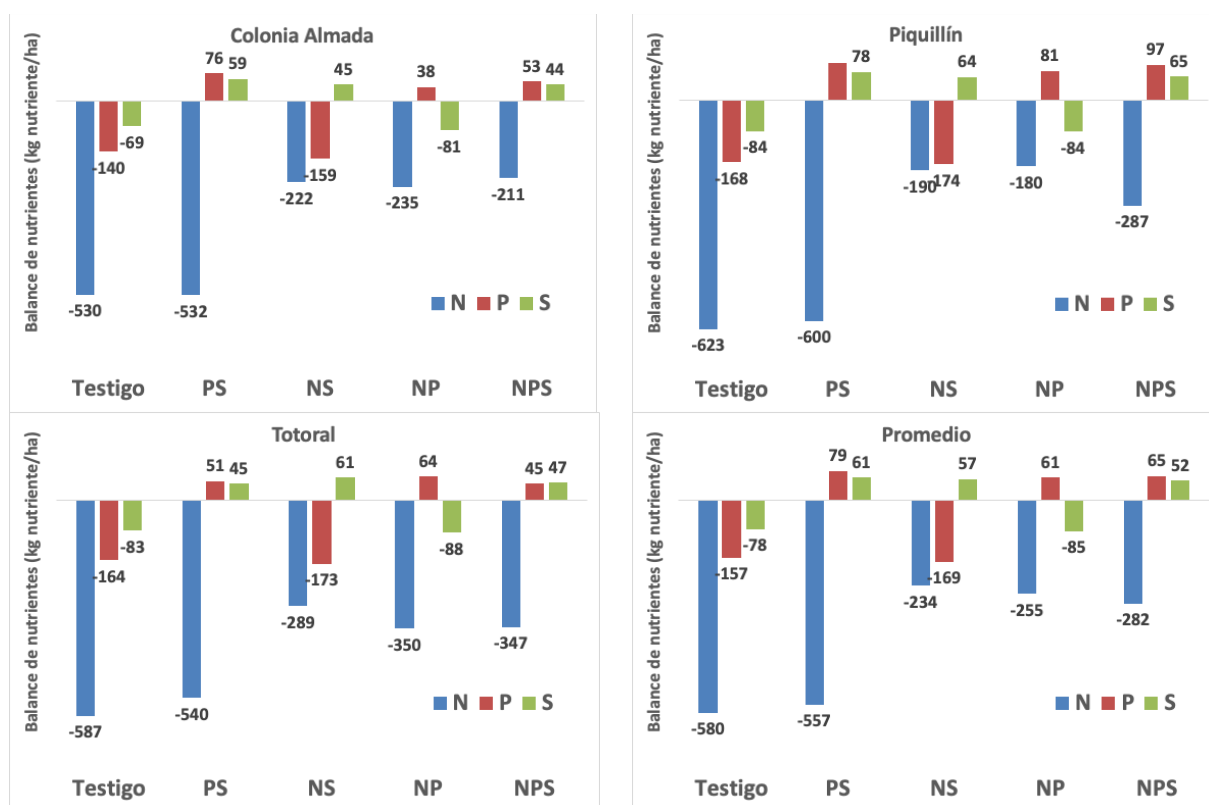


Fig. 16. Balance de nutrientes N, P y S de C. Almada, Piquillín, Totoral, y promedios de los tres sitios, para el Testigo y los tratamientos de fertilización con NPS. Periodo 2014/15 a 2022/23 inclusive, en Piquillín hasta 2023/24 inclusive.

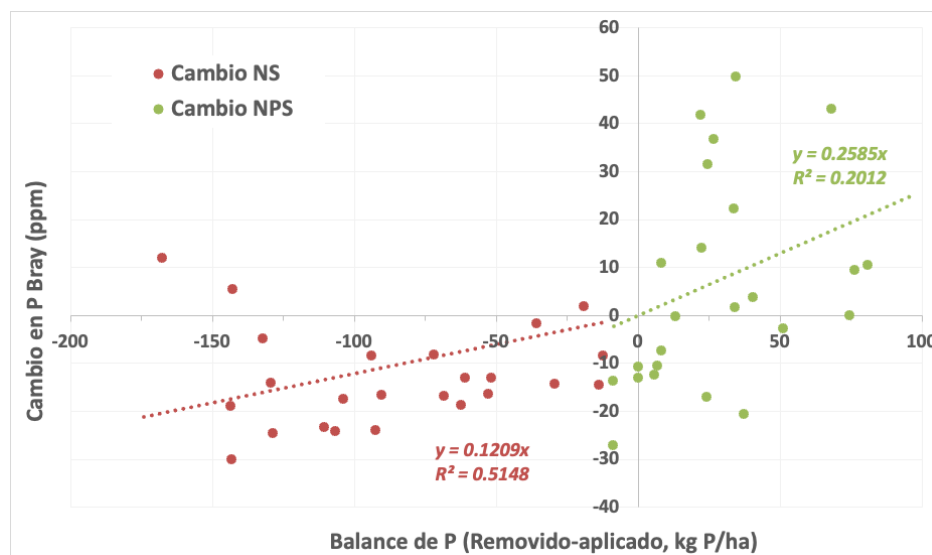


Fig. 17. Cambios de P Bray según balances de P. Datos de 2014/15 a 2022/23 para los sitios C. Almada, Piquillín y Totoral.

>. COMENTARIOS FINALES

Los datos de rendimientos y respuestas indicarían la necesidad de prestar particular atención a N en maíz en lotes/ambientes con potenciales de rendimiento inferiores a 6000 kg/ha y a PS en todas las condiciones, especialmente en las de alto rendimiento. La restricción para este análisis es el reducido número de datos (n=6, 3 sitios-año) para sitios de menos de 6000 kg/ha y un número mayor de datos (n=22, 11 sitios-año) para sitios mayores de 6000 kg/ha. Por otra parte, la oferta de agua no tuvo relación con los rendimientos y respuesta a la fertilización.

Con respecto al manejo de P, debería buscarse mantener los niveles de P Bray por arriba de las 20 ppm o, en los suelos con niveles menores, aumentar el P Bray a valores de 20 - 25 ppm aplicando cantidades de P superiores a la remoción de P en grano (balances positivos de P, aplicación > remoción).

>. AGRADECIMIENTOS

A los productores y personal de los establecimientos donde se realizan estos ensayos. A Nutrien Ag Solutions por el apoyo a estos ensayos de largo plazo.

>. REFERENCIAS

Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P., & Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>

Producción de materia seca, cambios en la condición de acidez y absorción de nutrientes del raigrás perenne (*Lolium perenne* L) en suelos tratados con “Spanish River Carbonatite” (SRC) bajo condiciones controladas

► ► **Torres Duggan M^{1;2*}; Quintero³, CE; Leal⁴, PR & ³Zamero, MA**

¹Tecnoagro; ²Docente Especialización en Fertilidad del suelo y Fertilización (EPG-FAUBA); ³Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER); ⁴Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Depto. Cs. Geológicas, Universidad de Buenos Aires

✉ mjitorresduggan@gmail.com

>. INTRODUCCIÓN

La acidez edáfica y las deficiencias de cationes básicos como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) constituyen uno de los principales condicionantes y limitantes de la productividad de cultivos (Álvarez et al. 2015; Torres Duggan y Rodríguez 2016). En los últimos años diferentes investigaciones muestran un deterioro de la fertilidad de los suelos de la Región Pampeana y particularmente una progresiva pérdida de bases de cambio que evidencian una tendencia a la acidificación (Barbieri et al 2015; Larrea et al. 2023; Taboada et al. 2024). A diferencia de lo que ocurre en países desarrollados y con sistemas de producción comparables (e.g. medio oeste de EE.UU, Australia, etc.), el origen de la acidificación no proviene del exceso de nitrógeno (N) amoniacal sino de la remoción de bases (i.e. balances negativos) en contextos de escaso o nulo uso de fertilización cálcicos y/o magnésicos, que, a diferencia de países de la región como Chile, Paraguay o Uruguay, no es una práctica habitual en la Argentina. Si bien la acidificación de los suelos en el ámbito templado de la Región Pampeana parecería ser aún un fenómeno incipiente y moderado, el monitoreo de los suelos muestra una clara tendencia decreciente en los niveles de pH y en la concentración de bases de cambio. Asimismo, trabajos locales comienzan a detectar respuestas moderadas al agregado de enmiendas cálcicas (Vázquez et al. 2010 y 2012; Vázquez y Millán, 2017).

Los fertilizantes y/o enmiendas de origen mineral representan recursos estratégicos para mejorar la fertilidad de los suelos y la nutrición de las plantas (Herrmann y Torres Duggan, 2016; Herrmann, 2018; van Strateen, 2022). Dentro del espectro de rocas y minerales con potencial de uso para mejorar la fertilidad del suelo y/o la nutrición mineral de las plantas, las carbonatitas y los silicatos en general han despertado un marcado interés por su gran potencial no solo para mejorar la fertilidad o calidad de los suelos o proveer nutrientes (Jones et al. 2020) sino también como recursos estratégicos que permitirían secuestrar carbono a escala global asociado a su aplicación y meteorización en suelos (Beerling et al 2025).

Las carbonatitas son rocas carbonáticas de origen magmático compuestas principalmente por calcita y silicatos de diferente mineralogía (De los Santos Valladales et al. 2022). A diferencia de las rocas carbonáticas de origen sedimentario (i.e. calizas o dolomías), las carbonatitas pueden presentar mayor diversidad de minerales en su arreglo mineralógico, lo cual las hacen más atractivas como fertilizante o enmienda pudiendo no solo funcionar como “corrector químico” sino también aportando macro y/o micronutrientes. Asimismo, dentro del espectro de carbonatitas conocidas y con potencial de uso agronómico, existe una que se denomina “Spanish River Carbonatite” (SRC), cuyos yacimientos se ubican en Sudbury (Ontario, Canadá), y que por su génesis y mineralogía se la consideran de las más relevantes para ser utilizada en la agricultura (Jones et al 2020). Si bien este recurso mineral es bien conocido desde el punto de vista geológico y geoquímico, existen pocos antecedentes que caractericen integralmente esta carbonatita desde la perspectiva petrográfica, mineralógica y agronómica con el fin de comprender su modo de acción y potencial de uso como enmienda y/o fertilizante. Así, la evaluación de la calidad agronómica debe integrar estos aspectos (Rodríguez y Torres Duggan, 2012). Los objetivos del trabajo fueron: (i) Caracterizar petrográfica y mineralógicamente la SRC, (ii) Evaluar el efecto del SRC sobre la producción de materia seca (MS) y absorción de cationes básicos (Ca, Mg, K) en suelos de diferente acidez cultivados con raigrás perenne (*Lolium perenne* L) en invernáculo y (iii) relacionar las características mineralógicas del SRC con los efectos observados en suelo y planta, y proponer modos de acción del SRC como corrector de suelos y/o fuente de nutrientes.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Caracterización petrográfica y mineralógica

Las muestras del SRC se tomaron de un yacimiento ubicado en Sudbury (Ontario, Canadá) y descrito como el “Spanish River Carbonatite Complex” (Fig. 1). Dentro de la limitada investigación que se ha hecho en el mundo de las carbonatitas, el depósito de SRC en Sudbury es uno de los que despierta especial atención en los últimos tiempos (Jones et al. 2020). Se trata de una formación ígnea intrusiva formada hace 1838 millones de años, que por la cercanía y por coincidir en la antigüedad con el gran cráter de Sudbury (datado en 1849 millones de años), se considera que pudo haber tenido influencia en su génesis. Los detalles geológicos, geoquímicos y mineralógicos del complejo del Spanish River Carbonatite se describen en Sage (1987).



Figura 1. Vista general de una parte del yacimiento de Spanish River Carbonatite (SRC) en Sudbury (Ontario, Canadá). Crédito foto: Martin Torres Duggan.

Las muestras de roca fueron descriptas y analizadas desde el punto de vista petrográfico y mineralógico (análisis macro y microscópico) en el Departamento de Ciencias Geológicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Así, para las diferentes muestras de roca asociadas a distintas facies del complejo carbonatítico, se realizaron descripciones macro y microscópicas. En la Fig. 2 se muestran fotografías de las muestras previo a su procesamiento petrográfico.



Figura 2. Muestras de rocas de diferentes facies petrográficas del complejo del Spanish River Carbonatite (SRC) en Sudbury (Ontario, Canadá). La escala indicada en las fotografías es aproximada. Crédito foto: Dr. Pablo Leal (UCEN, UBA).

En términos muy generales, las diferencias en color y textura de las rocas se relacionan con su composición mineralógica. La coloración blanca corresponde a una facie con presencia de calcita, mientras que los colores más oscuros se asocian con la presencia de mineralizaciones de biotita, anfíboles o piroxenos. También se evidencian asociaciones de diferentes facies en una misma muestra de roca.

Para la observación de los cortes delgados se utilizó un microscopio óptico compuesto de polarización Carl Zeiss (Modelo Ortholux, con aumentos de 2,5; 6,3; 16; 25 y 40X). Las muestras de rocas fueron descriptas siguiendo las normas convencionales, sobre base de sus texturas y composición mineralógica. En algunos casos también se utilizó análisis de difracción de Rayos X en el laboratorio de Difracción del INGEIS mediante un difractómetro marca Bruker (modelo D2Phaser) con ánodo de Cu. Los datos se midieron en el intervalo de barrido (2θ) comprendido entre 4 y $60,5^\circ$ con un paso de $0,07^\circ/1\text{seg}$, slit de divergencia de 10° y slit de recepción de 0,1mm. El análisis de datos obtenidos se realizó utilizando el programa Profex y las bases de datos PDF2 (International Centre for Diffraction Data-ICDD-1997) y COD-2007 (Crystallography Open Database).

2. Experimento en invernáculo

Con muestras del SRC en polvo proveniente de Canadá (densidad=1,57; Ca=21,4%; Mg=1,9%; P=1,18 y K=1,0%) derivada del proceso de trituración y molienda de todo el complejo de carbonatita, se llevó a cabo un experimento en invernáculo cultivando raigrás perenne (*Lolium perenne* L) en macetas de 2L.

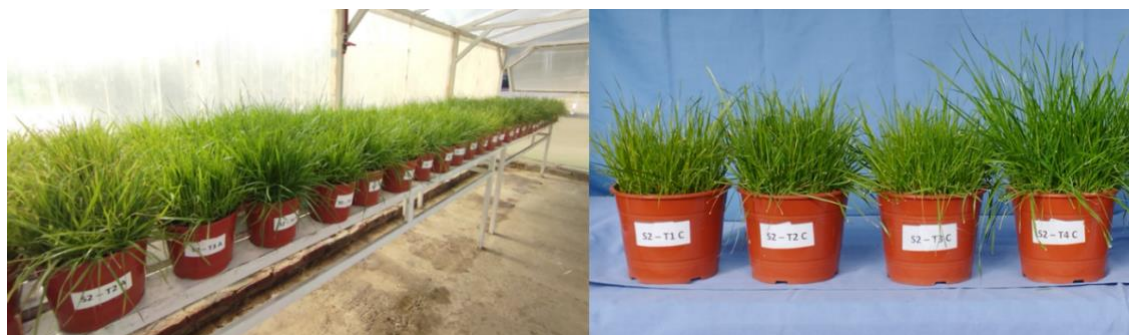


Figura 3. Vista del experimento y del tipo de macetas utilizadas en los experimentos. Crédito fotos: Dr. César Quinteros (UNER).

El experimento se realizó en instalaciones de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER). Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) con cuatro repeticiones. Las macetas se regaron para que la disponibilidad hídrica no limite el crecimiento. Si bien se evaluó un gran número de tratamientos para evaluar interacciones entre el uso del SRC y nutrición mineral, en este escrito se muestran y discuten los resultados de algunos de los tratamientos evaluados (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos evaluados y su descripción.

Referencia del tratamiento	Tratamiento	Descripción
T1	Testigo absoluto	Suelo natural sin agregado de nutrientes
T2	Nutrientes no limitantes	Suelo natural tratado con agregado de N, P, K, Ca, Mg y S solubles en agua en concentraciones no limitantes
T3	SRC al 10% (v/v)	Suelo natural mezclado y homogeneizado con SRC (sin agregado de nutrientes solubles)
T4	SRC + nutrientes no limitantes	Suelo natural mezclado y homogeneizado con SRC y con agregado de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) solubles en concentraciones no limitantes del crecimiento

También se sumaron tratamientos de omisión de K y P solubles (i.e. agregado de nutrientes solubles menos P o K) en suelos tratados con SRC, para explorar la biodisponibilidad del K y P.

En todos los casos, los tratamientos se evaluaron en dos tipos de suelos, con diferente acidez, uno ácido obtenido de la capa superficial de suelos en cercanías de la zona de Ita Ibaté (Corrientes) y otro con menor acidez proveniente de Arroyo Barú (Entre Ríos), que a los fines de este escrito se los indicará como suelo “ácido” o “neutro” (Tabla 2).

Tabla 2. Características de fertilidad de los suelos utilizados.

Analito	Unidad	Suelo ácido	Suelo neutro
pH en agua (1:2,5)	-	4,6	6,2
CE	dS/m	0,9	0,5
MO	%	6,2	3,8
P Bray 1	mg/kg	7,9	26,5
K intercambiable	cmol (+)/kg	0,5	0,2
Ca intercambiable		4,8	18,1
Mg intercambiable		2,7	4,6
Na intercambiable		0,4	0,3
Al intercambiable		0,7	0,0
CIC (acetato de amonio 1 N pH=7,0)		15,4	25,3

Durante el experimento, que duró 150 días, se realizaron 4 cortes de biomasa y se midió la concentración de nutrientes en tejido para poder evaluar la absorción de los mismos en la biomasa aérea. Asimismo, al final del experimento se cuantificó el pH, CIC y concentración de cationes básicos.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Análisis petrográficos y mineralógicos

Si bien se realizaron análisis petrográficos y mineralógicos de diferentes facies del yacimiento de SRC, en este escrito se muestra solo un ejemplo de estudio macroscópico de textura de una facie dominada por calcita y agregados de mica (Fig. 4), como así también resultados del análisis de cortes delgados sobre muestras de una facie geológica con mayor contenido de piroxenos y anfíboles (Fig. 5).

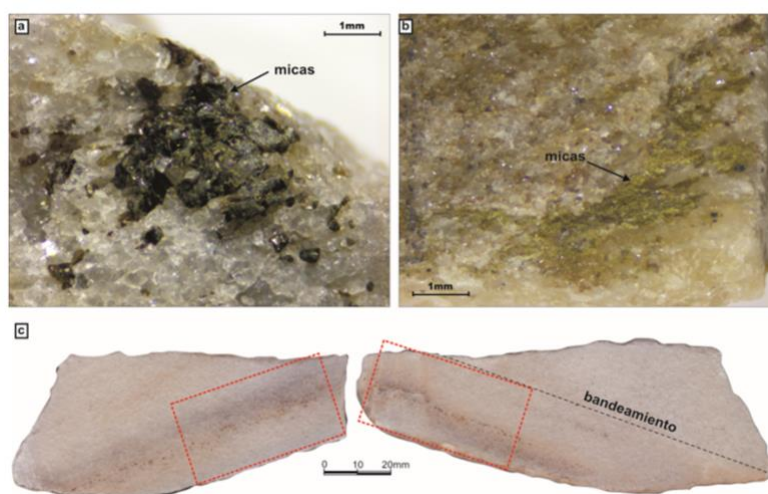


Figura 4.: a y b) Fotografías de los agregados de micas bajo lupa binocular. c) corte transversal indicando la posición de los cortes delgados. Crédito foto: Dr. Pablo Leal (FCEN, UBA)

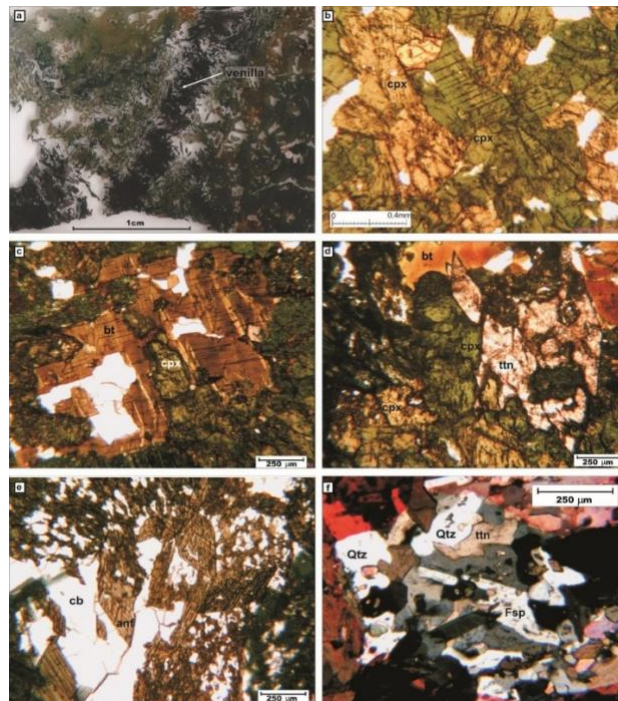


Figura 5. Fotografías de los cortes delgados de una de las muestras analizadas. a) Venilla de anfíboles atravesando la mineralogía primaria. b) Cristales de clinopiroxenos (cpx) (imagen sin analizador). c) Lámina de biotita (bt) entre los intersticios (imagen sin analizador). d) Cristales de esfena (titanita, ttn) junto a piroxenos (cpx) y biotita (bt) en intersticios (imagen sin analizador). e) Cristales de anfíboles (anf) junto a calcita y restos de clinopiroxeno dentro de la venilla (imagen sin analizador). f) Cristales de feldespato (Fsp) y cuarzo (Qtz) de menor tamaño entre los intersticios de la mineralogía secundaria (imagen con analizador). Crédito foto: Dr. Pablo Leal. FCEN, UBA)

Tanto los resultados de los análisis petrográficos que se muestran en este escrito como los demás no presentados (i.e. evaluaciones sobre otras muestras de roca del yacimiento), son consistentes con los antecedentes geológicos, geoquímicos y mineralógicos reportados en el área en donde se localiza el depósito del SRC (cita).

Los principales constituyentes mineralógicos de la SRC con valor agronómico son la calcita, biotita, piroxenos y anfíboles que se presentan en rangos variables de abundancia según la facie de SRC considerada. La calcita aporta principalmente Ca que se hidroliza en suelo y aumenta el pH, mientras que la biotita es la fuente principal de K del material. Otros componentes como biotitas, clorita, entre otros, también contribuye con Mg.

Las abundancias relativas de cada constituyente mineralógico mayoritarios o minoritario detectados en los análisis de secciones delgadas variaron con la facie de SRC considerada, existiendo muestras de roca con alta abundancia (>90-95%) tanto en componentes como calcita o biotita con situaciones intermedias (Tabla 3). También se destacó la abundancia de piroxenita (que explicaría el contenido de Mn) y de apatita, en abundancias variables (entre 3 y 15% según la muestra analizada). Asimismo, se observó la presencia de minerales accesorios como esfena, cloritas, hematita, entre otros. Algunos de estos constituyentes aportan algunos micronutrientes con interés agronómico.

Tabla 3. Porcentajes aproximados de los componentes principales de las muestras de SRC analizadas en los cortes delgados.

Muestra de roca	Carbonatos	Piroxenos	Anfiboles	Biotita
1	>95	-	-	<5
2	10	30	50	10
3	0-10	40-45	10	40
4	15	25	-	35
5	-	<1	<5	90-95
6	90	<1	-	5

Los resultados de los análisis mineralógicos son consistentes con otros grupos de investigación que han estudiado el SRC como el publicado por De Los Santos Valladares et al. (2022). Sin embargo, a diferencia de estos autores, en las muestras que se trajeron desde Sudbury (Ontario, Canadá) y que son motivo del presente trabajo, no se detectó vermiculita en el análisis de secciones delgadas. Podrían estar presentes en niveles bajos que no son detectados por las técnicas petrográficas o en facies que no fueron muestreadas.

2. Experimento con raigrás perenne en invernáculo

Producción de materia seca y cambios en propiedades edáficas

La aplicación de nutrientes solubles (i.e. fertilización balanceada) y de SRC aumentaron 250 y 210% la producción de MS aérea del raigrás perenne en suelo ácido y 180 y 160% en suelo neutro, respectivamente (Fig. 6).

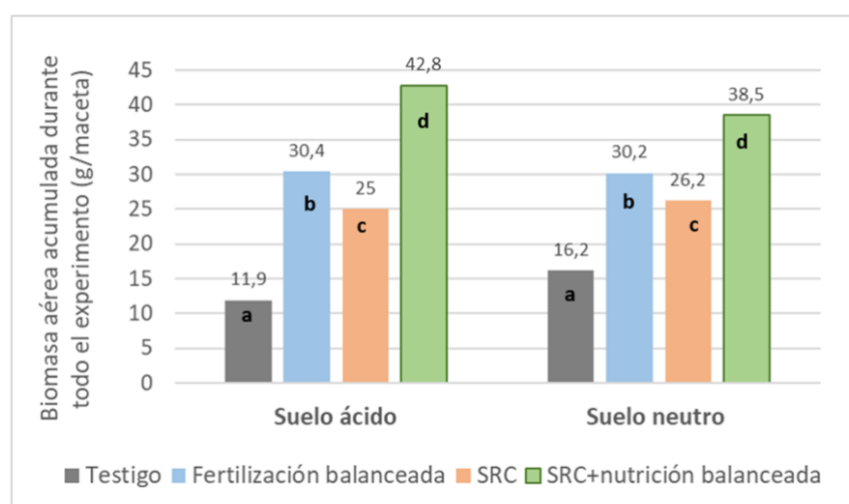


Figura 6. Producción de MS acumulada del raigrás perenne a lo largo del experimento (N=4). Letras distintas entre tratamientos dentro de cada tipo de suelo indican diferencias estadísticamente significativas en el test de comparación de medias (LSD, $\alpha=0,05$).

Se observó un marcado efecto aditivo de la aplicación conjunta de SRC y nutrientes solubles (N, P, K, Ca, Mg, i.e. fertilización balanceada) sobre la productividad del cultivo. Así, el agregado de SRC en combinación con la fertilización balanceada aumentó 110% y 60% la producción de MS acumulada del raigrás perenne por encima de la alcanzada solamente con el agregado de nutrientes, en el suelo ácido y neutro, respectivamente (Figura 6). Asimismo, el efecto sinérgico entre el SRC y la fertilización balanceada fue aumentando progresivamente a lo largo experimento), consistente con un patrón de disolución progresiva de este tipo de materiales (Fig. 7).

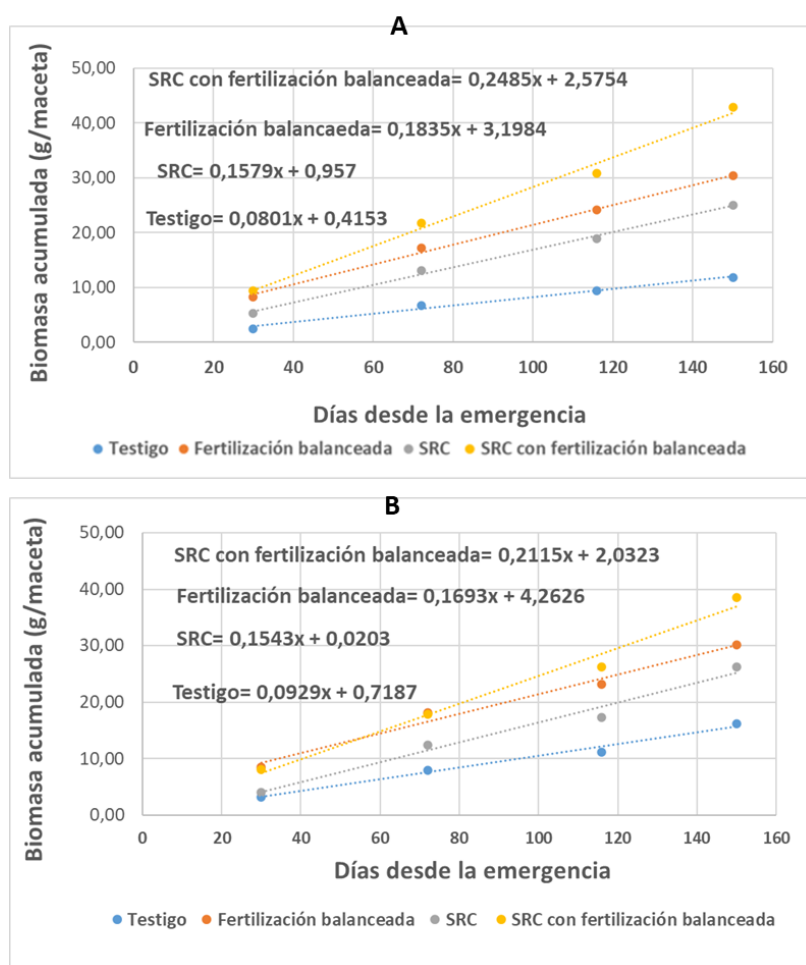


Figura 7. Evolución de la producción de MS seca aérea acumulada de raigrás perenne a lo largo del experimento (N=4). A. Suelo ácido. B. Suelo neutro.

El agregado de SRC aumentó 63 y 30% el pH del suelo ácido y neutro, respectivamente (Tabla 4), que junto a la mejora en la disponibilidad de cationes básicos (e.g. Ca, K), explicaría la mejora en la producción del cultivo.

Los cambios observados en el pH y en general en la concentración de cationes básicos son consistentes con composición mineralógica de la SRC en donde tanto la calcita como los silicatos de Ca y Mg presentan una reacción básica en el suelo y aportan esos cationes (Hermann y Torres Duggan, 2016; Jones et al. 2020; Swoboda et al. 2022). Asimismo, el agregado de SRC prácticamente eliminó el contenido de Al extractable en el suelo ácido consistente con el aumento del pH (Tabla 4).

Tabla 4. Cationes intercambiables, CIC y pH en suelo al finalizar el experimento.

Tratamiento	CIC	Ca	Mg	K	Na	Al	pH
	cmol ₍₊₎ /kg						
	Suelo ácido						
Testigo	17,8 a	5,4 a	2,5 a	0,10 a	0,46 a	0,69 a	4,6
SRC	15,5 a	25,0 b	1,8 a	0,14 b	0,48 a	0,0 b	7,5
	Suelo neutro						
Testigo	24,4 b	18,6 a	4,6 a	0,18 a	0,42 a	0,0 a	5,9
SRC	22,4 a	30,7 b	1,6 b	0,21 b	0,49 a	0,0 a	7,7

Nota: letras distintas entre tratamientos dentro de cada columna (analito) indican diferencias estadísticamente significativas en test de medias LSD ($\alpha=0,05$).

Si bien el contenido de Al intercambiable del suelo ácido (0,69 cmol₍₊₎/kg) es marcadamente inferior a los niveles o rangos considerados tóxicos para el crecimiento de las raíces, el mismo se ubica muy por encima de los niveles máximos que se han reportado para suelos de la Región Pampeana. Así, Heredia y Cueva Tacuri (2023), indican niveles medios, mínimos y máximos de Al intercambiable de 0,09, 0,06 y 0,16 cmol₍₊₎/kg de suelo para la Región Pampeana, y relaciones Ca+Mg+K/Al de 143,3; 80,6; y 215 (media, mínimo y máximo) mientras que el suelo ácido utilizado para el experimento con SRC tiene una relación de 11,5.

Por otro lado, y particularmente en el suelo ácido, la concentración y saturación de Ca es muy baja, mientras que los contenidos de K fueron bajos o intermedios. Por consiguiente, las mejoras en crecimiento del raigrás derivarían de una mejor condición de acidez y balance nutricional en el suelo, consistente con la sinergia observada entre aplicación de SRC y la fertilización con fuentes solubles de nutrientes.

Absorción de nutrientes

La dinámica de absorción de nutrientes varió en relación a la acidez de los suelos estudiados. Así, en el suelo ácido, se evidenció una temprana absorción de nutrientes desde el primer corte realizado a los 30 días desde la emergencia, sosteniéndose hasta el final del experimento cuando se realizó el último corte (150 días desde la emergencia, Tabla 5).

Tabla 5. Absorción de K, P, Ca y Mg a los 30 y 150 días de emergido el cultivo (i.e. primer y último corte, respectivamente) en el suelo ácido.

Tratamiento	K	P	Ca	Mg
	mg/maceta			
	30 días desde la emergencia			
Testigo	89,7 a	3,0 a	37,2 a	20,2 a
Fertilización balanceada	296,2 b	55,2 b	80,7 b	69,7 b
SRC	157,5 c	8,5 c	100,5 b	29,0 a
SRC con fertilización balanceada	260,0 b	54,7 b	111,5 b	60,2 b
SRC con fertilización balanceada (sin P)	189,2 c	10,2 c	87,7 b	14,2 a
SRC con fertilización balanceada (sin K)	258,2 b	45,5 c	129,7 b	40,2 c
	150 días desde la emergencia			
Testigo	56,2 a	3,0 a	20,2 a	10,0 a
Fertilización balanceada	68,2 a	47,7 b	83,5 b	18,5 a
SRC	171,0 b	6,0 a	78,2 b	17,0 a
SRC con fertilización balanceada	305,5 c	59,2 c	130,7 c	41,0 c
SRC con fertilización balanceada (sin P)	186,2 b	4,7 a	80,2 b	13,2 a
SRC con fertilización balanceada (sin K)	292,7 c	62,5 c	170,0 d	51,0 c

Nota: letras distintas entre tratamientos dentro de cada columna (analito y momento de evaluación) indican diferencias estadísticamente significativas en test de medias LSD ($\alpha=0,05$).

Por el contrario, en suelo neutro, la absorción de nutrientes del raigrás perenne a los 30 días de emergencia del cultivo fue similar que en el suelo natural (testigo), mientras que al final del experimento (150 días desde la emergencia), se observó un aumento significativo de nutrientes como Ca o K, similar a lo observado en suelo ácido (Tabla 6).

Tabla 6. Absorción de K, P, Ca y Mg a los 30 y 150 días de emergencia del raigrás perenne (i.e. luego del primer y último corte, respectivamente) en el suelo neutro.

Tratamiento	K	P	Ca	Mg
	mg/maceta			
	30 días desde la emergencia			
Testigo	56,2 a	12,0 a	38,7 a	12,5 a
Fertilización balanceada	199,0 b	57,7 b	98,5 b	38,0 b
SRC	67,7 a	10,7 a	35,5 a	10 a
SRC con fertilización balanceada	245,0 c	51,5 b	116,0 b	32,7 b
SRC con fertilización balanceada (sin agregado de P)	245,2 c	21,0 c	117,5 b	48,0 c
SRC con fertilización balanceada (sin agregado de K)	194,0 b	46 b	133 c	66,2 d
	150 días desde la emergencia			
Testigo	30,0 a	11,7 a	46,2 a	23,5 ab
Fertilización balanceada	58,2 a	54,7 b	81,5 b	30,5 ab
SRC	271,5 b	30,5 c	82,7 b	27,5 ab
SRC con fertilización balanceada	347,0 c	82,0 d	118,7 c	29,2ab
SRC con fertilización balanceada (sin agregado de P)	232,0 d	16,5 e	52,7 a	16,0 b
SRC con fertilización balanceada (sin agregado de K)	361,0 c	102,2 f	128,2 c	44,7 ac

Nota: letras distintas entre tratamientos dentro de cada columna (analito) indica diferencias estadísticamente significativas en test de medias LSD ($\alpha=0,05$).

Si se observan los niveles de absorción de nutrientes medidos al final del experimento (i.e. a 150 días de la emergencia del raigrás perenne), se puede apreciar que la absorción de K del raigrás en los tratamientos en donde se aplicó SRC junto con nutrientes solubles sin agregado de K (omisión de K) no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) con el tratamiento en donde la SRC se agregó con todos los nutrientes solubles incluyendo el K (Tabla 5 y 6). En términos simples, esto indicaría que la SRC fue capaz de sostener la biodisponibilidad de K, evidenciando la capacidad de liberar K. Si consideramos que el principal componente potásico de la SRC es la biotita, los resultados del presente experimento muestran una elevada biodisponibilidad de K proveniente de la disolución del SRC en el suelo, tanto en suelo ácido como neutro. Estos resultados son similares a otros estudios reportados en diversas regiones del mundo, evaluando diferentes rocas y minerales potásicos (Swoboda *et al.* 2022). La cristalografía de la biotita, y sobre todo en presencia de suelos con adecuada actividad microbiana, favorecerían procesos de meteorización química y biológica del SRC y al mismo tiempo dicha disolución estimularía la actividad

microbiana alrededor de las zonas de disolución del SRC, promoviendo el crecimiento de las raíces. Este aspecto fue estudiado por Jones et al. (2020), quienes caracterizaron extensivamente a la SRC. Para ello utilizaron muestras de roca del mismo yacimiento y desarrollaron un modelo conceptual de meteorización del SRC basado en la interacción de la RC con el suelo y sus microorganismos. La principal conclusión de los autores, basado también en estudios en condiciones controladas, fue que el agregado de la SRC aumenta el pH y la concentración de Ca intercambiable y reduce la actividad de Al intercambiable. Estos cambios estimulan la actividad microbiana, sobre todo en presencia de fuentes de C (e.g. tuba o MO), promoviendo el crecimiento de las raíces.

A diferencia de lo observado para el K, la absorción de P tendió a ser significativamente menor ($p < 0,05$) cuando la SRC se aplicó junto a nutrientes solubles omitiendo el agregado de P. La menor disponibilidad de P de la SRC se podría relacionar con la mineralogía del componente fosfatado de la SRC (hidroxiapatita), cuya disolución en el suelo se pudo haber reducido en medio alcalino durante la disolución de la calcita que representa la mitad de la masa del SRC. Esta hipótesis se sustenta en la evidencia experimental disponible sobre la influencia del pH sobre la reactividad de rocas fosfáticas sobre todo cuando el suelo o el medio que rodea a la partícula de fosfato en disolución supera un pH de 6-7 (Chien et al. 2009), como ocurrió en los suelos tratados con la SRC.

>. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- ✓ Los principales constituyentes mineralógicos de la SRC detectados en los mediante microscopia óptima petrográfica (análisis de secciones delgadas) son calcita, biotita, piroxenos y anfíboles, con una participación menor de apatita
- ✓ Los efectos observados sobre el pH (aumento de 63 y 30% en suelo ácido y neutro, respectivamente) y en la dotación de cationes básicos (e.g. Ca, K) es consistente con la mineralogía de la SRC y aporta nueva evidencia para comprender el modo de acción de este recurso mineral
- ✓ La aplicación de SRC aumentó 210 y 160% la producción acumulada de MS del raigrás perene en suelo ácido y neutro, respectivamente
- ✓ La aplicación de SRC junto con tratamientos de fertilización balanceada determinó un muy marcado efecto aditivo (sumando un 110 y 60% de biomasa acumulada por sobre los tratamientos en donde solamente se aplicaron nutrientes sin SRC)
- ✓ La sinergia positiva observada en los tratamientos en donde la SRC se aplicó junto a una oferta balanceada de nutrientes solubles es consistente con los cambios y mejoras detectados en el suelo (aumento de pH y en la dotación de cationes básicos) y en la absorción de nutrientes (e.g. Ca, Mg y K)
- ✓ Los resultados de absorción de Ca, Mg, K, como así también el afecto aditivo de la SRC con la fertilización mineral tradicional reflejan la reactividad y efectividad de la SRC como fuente de aplicación directa, y aportan información básica para comprender su dinámica en el sistema suelo-planta aspecto central para el desarrollo de productos que contengan este material

>. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente a John Slack (Ontario, Canadá) por estimular la realización de estos estudios, como así también a la empresa SRC Agrominerals INC por el apoyo financiero para poder llevar a cabo estos estudios; a Pablo Tempone y Lucas Boglietti por la coordinación local.

>. BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, C, PL Fernández y HS Steinbach. 2015. Limitantes de la capacidad productiva de los suelos. En: Fertilidad de suelos y fertilización en la región pampeana. Capítulo 2. R. Álvarez (editor). p 17-45.

Barbieri, PA; Echeverria, HE; Sainz Rozas, HR & JP Martínez. 2015. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. *Soil & Tillage Research*. 152 (29-38).

Beerling, DJ; Kantzas, EP; Lomas, MR; Taylor, LL; S Zhang; Y Kanzaki; RM Eufrazio; P Renforth; ; JF Mecure; H Politt; PB Holden; NR Edwards; L Koh; DZ Epihov; A Wolf; JE Hansen; SA Banwart; NF Pidgeon, CT Reinhard; NJ Planavsky & M Val Martin. 2025. Transforming US agriculture for carbon removal with enhanced weathering. *Nature*. Vol 638. p 425-434.

Chien SH, LI Prochnow & H Cantarella. 2009. Recent Developments of Fertilizer Production and Use to Improve Nutrient Efficiency and Minimize Environmental Impacts. Chapter 8. *Advances in Agronomy*, Vol 2, 102. Pp 268-322. Elsevier INC.

De Los Santos Valladares; JH Jhoncon kooyip; KE Borja-Castro; MI Valerio-Cuadros; RA Valencia-Bedregal; JJ Velazquez-Garcia, C. Villanueva Guilar; CEW Barnes & AG Bustamante Dominguez. 2022. Chacacterization of the Spanish River Carbonatite (SRC) for agriculture fertilizer. *Hyperfine Interactions*. 243: 19.

Heredia, OS y M. Cueva Tacurí. 2023. La acidificación de algunos suelos pampeanos sometidos a agricultura continua y su relación con el contenido de aluminio intercambiable. En: Degradación de tierras con énfasis en la Región Pampeana: aportes para una gestión racional del uso agropecuario. F. Behrends Kraemer, C.I. Chagas, M. Castiglioni y M. Massobrio (editores). Capítulo 4. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. págs 143-169.

Herrmann, C. 2018. Rocas y minerales como fertilizantes de suelos agrícolas. *Ciencia Hoy*. 27(158):11-19.

Herrmann, C y M Torres Duggan. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. En: FX Pereyra & M Torres Duggan (Eds.). *Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS). Pp 329-355. Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV).

Larrea, G; N Wyngaard; M. Eyherbide, N Reussi Calvo; M Puricelli, P Barbieri, H Angelini, F Salvagiotti & H Sainz Rozas. 2023. Cation nutrient reserves decline markedly under intensive cropping of Pampas Mollisols. *Catena* 223 (2023) 106916.

Jones, JMC; Guinel, FC & PM Antunes. 2020. Carbonatites as rock fertilizers: a review. *Rhizosphere* 13. 10 p

- Rodríguez, MB y M Torres Duggan. 2021. Caracterización de los fertilizantes, enmiendas, abonos y su calidad agronómica. En: R Álvarez (Ed.). Pp. 391-425. Fertilización de Cultivos y Fertilización en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (EFA).
- Sage, RP. 1987. Sanish River Carbonatite Complex. Mines and Minerals Division. Ontario Geological Survey. Study 30. Ministry of Northern Development and Mines. Ontario.
- Taboada, MA; Peralta, GE; CR Álvarez & G Studdert. 2024. Threats and recovery of black soils of Argentina: A story with surprises and discoveries. Moscow University. Soil Science Bulletin. Vol 79. No. 5. Pp. 608-619. Allerton Press., INC.
- Torres Duggan, M. y MB Rodríguez. 2016. La fertilidad de los suelos en relación a la edafogénesis. En: Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Capítulo 11. Pereyra, F.X y M. Torres Duggan (editores). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS). Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV). p 288-312.
- van Straaten, P. 2022. Distribution of agromineral resources in space and time: a global geological perspective. Pesq. Agropec. Bras.(PAB). Brasilia. V57. e01453.
- Vázquez, ME; A Terminiello; A Casciani; G Millán; P Galetti; F Guilino; J Garcia Diaz, J Kostiria y M García. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en ámbitos templados argentinos. Ciencia del Suelo (Argentina). 28 (2):141-154.
- Vázquez, ME y GJ Millán. 2017. Acidez del suelo. Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En: Manejo y conservación de suelos. ME Vázquez (Editora). Capítulo 8. p 229-306.
- Vázquez, ME; A Terminiello; A Casciani; G Millán; D Cánova; P Gelati; F Guilino; A Dorrnoro; Z Nicora, L Lamarche y M García. 2012. Respuesta de la soja (*Glicinemax*Merr) a enmiendas básicas en algunos suelos de la provincias de Buenos Aires y Santa Fe. Ciencia del Suelo (Argentina). 30 (1): 43-55.

Dosis y disponibilidad óptima económica para N en maíz en el NEA

► ► **Stahringer NI^{1*}, Fernández JA², González Midón N³,
Sarracini D³, Garfagnoli R⁴, Almirón S⁴ & Madias A⁴**

¹ Fac. de Ciencias Agrarias – UNNE, ² Univ. of Queensland, ³ Experta AGD y ⁴ Sist. Chacras – Aapresid

✉ nicostahringer@hotmail.com

Nota: Trabajo que forma parte del informe original presentado en la Revista de la Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino – Resultados de la campaña 23/24 y avances en la calibración de modelos para N en maíz en el NEA.

>. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el pilar de la nutrición del maíz, siendo el nutriente que más frecuentemente limita la producción de este cultivo (Correndo y García, 2014). La fertilización nitrogenada en maíz es una práctica habitual debido a la relación positiva costo/beneficio de aplicar N por la elevada frecuencia con la que se obtiene respuesta positiva (Salvagiotti et al., 2002). Por este motivo, se considera que el N es la “bala de plata” en la fertilización nitrogenada en maíz (Reussi Calvo et al., 2020).

El incremento de productividad como respuesta al aumento del N disponible se ajusta a lo que se conoce como respuesta de rendimientos decrecientes (Maddoni et al, 2003). La principal herramienta utilizada en Argentina para el diagnóstico y la posterior recomendación de N en maíz se basa en la disponibilidad de N (Nd), que se obtiene de sumar el N del suelo (Ns) (obtenido mediante la determinación del N de nitratos en el suelo en la profundidad de 0-60 cm previo o a la siembra) más el N aportado por el fertilizante (Nf). En general, en la región pampeana se ha observado que el Nd (Ns+Nf) consigue explicar una buena parte de la variación del rendimiento del maíz. Sin embargo, mejores diagnósticos pueden ser obtenidos considerando otras variables como: factores de suelo limitantes, variables climáticas, factores de manejo (plagas, enfermedades, malezas), presencia de napa, disponibilidad de otros nutrientes, aporte de N mineralizado durante el ciclo del cultivo, entre otros (Correndo y García, 2014). No obstante, esta herramienta recientemente ha sido calibrada para los sistemas de producción del NEA (Stahringer et al., 2025).

En el NEA se está observando en los últimos años un incremento de los rendimientos del cultivo de maíz, al mismo tiempo que los suelos presentan en general cada vez más años de agricultura (reflejado por ejemplo en menores concentraciones de MO). Esta realidad, de creciente demanda de N por maíces cada vez con mayores potenciales productivos, en un escenario de menor oferta de N por parte del suelo, está haciendo con que cada vez se esté fertilizando más. Sin embargo, muchas veces las recomendaciones de fertilización habitualmente no tienen en cuenta la disponibilidad de N que tiene el suelo a la siembra, los recientes modelos que han sido calibrados para la región, ni las relaciones entre precio de fertilizante y del grano.

De esta manera, el objetivo de este trabajo fue obtener valores de disponibilidad óptima económica, para distintas relaciones de precios, y calcular valores de dosis óptima económica para N en maíz en el NEA.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de los sitios de N en maíz que integran la base de datos

Se confeccionó una base de datos con sitios de las campañas 20/21, 21/22 y 22/23 para obtener las disponibilidades y dosis óptimas económicas. Lamentablemente, ningún sitio de la campaña 23/24 formó parte de esta base de datos debido a lo catastrófica que fue dicha campaña por problemas muy severos de estrés térmico e hídrico, así como enfermedades del maíz causadas por la chicharrita (*Dalbulus maidis*). La base de datos se armó con un total de 31 experimentos de N en maíz que fueron conducidos en lotes de producción en siembra directa que tuvieron diferentes historiales de manejo previo. Se excluyeron del análisis sitios que, por diversos motivos sufrieron inconvenientes que comprometieron la normal conducción de los ensayos (por ej.: estreses bióticos y abióticos extremos, etc.). La distribución de los ensayos por provincias fue: 18 en Santiago del Estero, 9 en Chaco y 4 en Santa Fe (**Figura 1**).

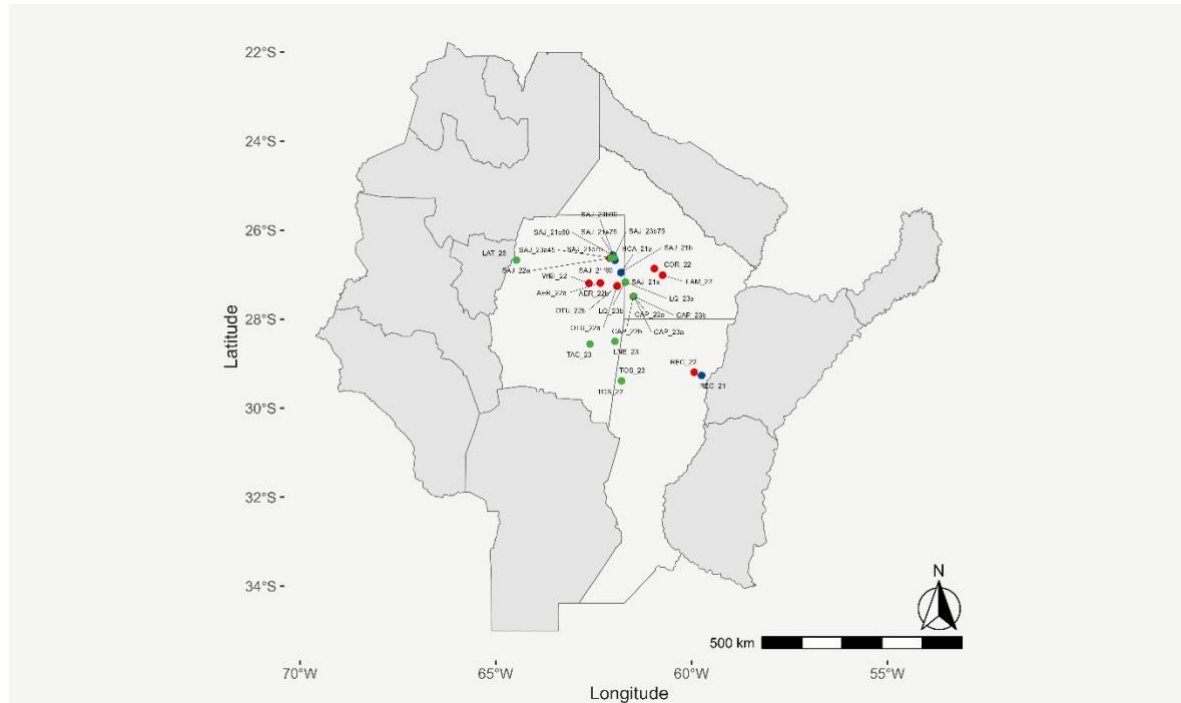


Figura 1. Sitios de N en maíz de las campañas 20/21 (azul), 21/22 (rojo) y 22/23 (verde) que se utilizaron para para obtener las disponibilidades y dosis óptimas económicas. Ubicación: Santiago del Estero (18), Chaco (9) y Santa Fe (4).

Manejo de los sitios

En las primeras dos campañas el mayor porcentaje de ensayos se sembraron entre el 20 de diciembre y el 10 de enero (83% en la 20/21 y 58% en la 21/22). En cambio, en la 22/23 apenas el 31% de los ensayos pudieron ser sembrados en esa ventana de fechas óptimas para la zona, y el 69% restante se sembró entre el 11 y el 20 de enero (Stahinger et al., 2023).

Las densidades de siembra que variaron entre 45000 y 90000 pl ha⁻¹, siendo que el promedio se ubicó en 60000 pl ha⁻¹. En cuanto a los materiales genéticos utilizados, estos fueron establecidos al azar, dado que los híbridos fueron definidos por los responsables de cada sitio en función de la preferencia de cada productor o empresa.

El antecesor estival predominante fue soja (90,2 % de los sitios), seguido por algodón (3,2 % de los sitios), maíz (3,2 % de los sitios) y otros (3,2 % de los sitios). Como antecesor invernal en 52 % de los sitios se hizo barbecho, en 23 % hubo trigo, en un 16 % se hicieron cultivos de servicio (vicia, centeno o trigo de cobertura) y en un 6% hubo garbanzo.

El control de malezas e insectos se hizo siguiendo el manejo del productor/empresa en cada sitio.

Tamaño de parcelas, diseño experimental y tratamientos aplicados

Los experimentos fueron conducidos en macroparcelas (MA) y microparcelas, utilizando un diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con dos repeticiones como mínimo. Del total de 31 experimentos, el 26% se condujeron con 2 repeticiones, 71% con tres repeticiones y 3% con 4 repeticiones. Las MA tuvieron un ancho mínimo de ocho surcos (hasta 36 m) y un largo mínimo de 100 m (hasta 200 m), siempre teniendo en cuenta la maquinaria con la que contaban los productores/empresas en cada sitio para sembrar, fertilizar, fumigar y cosechar los ensayos.

En la mayoría de los ensayos los tratamientos aplicados fueron 0, 40, 80 y 120 o 160 kg N ha⁻¹. Dosis máxima de 120 kg N ha⁻¹ cuando el antecesor invernal era barbecho y el antecesor estival soja o algodón, mientras que se optaba por dosis máxima de 160 kg N ha⁻¹ si el antecesor invernal era trigo, gramínea de cultivo de servicio o girasol.

Muestreo y análisis de suelos

Las muestras de suelo se tomaron en momentos próximos a la siembra, en las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Los análisis de suelos se realizaron en el laboratorio agronómico Ag Lab de Experta Tecnología AGD (La Carlota, Córdoba).

Dosis Óptima Económica (DOE) y Disponibilidad Óptima Económica (DispOE)

Para obtener los valores de DOE y DispOE utilizamos la aplicación DONMaíz (<https://ciampittilab.shinyapps.io/DONMaiz/>), desarrollada por Adrián Correndo y Gustavo Nocera Santiago en el Ciampitti Lab. Esta aplicación es una herramienta disponible en la web que fue desarrollada con base en un gran trabajo de revisión realizado en colaboración por investigadores de diversas instituciones de Argentina (Correndo et al., 2021). Dentro de dicha aplicación trabajamos en la sección “datos propios” donde cargamos las bases de datos separadas por ambientes (< 6000 kg ha⁻¹, 6000-9000 kg ha⁻¹ y > 9000 kg ha⁻¹), de manera a obtener valores de DOE para cada ambiente. A su vez, para definir las DOE, asumimos una relación 10:1 entre precio de maíz y precio de N, es decir, que para pagar 1 kg de

N se precisan 10 kg de maíz. Lógicamente que esta relación es variable cada campaña y dependiendo del lugar donde este ubicado cada productor, pero para llegar a valores de DOE se debe asumir un valor para la misma. Una idea de la variabilidad que podría tener esta relación se resume en la **tabla 1**.

Tabla 1. Valores de maíz y de urea (ambos en U\$S t⁻¹), así como relaciones de kg maíz kg N⁻¹ según las combinaciones entre precios de grano y del fertilizante.

Urea (U\$S t ⁻¹)	Maíz (U\$S t ⁻¹)			
	100	150	200	250
	kg maíz kg N ⁻¹			
500	11	7	5	4
600	13	9	7	5
700	15	10	8	6
800	17	12	9	7

También para poder simular valores de DOE asumimos un valor de Nd a la siembra (0-60 cm) de 80 kg N/ha para los 3 ambientes considerados.

Además de los valores de DOE obtuvimos valores de DispOE para cada ambiente. Estos serían los umbrales críticos incorporando el componente económico a los modelos teniendo en cuenta la relación 10:1 kg maíz kg N⁻¹ utilizada. Por último, simulamos con diferentes relaciones de precios entre 6:1 y 14:1 para obtener las DispOE correspondientes a cada ambiente dentro de ese rango de variación de relaciones de kg de maíz para pagar 1 kg de N.

>. RESULTADOS

Al cargar las bases de datos de los ambientes < 6000 kg ha⁻¹, 6000-9000 kg ha⁻¹ y > 9000 kg ha⁻¹ en la aplicación DONMaiz, obtuvimos valores de DispOE para dichos ambientes de 130, 139 y 157 kg N ha⁻¹, respectivamente (**Figuras 2, 3 y 4**). Considerando la relación de precios 10:1 kg maíz kg N⁻¹. Dichos valores se ubicaron levemente por debajo de los umbrales críticos obtenidos para estos ambientes que fueron 138, 151 y 165 kg N ha⁻¹ para Nd (suelo + fertilizante) a la siembra (Stahringer et al., 2025).

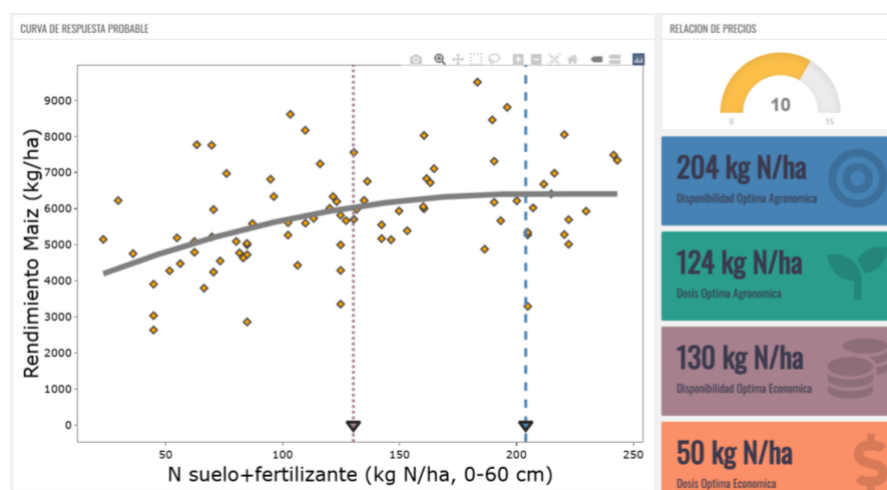


Figura 2. Modelo ajustado en DONMaiz (<https://ciampittilab.shinyapps.io/DONMaiz>) para ambiente < 6000 kg ha⁻¹, relación de precios 10:1 kg maíz kg N⁻¹ y Nd a la siembra (0-60 cm) = 80 kg N ha⁻¹.

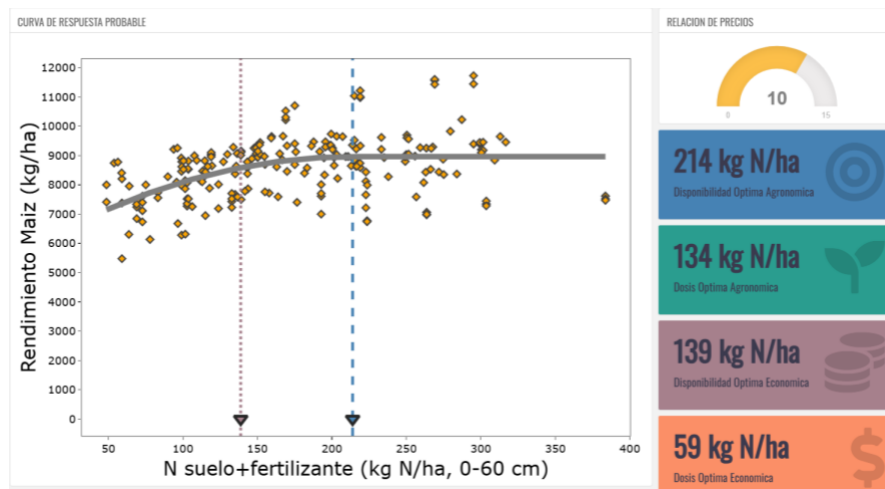


Figura 3. Modelo ajustado en DONMaiz (<https://ciampittilab.shinyapps.io/DONMaiz>) para ambiente 6000-9000 kg ha⁻¹, relación de precios 10:1 kg maíz kg N⁻¹ y Nd a la siembra (0-60 cm) = 80 kg N ha⁻¹.

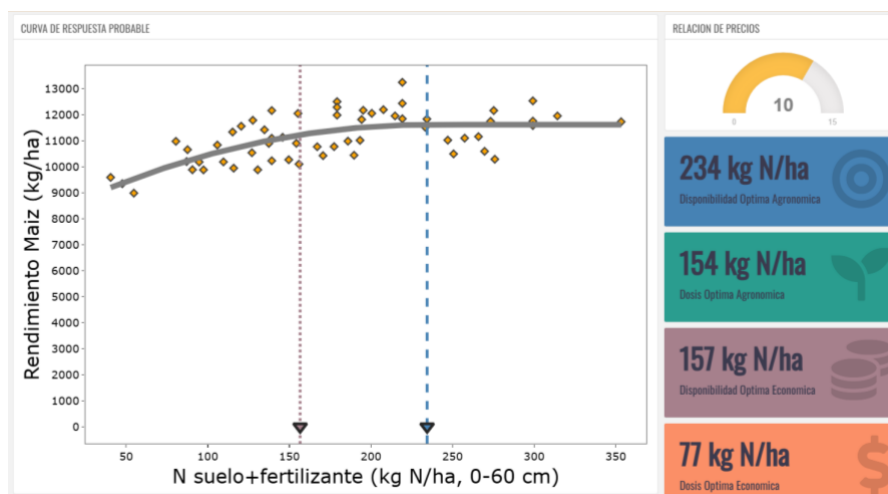


Figura 4. Modelo ajustado en DONMaiz (<https://ciampittilab.shinyapps.io/DONMaiz>) para ambiente > 9000 kg ha⁻¹, relación de precios 10:1 kg maíz kg N⁻¹ y Nd a la siembra (0-60 cm) = 80 kg N ha⁻¹.

En lo que se refiere a las DOE, teniendo en cuenta el escenario planteado de relación de precios y Nd a la siembra, obtuvimos valores de 50, 59 y 77 kg N ha⁻¹, para los ambientes < 6000 kg ha⁻¹, 6000-9000 kg ha⁻¹ y > 9000 kg ha⁻¹, respectivamente (**Figuras 2, 3 y 4**).

En cuanto a valores de Nd a la siembra (0-60 cm) en la Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino de Aapresid hemos observado a lo largo de las 4 campañas trabajadas hasta el momento, que en términos generales los valores se han ubicado en un rango de 30 – 300 kg N/ha, con promedios de 98, 108, 75 y 128 kg N ha⁻¹ para las campañas 20/21, 21/22, 22/23 y 23/24, respectivamente (Stahringer et al., 2025).

Por último, cabe mencionar que cada productor puede calcular sus valores de DOE utilizando la relación de precios que tenga cada campaña y los valores de Nd (0-60 cm) que obtenga de realizar los análisis de suelo en pre siembra en los lotes que van a maíz. Para ello una herramienta muy útil es esta que hemos utilizado, o bien, pueden valerse de los valores de DisPOE que hemos ajustado a continuación para una serie amplia de relaciones de precios (**Tabla 2**).

Tabla 2. Disponibilidad Óptima Económica (DispOE), en función de diferentes relaciones de precios (kg maíz kg N⁻¹) para tres tipos de ambientes*.

Ambiente* (kg ha ⁻¹)	Relación de precios (kg maíz kg N ⁻¹)								
	6:1	7:1	8:1	9:1	10:1	11:1	12:1	13:1	14:1
	DispOE kg N ha ⁻¹								
< 6000	160	152	145	138	130	123	116	108	101
6000-9000	169	161	154	146	139	131	124	116	109
> 9000	188	180	172	164	157	149	141	133	125

* Considere que estos ambientes se definen teniendo en cuenta lo que el maíz rendiría en el sitio (ambiente) sino se fertilizara con N, razón por la cual no los denominamos potenciales, ya que el potencial del ambiente será alcanzado recién cuando sea fertilizado.

De esta manera el productor puede obtener su propia DOE lote a lote, valiéndose del resultado que le arroja el análisis de suelos de Nd a la siembra (0-60 cm) para cada lote, y en función del valor de DispOE que obtenga para un dado ambiente, según la relación de precios que haya calculado.

>. CONCLUSIÓN

Con los valores de DispOE que obtuvimos para diferentes relaciones de precios y ambientes (Tabla 2), junto con la información de Nd (análisis de suelos) y la relación de precios de cada lote/campaña, el productor de maíz en el NEA ahora puede calcular la DOE de cada lote campaña tras campaña.

>. AGRADECIMIENTOS

A las empresas que han sponsorado la Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino de Aapresid hasta ahora (Experta AGD, Yara Argentina, YPF Agro y Bunge). A los ensayistas, contratistas, investigadores y amigos que han contribuido a generar esta información.

>. REFERENCIAS

Correndo, A. & F. García. 2014. Bases de la nutrición del cultivo de maíz. Respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo, azufre y zinc. IPNI Cono Sur. Capítulo 6. Maíz. Manual CREA.

Correndo, A., F.H. Gutierrez-Boem, F.O. Garcia, C. Alvarez, C. Alvarez, A. Angeli, P. Barbieri, M. Barraco, A. Berardo, M. Boxler, P.A. Calviño, J.E. Capurro, H. Carta, O. Caviglia, I.A. Ciampitti, M. Diaz-Zorita, S. Diaz-Valdez, H.E. Echeverria, G. Esposito, M. Ferrari, G.N. Ferraris, S. Gambaudo, V. Gudelj, J.P. Ioele, R. Melchiori, J. Molino, J.M. Orcellet, A. Pagani, J.M. Pautasso, N.I. Reussi Calvo, M. Redel, S. Rillo, H. Rimski-Korsakov, H.R. Sainz-Rozas, M. Saks, Ma.G. Telleria, L. Ventimiglia, J.L. Zorzin, Ma.M. Zubillaga & F. Salvagiotti. 2021. Assessing the uncertainty of maize yield without nitrogen fertilization. Field Crops Res. 260, 107985 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108299>

Maddonini, G.A.; R.A. Ruiz; P. Villariño & I. García de Salomon. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: Producción de granos: bases funcionales para su manejo, Eds.: Satorre et al. Capítulo 19. 783 p.

Reussi Calvo, N.I.; N. Diovisalvi; A. Berardo; F.O. García. 2020. Del paper al lote. ¿Cuándo, cómo y porque debería fertilizar mis maíces? Laboratório FERTILAB, FCA-INTA Balcarce, CONICET.

Salvagiotti, F.; H. Pedrol; J. Castellarin; J. Capurro; J.C. Felizia; A. Gargicevich & N. Trentino. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I - Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para Mejorar la Producción. INTA Oliveros. 20:67-70.

Stahringer, N.I.; J.A. Fernández; S. Almirón.; R. Garfagnoli & A. Madias. 2023. Avances en fertilización nitrogenada en maíz en el NEA. Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino. Aapresid. <https://www.aapresid.org.ar/archivos/informes/66accdcdef0b9.pdf>.

Stahringer, N.I.; J.A. Fernández; N. González Midón; D. Sarracini; R. Garfagnoli; S. Almirón & A. Madias. 2025. Resultados de la campaña 23/24 y avances en la calibración de modelos para N en maíz en el NEA. Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino. Aapresid. <https://www.aapresid.org.ar/blog/revista-red-nutricion-cultivos-norte-argentino>.

Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe: 25 años de experimentación e investigación en lotes de producción

► ► **Rovea Adrián^{1*}, Ricardo Pozzi¹, Agustín Fernandez¹,
Franco Permingeat¹, Román Domínguez ¹, Agustina Donovan¹,
Guillermo Marcassini¹, Hernán Borcano²,
Nahuel Reussi Calvo³ y Fernando O. García^{4*}**

¹ Región CREA Sur de Santa Fe; ² Nutrien Ag Solutions;
³ CONICET-FCA Balcarce; ⁴ Consultor privado

✉ acrovea@gmail.com / fgarcia1957@gmail.com

A lo largo de 25 años, la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, a través del trabajo en equipo de productores, asesores, e investigadores de la región CREA Sur de Santa Fe, el IPNI Cono Sur y Nutrien Ag Solutions, así como también de instituciones como la Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario), la Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires) y el Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP) de INTA y el laboratorio Fertilab, ha contribuido a evaluar y comprender los efectos de la fertilización en la sustentabilidad agronómica, económica y ambiental de los sistemas de producción de cultivos de grano de la región pampeana central de Argentina.

>. LOS OBJETIVOS

Al momento de la creación de la Red de Nutrición, se propuso evaluar el manejo adecuado de nitrógeno (N) y fósforo (P) y la posible deficiencia y respuesta a la aplicación de azufre (S). Así, se estableció una red de ensayos en lotes de producción en zonas representativas de los ecosistemas de la región, a partir de la campaña 200/01, cuyos objetivos iniciales fueron los siguientes:

1. Determinar respuestas (directas y residuales) de los cultivos dentro de la rotación a la aplicación de N, P y S en diferentes ambientes de la región.
2. Evaluar algunas metodologías de diagnóstico de la fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada.
3. Evaluar deficiencias y respuestas potenciales a otros nutrientes: potasio (K), magnesio (Mg), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn).

A partir de la información que se fue generando y el planteo de nuevos interrogantes, se fueron sumando otros objetivos:

4. Evaluar los rendimientos alcanzables sin limitaciones nutricionales.
5. Conocer la evolución de los suelos bajo distintos esquemas de fertilización determinando índices relacionados con su salud química, biológica y física.
6. Evaluar el impacto económico de la fertilización NPS.

Este escrito presenta una breve síntesis de los principales resultados e información generada durante los primeros 25 años de la Red de Nutrición, específicamente 1) rendimientos y respuesta a la fertilización; 2) eficiencia de uso de nutrientes; 3) eficiencia de uso de agua; 4) calibración de metodologías de diagnóstico de fertilidad nitrogenada, fosfatada y azufrada; 5) efectos sobre propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo y 6) algunos resultados económicos.

>. LOS ENSAYOS

Los ensayos se establecieron inicialmente en 11 lotes de producción en rotación maíz-trigo/soja (M-T/S) o en rotación maíz-soja de primera-trigo/soja (M-S-T/S). Actualmente, abril 2025, se continúan evaluando cuatro sitios: dos en rotación M-T/S (Balducchi en CREA Teodelina y San Alfredo en CREA Santa Isabel) y dos en rotación M-S-T/S (La Blanca en CREA Baldissera y Lambaré en El Trébol).

Los tratamientos evaluados se indican en la **Tabla 1** y se establecen anualmente siempre en las mismas parcelas. No se aplica N en soja.

Tabla 1. Rangos de dosis de nutrientes aplicados en los seis tratamientos evaluados.

Nutrientes (kg/ha)	Testigo	PS	NS	NP	NPS	Completo
N		0-10	90-175	90-175	90-175	90-175
P		20-45		20-45	20-45	20-45
K						25
Ca						62
Mg						32
S		15-20	15-20		15-20	15-20
B						1
Zn						2
Cl						2

>. ¿QUÉ APRENDIMOS EN ESTOS 25 AÑOS?

1. Rendimientos y respuestas a la fertilización

- La fertilización NPS incrementó los rendimientos 45-143% en maíz, 97-202% en trigo y 35-58% en soja de segunda en los sitios de rotación M-T/S (**Figura 1**). En los sitios de rotación M-S-T/S, los incrementos fueron de 43-98% en maíz, 53-80% en trigo, 28-48% en soja de segunda y 9-30% en soja de primera (**Figura 2**).
- Las respuestas a la fertilización variaron con la condición de fertilidad inicial del sitio.
- Las diferencias entre tratamientos se fueron ampliando a través de los años, pero dependiendo del sitio y del cultivo
- El impacto de los micronutrientes fue menor que el de NPS, varió según sitio y cultivo y se ha hecho más evidente en los últimos años (**Figura 3**).
-

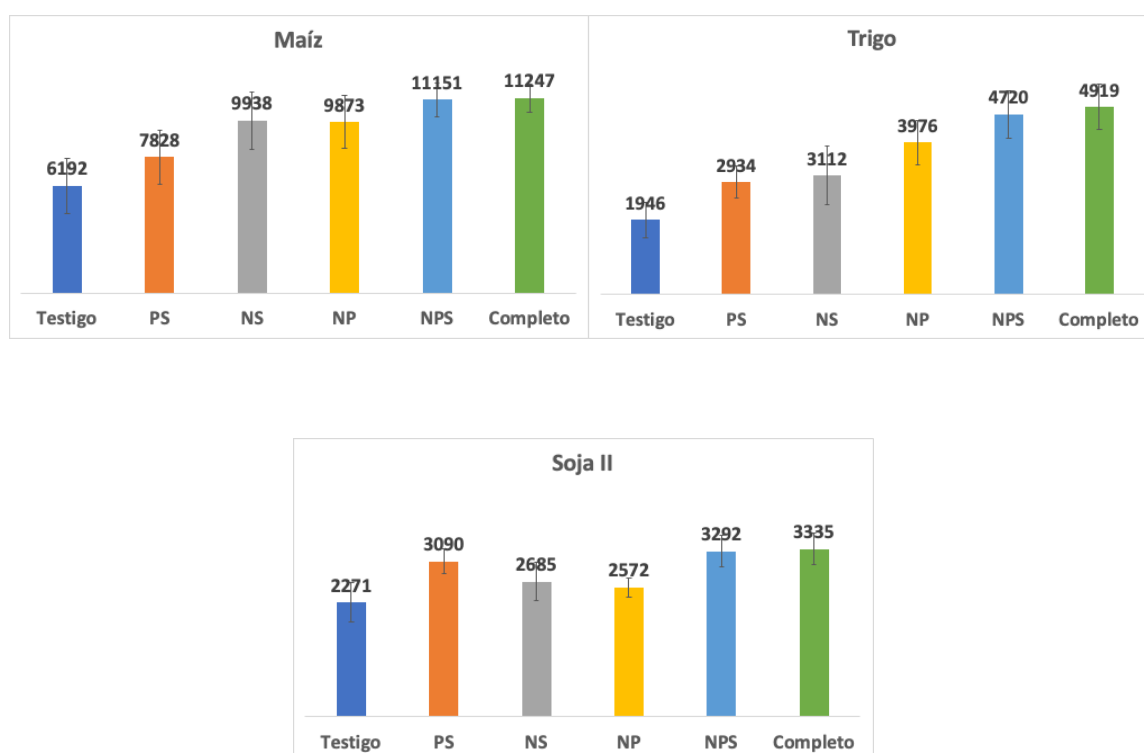


Figura 1. Rendimientos promedio de los seis tratamientos de fertilización según cultivo. Sitios Rotación M-T/S. 2000 a 2023.

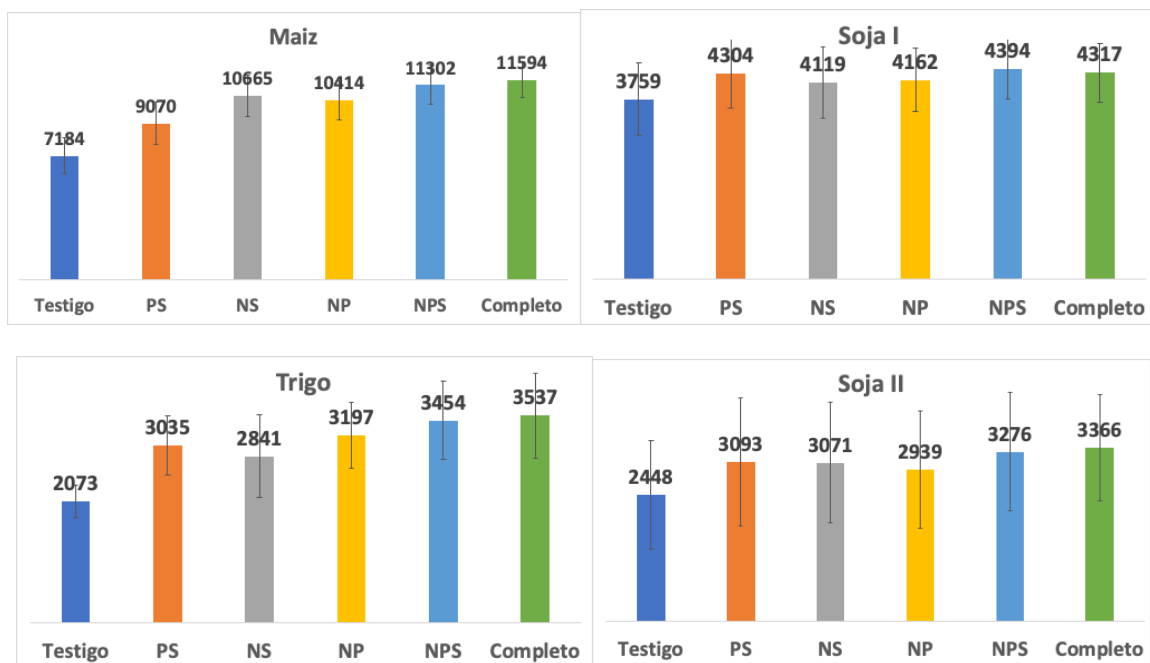


Figura 2. Rendimientos promedio de los seis tratamientos de fertilización según cultivo. Sitios Rotación M-S-T/S. 2000 a 2023.

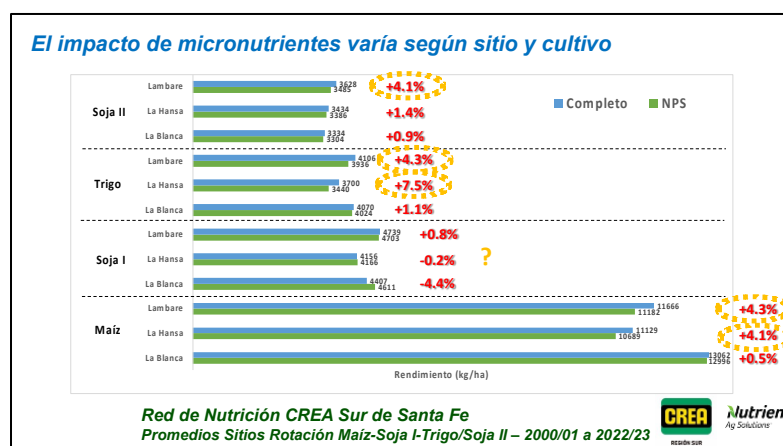
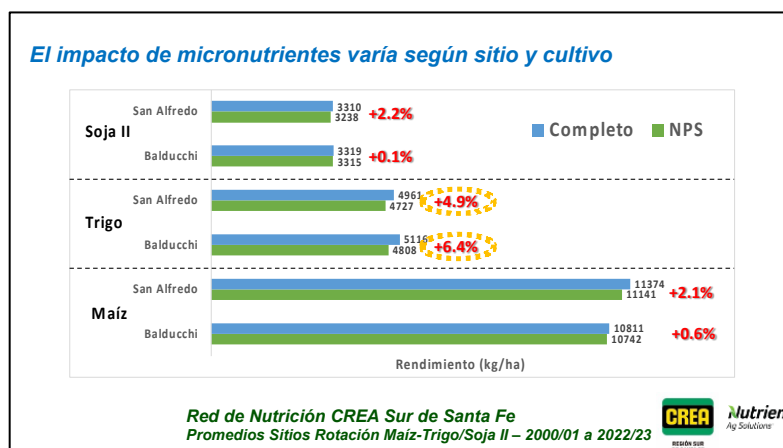


Figura 3. Rendimientos promedio de los tratamientos NPS y Completo (NPS+micronutrientes) de fertilización según cultivo. Sitios Rotación M-T/S (superior) y M-S-T/S (inferior). 2000 a 2022.

2. Eficiencia de uso de los nutrientes

- La eficiencia de uso de los nutrientes varía entre rotaciones y sitios. La **Tabla 2** muestra los promedios para cada rotación en términos de eficiencia agronómica (EA, respuesta en kg grano por kg nutriente aplicado), productividad parcial (PP, cociente entre rendimiento y dosis de nutriente aplicado), y balance parcial (BP, cociente entre kg nutriente removido en grano y kg nutriente aplicado).
- Los valores de los tres indicadores de eficiencia de uso responden a las condiciones de fertilidad inicial de los sitios, resaltando la importancia de diagnosticar la condición de fertilidad de cada lote o ambiente para un uso rentable y responsable de los nutrientes aplicados.

Tabla 2. Eficiencia de uso de N, P y S. Promedios por rotación de 2000 a 2018.

Cultivo	Eficiencia agronómica			Productividad Parcial			Balance de nutriente		
	(kg grano/kg nutriente)			(kg grano/kg nutriente)			(kg removido/kg aplicado)		
	N	P	S	N	P	S	N	P	S
M-T/S									
Maiz	23	44	92	79	345	663	0.87	0.86	0.73
Trigo	15	70	42	42	222	446	0.84	0.89	0.89
Soja 2 ^a		29	62		164	321		0.74	1.06
M-S-T/S									
Maiz	16	21	50	77	341	671	0.85	0.85	0.74
Soja 1 ^a		11	23		148	237		0.67	0.78
Trigo	5	26	19	37	179	374	0.74	0.71	0.75
Soja 2 ^a		7	34		168	299		0.75	0.99

3. Eficiencia de uso del agua

- Las respuestas a la nutrición se verificaron para distintas condiciones ambientales (**Figura 4**).
- La fertilización NPS mejoró la eficiencia de uso del agua (EUA, kg grano por mm de agua) del 28% al 96% en trigo y maíz (**Figuras 5 y 6**).
- El riesgo de producción de cada tratamiento de fertilización se estimó como la probabilidad de que su rendimiento caiga por debajo de un umbral o nivel crítico específico durante un año elegido al azar (**Figura 7**). En todos los casos, los testigos sin fertilizar (CTRL) presentaron el mayor riesgo de producción con una probabilidad de que el rendimiento cayera por debajo del rendimiento promedio (representados por las líneas verticales en la siguiente figura) de 92, 94, 68 y 80% para maíz, trigo, soja I y soja II, respectivamente.

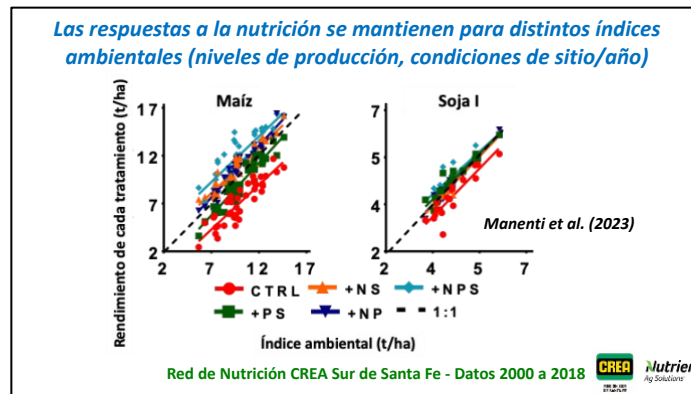
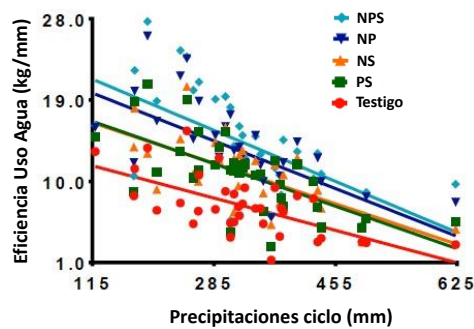


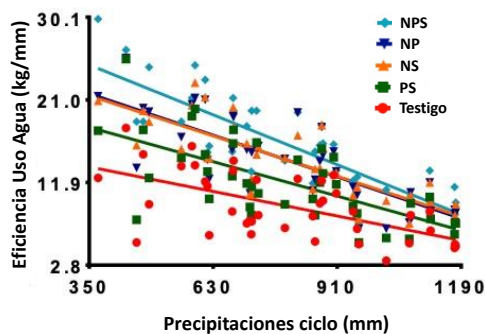
Figura 4. Rendimientos promedio de maíz y soja para los distintos tratamientos según índice ambiental (Manenti et al., 2023).



Tratamiento	Eficiencia de Uso del Agua	
	kg/mm	Incremento (%)
Testigo	7.3 a	-
PS	10.8 b	48
NS	10.9 b	50
NP	13.2 c	82
NPS	14.3 c	96

Manenti et al. (2020)

Figura 5. Eficiencia de uso de agua (EUA) en trigo según precipitaciones durante el ciclo para tratamientos NPS. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (Manenti et al., 2020).



Tratamiento	Eficiencia de Uso del Agua	
	kg/mm	Incremento (%)
Testigo	9.4 a	-
PS	12.0 b	28
NS	14.5 c	54
NP	14.5 c	54
NPS	16.2 c	72

Manenti et al. (2020)

Figura 6. Eficiencia de uso de agua (EUA) en maíz según precipitaciones durante el ciclo para tratamientos NPS. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (Manenti et al., 2020).

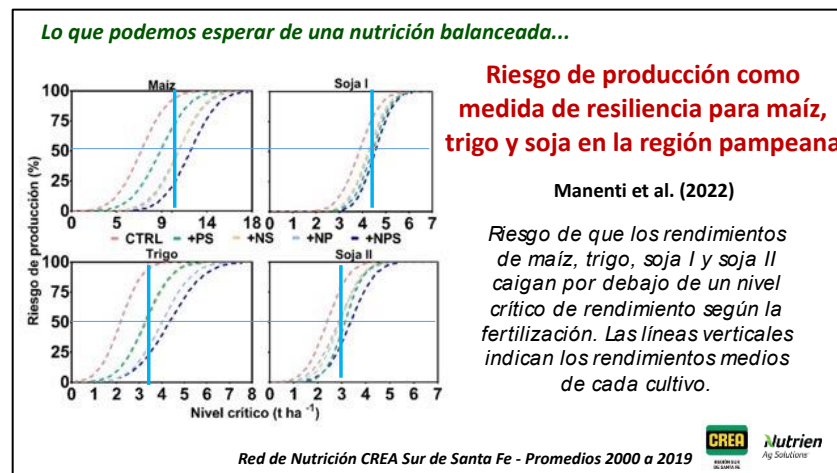


Figura 7. Riesgo de que los rendimientos de maíz, soja de primera y de segunda y trigo caigan por debajo de un nivel crítico según tratamiento de fertilización. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe (Manenti et al., 2022).

4. Calibración de metodologías de diagnóstico de fertilidad nitrogenada, fosfatada y azufrada

- Las calibraciones de N-nitrato disponible a la siembra presentaron buenos ajustes para trigo y maíz (**Figura 8**).
- Para los dos cultivos, sumar la estimación de mineralización con el análisis de N anaeróbico (Nan) mejora el ajuste (**Figura 9**).

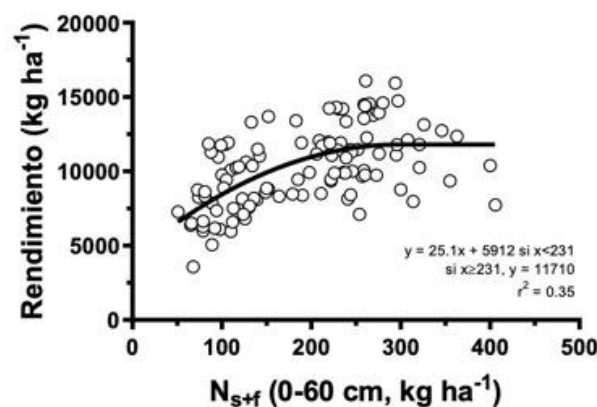


Figura 8. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra (0-60 cm) + N aplicado como fertilizante (n=118). El umbral de 231 kg N ha⁻¹ permite alcanzar un rendimiento máximo medio de 11710 kg ha⁻¹, según la función de ajuste ($r^2 = 0.35$, $p < 0.001$). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2020/21.

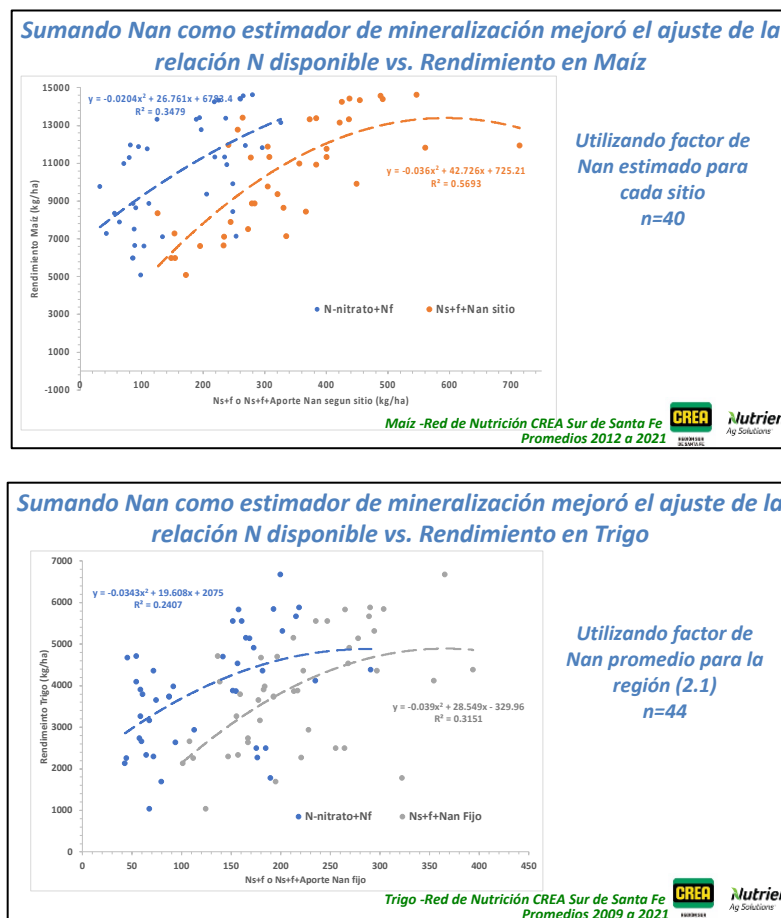
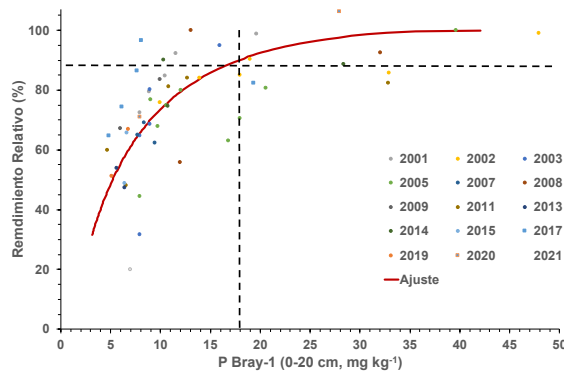


Figura 9. Rendimiento de maíz (superior) y de trigo (inferior) en función de la disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra (0-60 cm) + N aplicado como fertilizante y de la disponibilidad de N-nitrato en pre-siembra (0-60 cm) + N aplicado como fertilizante + Aporte por mineralización de N estimada a partir de Nan (N anaerobico). Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2020/21.

- Se calibraron/validaron metodologías de diagnóstico para P en todos los cultivos. La **Figura 10** muestra la calibración de rendimiento relativo con el nivel de P Bray a la siembra (0-20 cm) para trigo.
- Se cuantificaron los cambios en P extractable (Bray) del suelo según los balances de P de los cultivos (diferencias entre aplicación vía fertilización y remoción vía granos).
- El balance debe ser positivo en 3.2 kg P para subir 1 mg kg⁻¹ de P Bray en suelos de bajo nivel de P-Bray 1. Balances negativos de 10 kg P, en suelos de P Bray mayor de 20 mg kg⁻¹, disminuyen 1 mg kg⁻¹ de P Bray (Sucunza et al., 2018) (**Figura 11**).

Trigo: Rendimiento relativo en función del nivel de P Bray

Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe - 2000 a 2021 - 55 sitios/año, 15 campañas



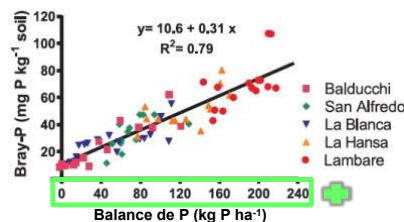
PARA 90% RR
18 ppm
(15 - 21)
 $r = 0.66$

PARA 95% RR
23 ppm
(19 - 28)
 $r = 0.66$

Los sitios-años con niveles de P Bray-1 (0-20 cm) menores de 15 mg kg⁻¹ presentaron respuestas altamente probables a la aplicación de P, mientras que por arriba de 21 mg kg⁻¹ de P Bray, la probabilidad de respuesta disminuye marcadamente

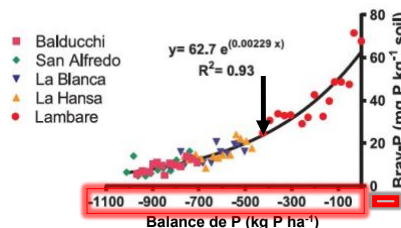
Figura 10. Rendimiento relativo (RR) de trigo (NS:NPS) en función del nivel de P Bray (0-20 cm) a la siembra. La curva de ajuste ($r=0.66$, $p<0.0001$) y las estimaciones se obtuvieron mediante el método arcoseno-logaritmo modificado (Correndo et al., 2016). La línea punteada vertical indica el nivel crítico de 18 mg kg⁻¹ de P Bray para obtener el 90% del rendimiento relativo (línea punteada horizontal). La zona grisada indica los límites del intervalo de confianza al 95% de 15 y 21 mg kg⁻¹ de P Bray. Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2021/22.

*Con aplicación
de P*



*3.2 kg P para subir
1 ppm de P Bray*

*El P Bray disminuye 1
ppm por cada 10 kg
P ó 36 kg P de
balance negativo
según nivel de P Bray*



*Sin aplicación
de P*

Fuente: Sucunza et al. (2018) - Red CREA Sur de Santa Fe



Figura 11. Nivel de P Bray (0-20 cm) en función del balance de P (P aplicado como fertilizante – P removido en granos). La figura superior muestra las situaciones de balance positivo (aplicación>remoción) y la inferior los balances negativos (aplicación<remoción) (Sucunza et al., 2018).

- Se evaluaron calibraciones de S-sulfato a la siembra (0-20 cm) y respuesta a S para los cuatro cultivos. se evaluaron calibraron los rendimientos relativos con el nivel de S-sulfato. A modo de ejemplo, la **Figura 12** muestra la calibración para soja de primera. Los ajustes fueron en general bajos y se sugiere sumar otras pautas para decidir la fertilización azufrada: historia del lote, nivel de respuesta a N en maíz y trigo, presencia de napas superficiales, etc.

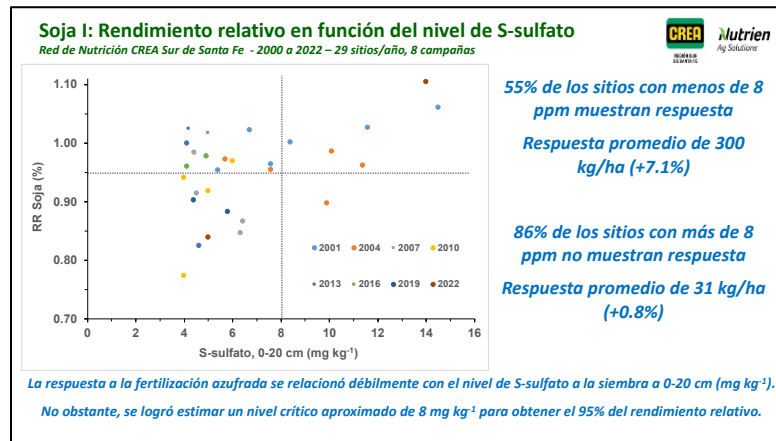


Figura 12. Rendimiento relativo (RR) de soja de primera (NP:NPS) en función del nivel de S-sulfato (0-20 cm) a la siembra. La línea punteada vertical indica el nivel crítico de 8 mg kg⁻¹ de S-sulfato y la línea punteada horizontal el 95% del rendimiento relativo. Red de Nutrición Región CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2022/23.

5. Efectos sobre propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo

- La fertilización contribuyó a mantener mejores niveles de materia orgánica (MO) con respecto al Testigo, pero no la aumento respecto a los niveles iniciales al implantar los ensayos. Los valores relativos promedio de MO en 2024, respecto al inicio de los ensayos, son de 88%, 93% y 99% para los tratamientos Testigo, NPS y Completo, respectivamente (**Figura 13**).

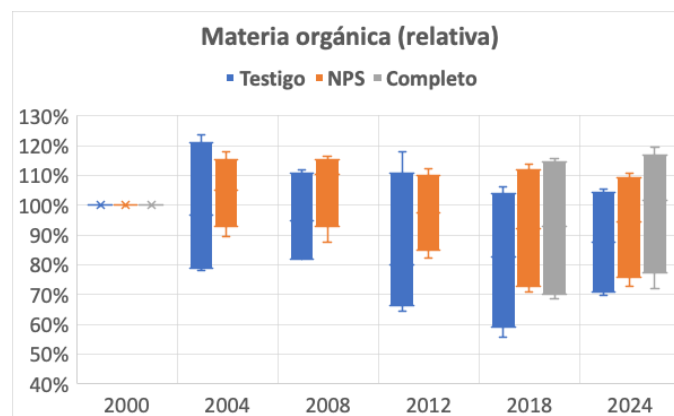


Figura 13. Evolución de la materia orgánica: Cambios relativos respecto a la situación inicial (considerada 100%) para los tratamientos Testigo, NPS y Completo. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, promedios de cuatro sitios, 2000 a 2024.

- En promedio, la fertilización NPS disminuyó el pH en un 4% respecto a la condición inicial (**Figura 14**). Esa disminución de pH se asocia con una caída promedio de 25% de saturación de cationes (**Figura 15**).

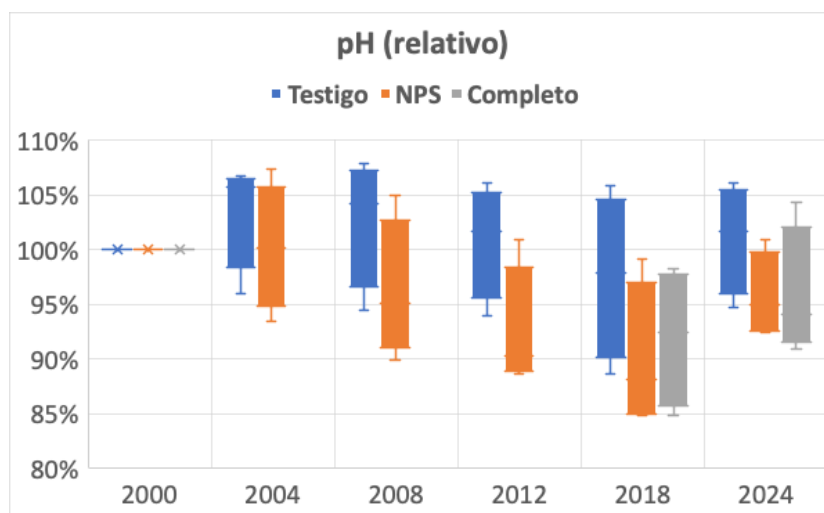


Figura 14. Evolución de pH del suelo: Cambios relativos respecto a la situación inicial **Figura 13**. Evolución de la materia orgánica: Cambios relativos respecto a la situación inicial (considerada 100%) para los tratamientos Testigo, NPS y Completo. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, promedios de cuatro sitios, 2000 a 2024.

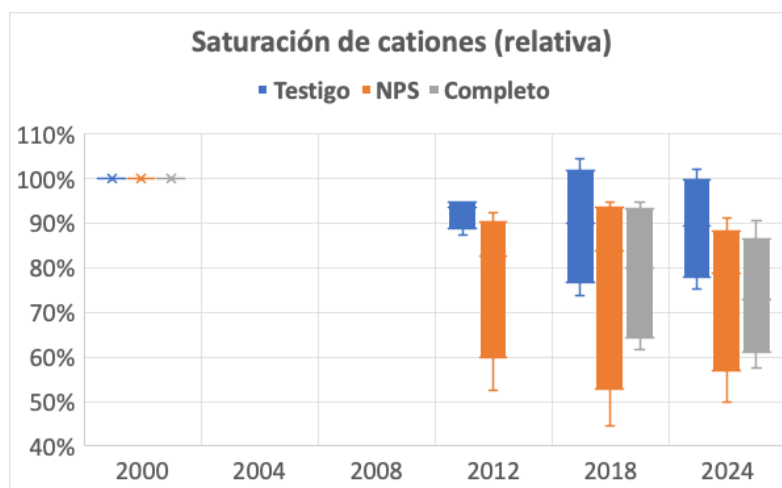


Figura 15. Evolución de saturación de cationes: Cambios relativos a la situación inicial (considerada 100%) para los tratamientos Testigo, NPS y Completo. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, promedios de cuatro sitios, 2000 a 2024.

- En cuanto a propiedades físicas, determinaciones realizadas en Agosto 2024 por la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR) (G. Marra y A. Saperdi, com. pers.), indicaron que para los cuatro sitios evaluados:
 - La densidad aparente fue menor en NPS que en Testigo en un sitio
 - La estabilidad estructural fue mayor en NPS que en Testigo en dos sitios
 - La resistencia mecánica fue menor en NPS que en Testigo en tres sitios.
- A modo de ejemplo, en la **Figura 16** se muestra la evolución de densidad aparente en tratamientos Testigo y NPS de cuatro ensayos entre 2003 y 2024. Se observa una tendencia a presentar menores valores de densidad aparente con el tratamiento NPS con respecto al testigo sin fertilizar.
- No se observaron relaciones significativas ente valores de propiedades físicas y las respuestas a la fertilización.

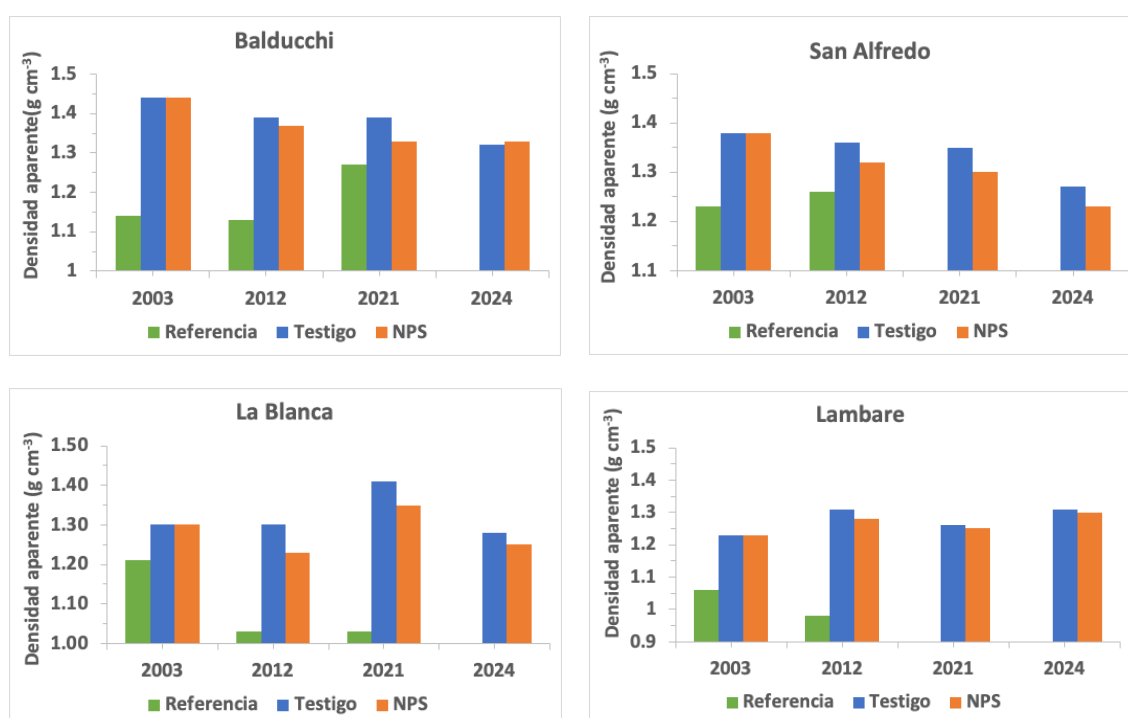


Figura 16. Evolución de densidad aparente (0-20 cm) de 2003 a 2024 en tratamientos Testigo y NPS y Referencia sin disturbar, de cuatro ensayos de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe.

- Evaluaciones realizadas en el sitio Balducchi muestran incrementos en la concentración de glomalina y de la actividad microbiana con fertilización NPS, pero una menor diversidad microbiana (**Figura 17**).

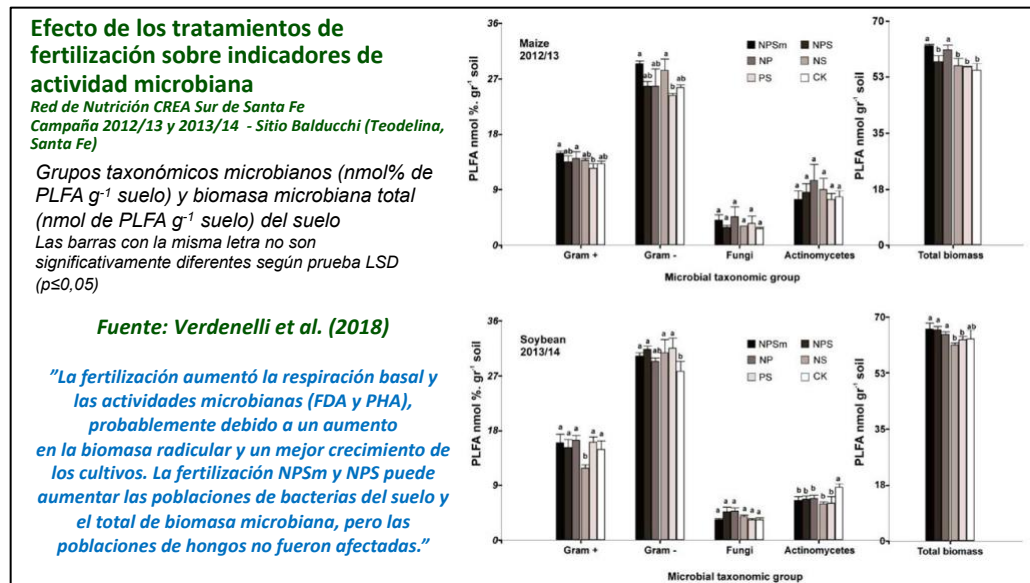


Figura 17. Efectos de tratamientos de fertilización sobre actividad microbiana. Sitio Balducchi, Red de nutrición de Cultivos CREA Sur de Santa Fe. Fuente: Verdinelli et al. (2018).

- Evaluaciones de actividad enzimática (β -glucosidasa y arilsulfatasa), realizadas por el laboratorio Fertilab en 2024, muestran diferencias significativas entre sitios, pero no diferencian los tratamientos Testigo, NPS y Completo. Esta es una nueva línea de trabajo que se continuará evaluando en los próximos años (Tabla 3).

Tabla 3. Actividad de enzimas β -glucosidasa y arilsulfatasa a 0-20 cm en tratamientos Testigo, NPS y Completo en cuatro sitios de ensayos a agosto 2024. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Fuente: J. Commatteo y col. (com. pers.).

Sitio	Tratamiento	β -glucosidasa	Arilsulfatasa
0-20 cm		μg PNP $g^{-1} h^{-1}$	
Balducchi	Promedio	48	35
	Testigo	53	38
	NPS	45	33
	Completo	44	34
San Alfredo	Promedio	75	88
	Testigo	78	89
	NPS	82	106
	Completo	66	68
La Blanca	Promedio	71	53
	Testigo	77	54
	NPS	65	48
	Completo	72	58
Lambaré	Promedio	86	51
	Testigo	89	51
	NPS	83	50
	Completo	85	52

6. Algunos resultados económicos

- La fertilización NPS, en general, incrementó el margen bruto en los distintos cultivos, pero con marcadas diferencias entre sitios y cultivos.
- La fertilización NPS, en promedio, incrementó el margen bruto en 566, 342 y 48 U\$/ha para maíz, trigo/soja 2ª y soja 1ª, respectivamente. Los márgenes variaron marcadamente entre sitios (**Figuras 18 y 19**), respondiendo a la condición de fertilidad inicial y rendimientos alcanzados en cada uno de ellos.
- El sitio Balducchi muestra márgenes elevados en todos los cultivos a partir de las altas respuestas por la baja fertilidad inicial y los buenos rendimientos (**Figura 18**). El sitio San Alfredo, con la misma rotación, pero mejor condición de fertilidad inicial presenta márgenes algo menores.
- En la rotación M-S-T/S (**Figura 19**), se distinguen claramente las situaciones entre sitios según nivel de fertilidad inicial. El sitio Lambaré, con altos niveles iniciales de P Bray y buen nivel de MO, solo muestra márgenes positivos para N en maíz y S en soja 2ª. El sitio La Blanca, con valores iniciales medios de P Bray y MO, alcanza márgenes positivos en todos los cultivos y nutrientes menos en N en trigo debido a los bajos rendimientos alcanzados por efectos de enfermedades en un par de campañas. En el sitio La Hansa, los niveles de P Bray inicial eran altos pero el nivel de MO bajo por la prolongada historia agrícola, observándose márgenes positivos para N y S en general y solo para maíz en el caso de P.

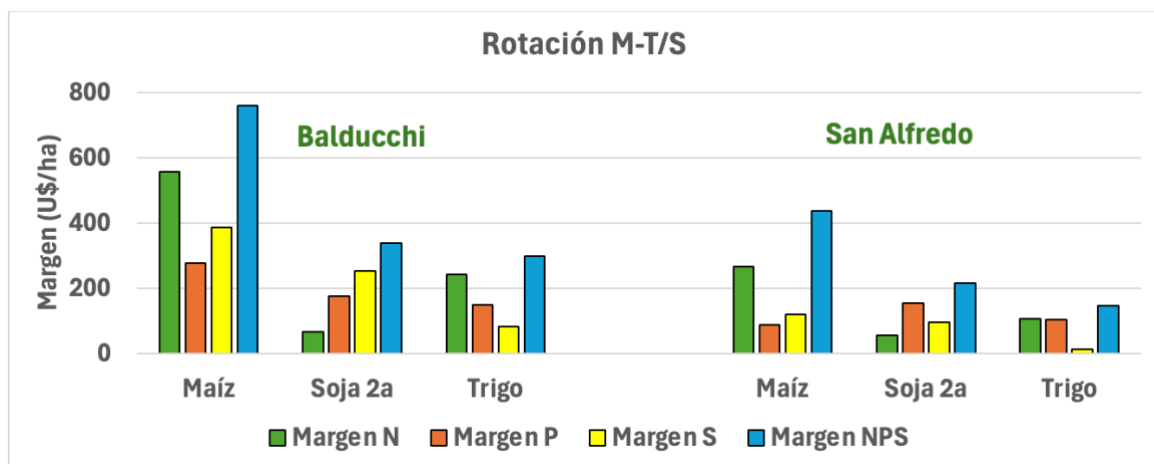


Figura 18. Margen por nutriente, promedio por cultivo para sitios de rotación M-T/S. Se consideraron precios de referencia de maíz de 178 U\$/t, trigo 200 U\$/t, soja 266 U\$/t, urea 570 U\$/t, FMA 860 U\$/t, sulfato de calcio 320 U\$/t y 12 U\$/ha por aplicación. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, 2000 a 2018.

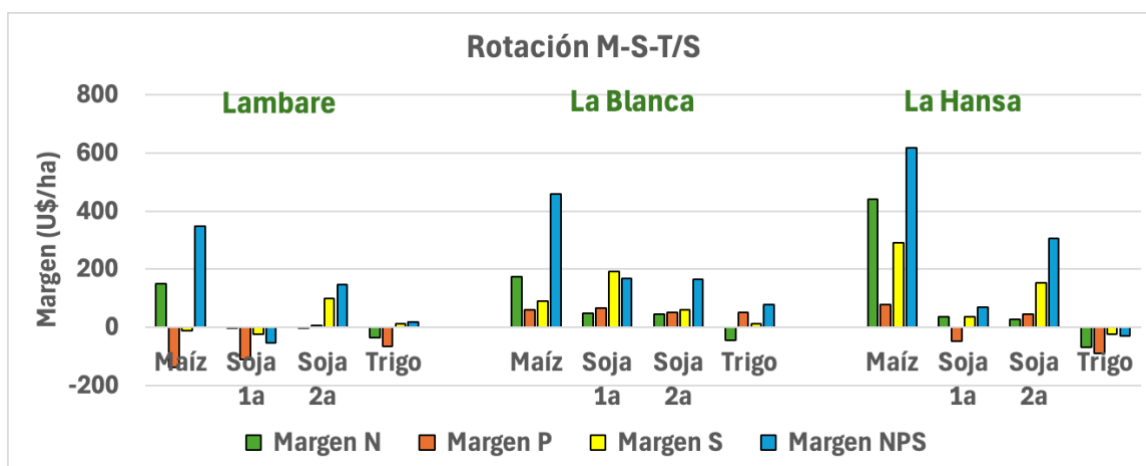


Figura 19. Margen por nutriente, promedio por cultivo para sitios de rotación M-S-T/S. Se consideraron precios de referencia de maíz de 178 U\$/t, trigo 200 U\$/t, soja 266 U\$/t, urea 570 U\$/t, FMA 860 U\$/t, sulfato de calcio 320 U\$/t y 12 U\$/ha por aplicación. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, 2000 a 2018.

7. Comentarios finales

Estos primeros 25 años de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe muestran impactos significativos de la fertilización NPS en productividad, en eficiencia de uso de recursos e insumos, en propiedades edáficas y en rentabilidad.

Un mensaje contundente que nos ha dejado la Red es la necesidad de evaluar la fertilidad y la nutrición de cultivos en cada lote y cada ambiente. Los sitios evaluados en estos 25 años muestran resultados diferentes en producción y rentabilidad que responden a la condición inicial de fertilidad de suelos y el potencial de rendimiento de cada uno de esos sitios. Por lo tanto, el diagnóstico de fertilidad del suelo y de nutrición del cultivo es clave para el uso eficiente y rentable de nutrientes.

Los resultados y análisis de largo plazo que surgen de esta red en campo de productores indica que la nutrición balanceada puede mejorar niveles de nutrientes como P y contribuir a mantener niveles de MO y biomasa de microorganismos. Sin embargo, la nutrición balanceada por sí sola no ha logrado aumentar niveles de MO y no ha resultado en una mayor diversidad biológica en los suelos. Las rotaciones y los cultivos de cobertura, fundamentalmente la diversidad de cultivos en los sistemas, se plantean como alternativas que, sumadas a la nutrición balanceada, podrán mejorar la captación de carbono, la diversidad biológica y las propiedades físicas, en resumen, el funcionamiento y la resiliencia de los suelos. A nivel de Región CREA Sur de Santa Fe, la adopción de miembros CREA de las mejores estrategias de fertilización, generadas en esta Red, ha resultado en impactos positivos en productividad y sostenibilidad de los sistemas.

>. AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a todos los productores y personal de los establecimientos donde se realizan los ensayos desde hace 25 años, todos ellos son responsables que esta Red se siga llevando a cabo.

Asimismo, a todos los involucrados en la ejecución y análisis de esta Red de Nutrición en campañas anteriores: Alejandro Thomas, Belisario Álvarez de Toledo, Miguel Boxler, Hugo Blanco, Raúl Houssay, Jorge Minteguiaga, Luis Firpo, German Baroli, Eduardo Cantoia, Santiago Gallo, Paula Gelso, Luciano Martin, German Deza Marín, Francisco Bauschen, Matías Salinas, Ignacio Ciampitti, Adrián Correndo, Angel Berardo.

>. REFERENCIAS Y PUBLICACIONES DE LA RED DE NUTRICIÓN CREA SUR DE SANTA FE

1. Thomas A., M. Boxler, B. Alvarez de Toledo, R. Houssay, L. Martín, A. Berardo, y F. O. García. 2002. Corn Fertilization in the North Central Pampas: CREA Experiments South of Santa Fe. *Better Crops International* 16 (2): 6-9.
2. Thomas A., M. Boxler, J. Minteguiaga, L. Martin, A. Berardo y F.O. García. 2003. Nutrient Management of Field Crops: The CREA On-Farm Experiments of Southern Santa Fe (Argentina). Agronomy Abstracts (CD). ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin, EEUU.
3. Blanco H., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Houssay, G. Deza Marin, A. Berardo y F. O. García. 2004. Red de Nutricion CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2003/04: Maíz. *Informaciones Agronomicas* 23:9-14.
4. Blanco H., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Houssay, G. Deza Marin, A. Berardo y F. O. García. 2004. Red de ensayos en nutricion de cultivos - Region CREA Sur de Santa Fe. Resultados de la campaña 2003/04: Trigo. En *Simposio "Fertilidad 2004"* pp. 61-67. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
5. García F.; Boxler M.; Minteguiaga J.; Blanco H.; Houssay R.; Deza Marín G. y Berardo A. 2005. Efectos directos y residuales de la fertilización en maíz: Resultados de la red de nutrición CREA sur de Santa Fe. Actas VIII Congreso Nacional de Maíz. AIANBA-Maizar. Rosario, 16-18 Noviembre 2005. pp. 154-157.
6. García F.; Boxler M.; Minteguiaga J.; Blanco H.; Houssay R.; Deza Marín G. y Berardo A. 2005. Nutrient management of wheat: The CREA on-farm experiments of Southern Santa Fe. Abstracts VII International Wheat Conference. SAGPyA-INTA. Mar del Plata, 27 Nov-2 Dic 2005. pp. 186.
7. García F.; Boxler M.; Minteguiaga J.; Blanco H.; Houssay R.; Deza Marín G. y Berardo A. 2006. Direct and Residual Effects of Balanced Fertilization in Field Crops of the Pampas of Argentina. Proceedings CD XVIII World Congress of Soil Science. IUSS. Filadelfia, EE.UU. Julio 2006.
8. Boxler M.; García F.; Minteguiaga J.; Pozzi R.; Firpo L.; Deza Marín G. y Berardo A. 2006. Efectos directos y residuales de la fertilización en trigo/soja en la región CREA Sur de Santa Fe. Resúmenes y Actas CD XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS. Salta-Jujuy, 19-22 Septiembre 2006. pp. 279.
9. García F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza Marin y A. Berardo. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. AACREA. 32 pp. ISBN 987-22576-7-1.

10. García F., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza Marin, and A. Berardo. 2007. Direct and Residual Effects of Balanced Fertilization in Field Crops of the Pampas of Argentina: The first six years of the nutrition network of the Southern Santa Fe Region of CREA. *Better Crops* 91 (3): 11-13.
11. Ferreras L., G. Magra, P. Besson, E. Kovalevski y F. O. García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*. 25 (2):159-172.
12. Ciampitti I., F. O. García, G. Rubio y L. Picone. 2008. Fosforo en rotaciones agrícolas de la región pampeana central. II. Balance de P. Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. San Luis. 13-16 Mayo 2008.
13. Ciampitti I., F. O. García, G. Rubio and Liliana I. Picone. 2008. Phosphorus in field crop rotations of the Pampas of Argentina: Dynamics of Bray P, P balance and soil P fractions. *Agronomy Abstracts* (CD). ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin, EEUU.
14. García F.; M. Boxler; J. Minteguiaga; R. Pozzi; L. Firpo; I. Ciampitti; A. Correndo; F. Bauschen; A. Berardo y N. Reussi Calvo. 2010. La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2000-2009. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pag.
15. Gutiérrez Boem F. H., F. O. García y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? Actas CD XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Rosario (Santa Fe). 31 Mayo-4 Junio 2010.
16. Ciampitti I.A., F.O. García, L.I. Picone y G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 75: 1: 131-142.
17. Ciampitti I., F.O. García, L.I. Picone y G. Rubio. 2011. Soil carbon and phosphorus pools in field crop rotations in Pampean soils of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 75: 2: 616-625.
18. Ciampitti I., L. Picone, G. Rubio, y F. O. García. 2011. Pathways of Phosphorous Fraction Dynamics in Field Crop Rotations of the Pampas of Argentina. *Soil Science Society of America Journal* 75: 3: 918-926.
19. Correndo A., G. Rubio, I. Ciampitti y F. O. García. 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. In F. O. García y A. Correndo. (ed.). Actas Simposio Fertilidad 2011: La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción. IPNI. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. pag. 247-250. ISBN 978-987-24977-2-9.
20. Silva Rossi M. 2011. Adsorción y desorción de fósforo en suelos del área central de la región pampeana. Tesis Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. 160 pag. Disponible en <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1678/Tesis%20Doctorado%20Mart%C3%ADn%20Silva%20Rossi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
21. Correndo, A.A.; M. Boxler, y F. O. García. 2012. Oferta hídrica y respuesta a la fertilización en maíz, trigo y soja en el norte de la región pampeana argentina. Actas CD XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs-SLCS. Mar del Plata, Argentina. ISBN 978-987-1829-11-6.
22. Correndo, A.A.; G. Rubio, I. Ciampitti, y F. O. García, F.O. 2012. Dinámica del potasio en molisoles de la región pampeana norte. Actas CD XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs-SLCS. Mar del Plata, Argentina. ISBN 978-987-1829-11-6.
23. Correndo, A.A. y F. O. García, F.O. 2012. Agronomic efficiency and return on investment in long-term NPS experiments in central pampas of Argentina. 19th ISTRO Conference. Montevideo, Uruguay.
24. Correndo A., I. A. Ciampitti, G. Rubio, F. O. García. 2013. Soil-test potassium dynamics in Mollisols as affected by crop management. XVII International Plant Nutrition Colloquium. Istanbul, Turkey.

25. Verdenelli, R. A., Conforto, C. B., Pérez-Brandán, C., Chavarría, D., Rovea, A., Vargas-Gil, S., & Meriles, J. M. (2013). Integrated multivariate analysis of selected soil microbial properties and their relationships with mineral fertilization management in a conservation agriculture system. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 63(7), 623–632. <https://doi.org/10.1080/09064710.2013.837193>
26. Correndo A., M. Boxler y F. O. García. 2014. Manejo de la fertilización en la región pampeana centro-norte: Resultados económicos en el largo plazo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 13:21-25. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2014-?OpenDocument&toc=1>
27. Correndo A., M. Boxler y F. O. García. 2014. Manejo de la fertilización en la región pampeana centro-norte: Resultados económicos en el largo plazo. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Bahía Blanca, Buenos Aires. AACCS.
28. García F. O., M. Boxler, A. Correndo, S. Gallo, M. Salinas, R. Pozzi, and N. Reussi Calvo. 2015. Looking for Sustainability: Long-Term Fertilization in the Pampas of Argentina. *Agronomy Abstracts* (CD). ASA-CSSA-SSSA Meetings. Madison, Wisconsin, EEUU.
29. Correndo A.A., M. Boxler, y F. O. García. 2015. Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. *Cienc. Suelo (Argentina)* 33(2):197-212.
30. Sucunza F., F. Gutiérrez Boem, F. O. García, M. Boxler y G. Rubio. 2016. Fertilización de largo plazo en la región pampeana: Balance de fósforo y dinámica de extracción. *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS. Río Cuarto, Córdoba.
31. Vega Jara L.; G. Rubio; F. Sucunza; M. Boxler; F.O. García; F. H. Gutiérrez Boem. 2016. Relación entre el contenido de N y P en grano y fracción disponible en el suelo. *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*.
32. Vega Jara L.; G. Rubio; M. Boxler; F.O. García; F. H. Gutiérrez Boem. 2017. Efecto de la fertilización de largo plazo (N, P, S) sobre los granos de soja. *XVII Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo*.
33. Ferreras L., G. Magra, A. Saperdi, S. Toresani, M. Boxler, S. Gallo, R. Pozzi, A. Correndo, and F. O. García. 2018. Does balanced fertilization improve soil health? *Better Crops* 102 (1) DOI: 10.24047/BC102118
34. Sucunza F., F. H. Gutiérrez Boem, F.O. García, M. Boxler, and G. Rubio. 2018. How Can Soil P Balance Influence Soil Test P? A case study from the Argentinian Pampas. *Better Crops* 102(4): 11-13. doi.org/10.24047/BC102411
35. Sucunza F., F. Gutierrez Boem, F. O. García, M. Boxler, and G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Eur. J. Agron.* 96:87-95. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.004>
36. Verdenelli, Romina Aylén, Chavarría, Diego, Dominichín, María Florencia, Rovea, Adrián, Vargas-Gil, Silvina, & Meriles, José Manuel. (2018). Influence of 12-years of nps fertilization on soil quality, microbial community profile and activity under conservation agricultural management. *Ciencia del suelo*, 36(1), 99-109. Recuperado en 02 de abril de 2025, de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672018000100010&lng=es&tlng=en.
37. Verdenelli, R. A., Mascanfroni G. D., Dominichin M.F., Barbero F.M., Vargas-Gil, S., & Meriles, J. M. 2019. Proteínas totales y perfiles SDS PAGE de suelos agrícolas bajo fertilización mineral. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol. 6, No. 1, Marzo 2019

38. Verdenelli RA, Dominchin MF, Pérez-Brandan C, Rovea A, Vargas-Gil S, Meriles JM. Effect of long-term mineral fertilisation on soil microbial abundance, community structure and diversity in a Typic Hapludoll under intensive farming systems. *Ann Appl Biol.* 2019; 175: 363–375. <https://doi.org/10.1111/aab.12546>
39. Gelso P., F. Permingeat, R. Pozzi, S. Gallo, M. Salinas, N. Reussi Calvo y F. O. García. 2019. Red Nutrición Sur Santa Fe: 18 años de ensayos en lotes de producción. *Actas on-line Simposio Fertilidad 2019.* P. 312-313. Fertilizar AC.
40. Vega Jara, L., F.H. Gutiérrez Boem, F.O. García, M. Boxler, G. Rubio. 2020. Long-term fertilization does not affect soil C:N:S or the proportion between labile/non-labile fractions in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 84: 798-810. doi:10.1002/saj2.20058.
41. Manenti L., F.O. García y G. Rubio. 2020. La fertilización como eventual amortiguador del efecto de la variabilidad climática sobre los rendimientos. *Actas XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Corrientes, Argentina. AACs.
42. Manenti L., F.O. García y G. Rubio. 2020. El rol de la fertilización en la eficiencia de uso de agua en cultivos de la región pampeana. *Actas XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Corrientes, Argentina. AACs.
43. Correndo, A.A., Rubio, G., García, F.O., Ciampitti I.A. 2021. Subsoil-potassium depletion accounts for
44. the nutrient budget in high-potassium agricultural soils. *Sci Rep* 11, 11597. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90297-1>
45. Manenti L., J. Macholdt, F. O. García, G. Rubio. 2023. Resilience of maize, wheat, and soybean cropping systems as affected by fertilization: Analysis of a long-term field network. *Agron. J.* 1-13. <https://doi.org/10.1002/agj2.21325>

Mas información actualizada de los resultados obtenidos por la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe se puede encontrar en: www.creasurdesantafe.com.ar

Actividad de enzimas β -glucosidasas como indicador de cambios en el uso y la fertilidad de los suelos

► ► Romero J¹, Dublan F², López L¹, Reussi Calvo NI^{1,3},
Amenta M¹, Commatteo JG⁴, Crespo CC¹, Eyherabide M^{1,5},
Sainz Rozas HR^{1,3,5}, Barbieri P^{3,5}, García G^{1,6}, Mateos Inchauspe F⁴,
Diovisalvi N⁴ & Wyngaard N^{1,3*}

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, ² Amauta, ³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ⁴ Fertilab, ⁵ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ⁶ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC)

✉ nwyngaard@mdp.edu.ar

>. INTRODUCCIÓN

Se define a la salud de un suelo como su capacidad para funcionar dentro de un ecosistema, sostener la producción vegetal y animal, mantener o aumentar la calidad del agua y del aire y, sostener la salud de los seres vivos (Doran y Parkin, 1997; Doran, 2002). Este concepto integral abarca a la fertilidad del suelo, entendida como la capacidad de suministrar los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. De hecho, la fertilidad es un componente crucial de la salud del suelo: un suelo saludable facilita la disponibilidad y el ciclado de nutrientes, lo que a su vez impacta directamente en la productividad agrícola. El estado de salud de un suelo depende de la interacción de diversas propiedades físicas, químicas y biológicas (Doran et al., 1994), por lo que su determinación no es simple y directa. Por tal motivo, se recurre al uso de indicadores de salud edáfica (ISE) para la estimación del estado de salud de un suelo y, por lo tanto, de su fertilidad.

Los ISE son variables edáficas que se utilizan para indicar o estimar diferentes aspectos de la salud del suelo. Un ISE debe ser: i) sencillo y económico de determinar, ii) fácil de interpretar, iii) sensible a las prácticas de manejo, iv) debe relacionarse con una o más funciones y/o propiedades edáficas (Doran y Parkin, 1997) y v) debe ser evaluado y calibrado para las condiciones edafoclimáticas donde será utilizado (Büneman et al., 2018). Una alternativa para el relevamiento de la salud del suelo es la determinación de la actividad de enzimas involucradas en procesos edáficos claves. Dentro de las enzimas del suelo, cuantificar la enzima β -glucosidasa permite estimar la actividad biológica y la capacidad de un suelo para estabilizar materia orgánica (MO) (Ndiaye et al., 2000). Si bien la actividad enzimática ha sido sugerida como un ISE por algunos investigadores (Karaca et al., 2011; Sainju et al., 2022) la misma no ha sido evaluada en las condiciones edafoclimáticas y productivas de la región pampeana argentina.

La región pampeana argentina ha sufrido en las últimas décadas un proceso de degradación del suelo (Fernandez et al., 2022, Wyngaard et al., 2022), que ha sido asociado a una frecuencia de soja en las rotaciones cada vez más simplificadas (i.e. monocultivos) (Wyngaard et al., 2022), que presentan largos períodos de barbecho y una baja cobertura vegetal (Wright y Hons, 2004). En este contexto, la

intensificación sustentable de las secuencias de cultivo que se logra al incrementar, por ejemplo, la frecuencia de cultivos por unidad de tiempo es una alternativa para aumentar la eficiencia en el uso de recursos y la salud de los suelos (Commatteo et al., 2023; Crespo et al., 2021a, 2021b, 2023). Por lo tanto, para cumplir el rol de ISE a nivel regional, la actividad de las enzimas β -glucosidasas debería ser sensibles a cambios edáficos en el mediano o largo plazo generados por la intensificación sustentable de las secuencias de cultivos.

Para la producción agrícola es necesario que un ISE permita indicar, caracterizar o diagnosticar funciones y/o aspectos relacionados con la salud bioquímica, biológica, física y química y la productividad de los cultivos (Doran y Parkin, 1997). Sin embargo, por lo general las variables propuestas como ISE no consideran los aspectos relacionados a la productividad de los cultivos [e.g. maíz (*Zea mays* L.)], que es el aspecto de principal interés agronómico. En este sentido, la actividad de las β -glucosidasas en el suelo podrían influir significativamente en la respuesta de los cultivos a la fertilización nitrogenada, debido a la estrecha relación que existe entre las tasas de mineralización de carbono (C) y nitrógeno (N) en el suelo. (Manzoni y Porporato, 2009). Sin embargo, no existen trabajos publicados que validen dicha hipótesis.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de la actividad de la enzima β -glucosidasa para i) discriminar suelos con diferente grado de intensificación de secuencias de cultivo en el largo plazo y ii) predecir la respuesta en grano de maíz a la fertilización nitrogenada.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Asociación entre actividad enzimática e intensificación de las secuencias de cultivo

Se trabajó con un conjunto de muestras superficiales (0 a 5 y 5 a 20 cm) de suelo obtenido de un estudio previo (Crespo et al., 2021a, 2021b). Estas muestras ($n = 80$) corresponden a cuatro experimentos a campo de larga duración establecidos durante la campaña agrícola 2006/2007 en la Pampa Húmeda Argentina. Los sitios experimentales fueron: Sitio 1: Balcarce ($37^{\circ} 45' 13''$ S; $58^{\circ} 17' 53''$ O), en un Argiudol Típico con textura superficial franca (24.2, 32.9 y 42.9 g 100 g⁻¹ de arcilla, limo y arena, respectivamente); Sitio 2: Marcos Juárez ($32^{\circ} 43' 13''$ S; $62^{\circ} 06' 14''$ O) en un Argiudoll Típico con textura superficial franco arcillo limoso (23.9, 62.7 y 13.3 g 100 g⁻¹ de arcilla, limo y arena, respectivamente); Sitio 3: Paraná ($31^{\circ} 50' 59''$ S; $60^{\circ} 32' 22''$ O), en un Argiudol Ácuico con textura superficial franco arcillosa (27.1, 55.1 y 17.8 g 100 g⁻¹ de arcilla, limo y arena respectivamente); Sitio 4: General Villegas ($34^{\circ} 52' 27''$ S; $62^{\circ} 45' 32''$ O), en un Hapludoll típico con textura superficial franco arenosa (13.2, 21.8 y 65 g 100 g⁻¹ de arcilla, limo y arena respectivamente) (Soil Survey Staff, 2014). El diseño experimental en cada sitio fue un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones, donde se evaluaron tres secuencias de cultivos. Esas secuencias fueron: Sj: monocultivo de soja [*Glicine max* (L.) Merr.]; Sj/CC: cultivo de cobertura (CC) seguido de soja; y Rot: rotación de cultivos con maíz, trigo y soja doble cultivo. Los cultivos de cobertura utilizados fueron: avena (*Avena sativa* L.) en el sitio 1, triticale (X. *Triticosecale wittmack*) en el sitio 2, trigo en el sitio 3 y centeno (*Secale cereale* L.) en el sitio 4. Para caracterizar cada secuencia de cultivos, se calculó el índice de intensificación ecológica de cultivo (IC) para cada combinación de secuencia de cultivos y sitio. El IC se define como la proporción del año calendario que está ocupada por vegetación viva, y es una medida del grado de perennidad del agroecosistema (Videla-Mensegue et al., 2021). Los cultivos se fertilizaron con N, fósforo (P) y azufre (S) cuando fue necesario, para asegurar la suficiencia de nutrientes. Todos los experimentos se llevaron a cabo bajo sistemas de siembra directa y sin riego. Se puede acceder a más información sobre suelos, diseño experimental y manejo de cultivos en Crespo et al. (2021b).

Las muestras de suelo fueron secadas y almacenadas. Para la determinación de la actividad enzimática de las enzimas β -glucosidasas se siguió la metodología descrita por Parham y Deng (2000) en las muestras de 0 a 5 y 5 a 20 cm. Luego, se realizó un promedio ponderado para calcular el valor en el estrato de 0 a 20 cm. Los valores de actividad enzimática se expresaron en μ g de p-nitrofenol (PNP) por gramos de suelo y hora de incubación. Se realizaron análisis de varianza en las diferentes profundidades para evaluar la capacidad de la actividad enzimática para discriminar suelos con diferentes secuencias de cultivo dentro de cada sitio por separado. Además, se realizaron análisis de regresión para vincular la actividad de las enzimas β -glucosidasas y el IC.

2. Asociación entre actividad enzimática y la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada.

Durante la campaña de maíz 2020-2021 se realizaron once experimentos de campo en cuatro lotes comerciales (sitios experimentales) de la región pampeana de argentina. Los sitios experimentales fueron seleccionados por representar la variabilidad ambiental, topografía y de manejo del cultivo de cada región. Los sitios se agruparon en dos áreas con condiciones edáficas y climáticas contrastantes: sudeste bonaerense (Argiudol Típico; 13,5°C de temperatura media anual del aire; 950 mm de precipitación media anual) y el norte de la RP (Argiudol Típico/Hapludol Típico, 19,2°C de temperatura media anual del aire; 975 mm de precipitación media anual). En la Tabla 1 se presentan más detalles de los sitios experimentales.

El diseño experimental en todos los sitios fue un bloque completo al azar con tres repeticiones y dos dosis de N: 0 y 240 kg N ha⁻¹ (0N y 240N, respectivamente). La fuente de N fue urea (46-0-0) aplicada en la siembra del cultivo de maíz. La densidad y la fecha de siembra fueron óptimas según el agricultor en cada lote (Tabla 1). Se trabajó sin limitaciones de P, S y micronutrientes, para lo cual se aplicó en promedio una dosis de 25 kg P ha⁻¹; 15 kg S ha⁻¹ y 1,5 kg Zn ha⁻¹, respectivamente. El tamaño de la unidad experimental varió entre 60 x 60 y 80 x 80 m con un área de análisis de 50 x 50 m.

Sobre la base de una cuadrícula de 5 x 5 m (25 muestras) se recogieron muestras de suelo compuestas a dos profundidades (0-20 y 20-60 cm) al momento de la siembra del cultivo. Las muestras se secaron a estufa a 30 °C durante 48 horas, luego fueron molidas y tamizadas por 0,5 mm para determinar el contenido de MO (Walkley y Black, 1934; Eyherabide et al., 2014), pH (relación suelo: agua 1:2,5) (Thomas, 1996), P extractable (P-Bray) (Bray y Kurtz, 1945; Murphy y Ripely, 1962) y N mineralizado en condiciones de anaerobiosis (Nan) (Bremner y Keeney, 1965; Keeney, 1982) en los primeros 20 cm del suelo. Además, se determinó la textura (Bouyoucos, 1962) y N-nitrato(N-NO₃) (Keeney y Nelson, 1982) a la profundidad de 0 a 20 y 20 a 60 cm del perfil. A madurez fisiológica se cosecharon las parcelas. El resultado de rendimiento se expresa con un porcentaje de humedad de 14%. Se calculó el rendimiento relativo (RR) como: (Rendimiento 0 N/ Rendimiento 240N) x 100. A su vez, se utilizó el método del Arcoseno (ALLC) para hallar el umbral crítico de la actividad de las enzimas β-glucosidasas para alcanzar un RR del 90% (Correndo et al., 2017).

Tabla 1. Características de los experimentos.

Experimento	Siembra	Cosecha	Densidad plantas m ⁻²	N-NO ₃ ⁻ kg ha ⁻¹ 0-60 cm	Textura*	MO	Nan	P-Bray	pH
						g kg ⁻¹ 0 - 20 cm	ppm	ppm	
1	22-sep	23-mar	9,0	72	Fr-Ar	3,8	63	16	5.9
2	22-sep	23-mar	8,0	42	Ar-Li	2,5	28	20	5.2
3	23-sep	23-mar	9,0	70	Fr-Ar	3,7	63	12	5.5
4	23-sep	23-mar	8,5	46	Fr-Ar	3,5	42	14	5.3
5	24-sep	22-mar	8,9	48	Fr-Ar	2,9	46	9	5.4
6	25-sep	22-mar	7,8	34	Ar-Li	2,2	37	11	5.4
7	29-sep	22-mar	8,3	36	Fr-Ar	2,7	40	10	5.5
8	7-nov	19-may	6,7	46	Limoso	5,9	64	15	5.5
9	7-nov	19-may	4,7	40	Ac-Li	5,6	75	41	5.8
10	21-nov	26-may	4,4	78	Limoso	5,5	64	23	5.5
11	21-nov	26-may	3,4	90	Ac-Li	5,5	68	16	5.6

* Ac: arcilloso, Ar: arenoso, Fr: franco, Li: limoso.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Asociación entre actividad enzimática e intensificación de las secuencias de cultivo

La actividad enzimática mostró valores promedio de 185, 38 y 87 $\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ en los estratos de 0 a 5, 5 a 20 y 0 a 20 cm, respectivamente (Figura 1). La disminución de la actividad enzimática con la profundidad está asociada a la estratificación de las fracciones orgánicas y de las enzimas del suelo (Peregrina et al., 2014). Se observó la siguiente tendencia general de la actividad de las enzimas β -glucosidasas en todos los sitios y profundidades: Sj CC > Rot > Sj. Sin embargo, esta tendencia no fue significativa en la profundidad de 5 a 20 cm, demostrando cómo la estratificación de la actividad enzimática resulta en una disminución de la sensibilidad de esta variable ante cambios en el manejo del suelo. El incremento en la actividad enzimática en suelos con historial de uso de CC ha sido reportado en otros trabajos (Weerasekara et al., 2017; Tyler 2020; Thapa et al., 2021) y surge del incremento en los aportes de compuestos orgánicos al suelo que estimulan la actividad biológica. El incremento en la actividad enzimática generado por el uso de CC con respecto a Sj varió entre sitios, alcanzando valores desde 134% en Marcos Juárez y a 34% en Paraná, donde las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas. Este resultado evidencia cómo las condiciones edafoclimáticas pueden modificar la respuesta de la actividad enzimática ante cambios en el manejo. Futuros estudios son necesarios para identificar cuáles son las variables regionales que determinan las diferencias observadas.

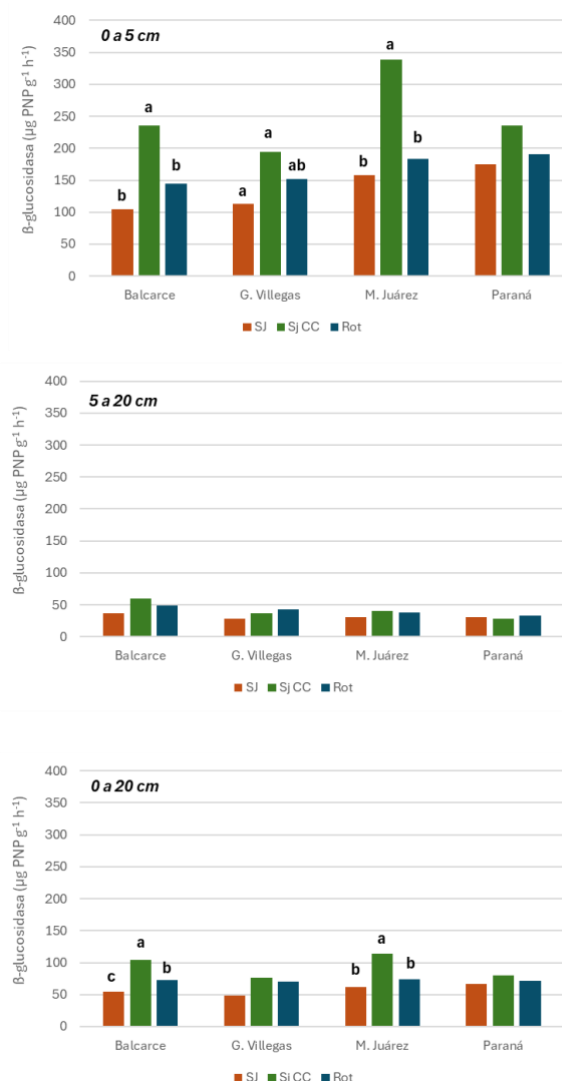


Figura 1. Actividad de enzimas β -glucosidasas en cuatro sitios de la región pampeana en 3 secuencias de cultivo (Sj: soja, Sj CC: soja/ cultivo de cobertura, Rot: rotación maíz, trigo y soja) en 3 diferentes estratos del suelo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre rotaciones dentro de cada sitio.

Respecto a la actividad enzimática en el tratamiento Rot (maíz, trigo y soja doble cultivo), en general no se observaron diferencias significativas con el tratamiento Sj y fue menor que en Sj CC. Esto se debe a que el tratamiento Rot demostró un menor ingreso de carbono (toneladas por hectárea) acumulado a lo largo del ensayo de larga duración respecto a Sj CC (Crespo et al., 2021). Además, el tratamiento Sj CC presentó un índice de intensificación promedio 12% superior al de Rot (Crespo et al., 2023), resultando en un mayor período del año ocupado por cultivos vivos que estimulan en su zona radicular la actividad biológica y enzimática (Sanaullah et al., 2016). De esta manera, se observa que existe una relación entre la intensificación de las secuencias de cultivos y la actividad de las enzimas β -glucosidasas (Figura 2). Estudios en otras condiciones edafoclimáticas han demostrado que la diversificación y aumento del número de cultivos por unidad de tiempo resultan en un incremento de la actividad de dichas enzimas (Borase et al., 2020; Hamer et al., 2021)

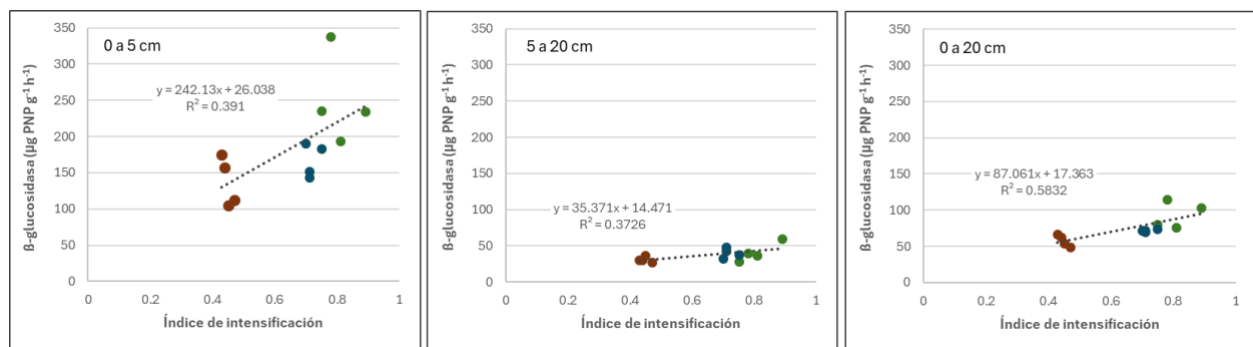


Figura 2. Asociación entre el índice de intensificación y la actividad de las enzimas β -glucosidasas. Los colores de los círculos representan la secuencia de cultivo: marrón para Sj, azul para Rot y verde para Sj CC.

3. Asociación entre actividad enzimática y la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada.

El rendimiento de los tratamientos ON varió entre 4846 y 13630 kg ha⁻¹. Estos valores están dentro del rango de valores reportados para maíz en la región pampeana ante condiciones de limitantes productivas (Merlos et al., 2015). La fertilización nitrogenada generó aumentos en promedio de 3894 a 10730 kg ha⁻¹. La respuesta en rendimiento se asoció de forma negativa con la actividad de las enzimas β -glucosidasas, cuyos valores tuvieron un rango de 55 a 126 μ g PNP g⁻¹ h⁻¹, con un valor promedio de 82 μ g PNP g⁻¹ h⁻¹. Este valor es inferior al informado por Chavez et al. (2024) para suelos en secuencias de maíz. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que dichos autores analizaron el estrato de 0 a 10 cm, donde la actividad enzimática es mayor por su estratificación superficial (Peregrina et al., 2014). Por último, fue posible ajustar un modelo entre el RR del cultivo de maíz y la actividad de las enzimas β -glucosidasas (Figura 3), siendo el nivel crítico de 94 μ g PNP g⁻¹ h⁻¹ para un 90% de RR. Esta información preliminar podría ser utilizada para identificar ambientes de alta probabilidad de tener respuesta al agregado de N.

La actividad de las enzimas β -glucosidasas en el suelo se relaciona con la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada (Figura 3) debido a su rol fundamental en la mineralización de la MO (Das y Varma, 2010). Al descomponer polisacáridos y otros compuestos orgánicos, las β -glucosidasas liberan nutrientes, incluyendo formas orgánicas de nitrógeno. Estos compuestos nitrogenados orgánicos son posteriormente mineralizados a formas inorgánicas de N que las plantas de maíz pueden absorber. Por lo tanto, una mayor actividad de las enzimas β -glucosidasas puede aumentar la disponibilidad de N desde fracciones orgánicas del suelo, reduciendo la necesidad de fertilización nitrogenada externa para alcanzar un rendimiento óptimo del cultivo. Otro estudio determinó asociaciones entre el rendimiento de maíz y la actividad de las enzimas β -glucosidasas (Lopes et al., 2018). Sin embargo, dicho estudio no evaluó el rendimiento durante un ciclo de crecimiento del cultivo, sino el rendimiento acumulado en lotes de

ensayos de larga duración. De esta forma, los resultados de nuestro ensayo cobran relevancia al evaluar el potencial predictivo de la respuesta en rendimiento en grano de maíz a la fertilización nitrogenada durante una estación de crecimiento.

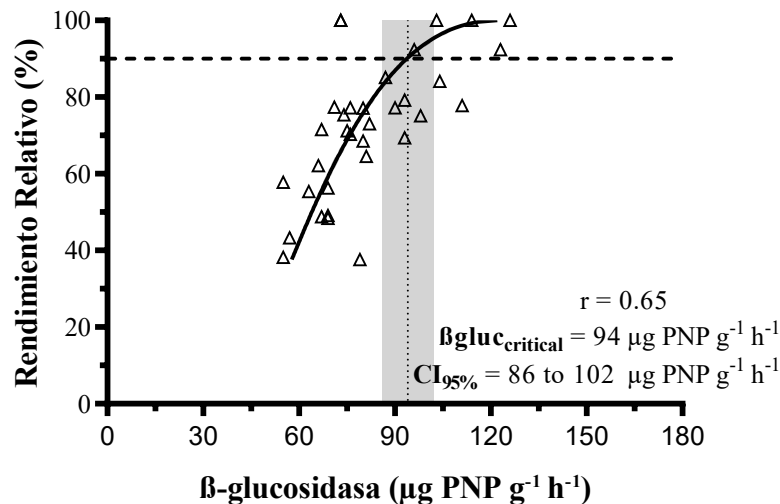


Figura 3. Asociación entre el rendimiento relativo de maíz y la actividad de las enzimas β-glucosidasas. La línea punteada vertical indica el umbral crítico al 90% de rendimiento relativo, mientras que la región sombreada en gris representa su intervalo de confianza al 95%.

>. CONCLUSIONES

La actividad de las enzimas β-glucosidasas demostró ser una propiedad bioquímica del suelo sensible a las prácticas de manejo y capaz de identificar ambientes con elevada probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada. De esta manera, surge como un potencial ISE para los sistemas productivos de la región pampeana. Sin embargo, es necesario validar el modelo desarrollado en un rango más amplio de condiciones edafoclimáticas.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Borase, D. N., Nath, C. P., Hazra, K. K., Senthilkumar, M., Singh, S. S., Praharaj, C. S., ... & Kumar, N. (2020). Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity. *Ecological Indicators*, 114, 106322.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils. *Agron. J.*, 54: 464-465.
- Bray, R.H., & Kurtz, L.T. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59, 39-46.
- Bremner, J.M., & Keeney, D.R. (1965). Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Analytica chimica acta*, 32, 485-495.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., Deyn, G.D., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., van Groenigen, J.W., Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120:105-125.

- Commatteo, J.G., Barbieri, P.A., Corral, R.A., Covacevich, F. (2023). The potential of glomalin-related soil proteins as a sensitive indicator of changes in different cropping systems in the Argentine Pampas. *Environmental Sustainability*, 6, 183-194.
- Correndo, A.A., F. Salvagioti, F.; Garcia, F.O.; Gutiérrez-Boem, F.H. 2017. A modification of the arcsine–log calibration curve for analysing soil test value–relative yield relationships. *Crop Pasture Sci.* 68:297-304. DOI:10.1071/CP16444.
- Crespo, C., Wyngaard, N., Sainz Rozas, H., Studdert, G., Barraco, M., Gudelj, V.; Barbagelata, P., Barbieri, P. (2021a). Effect of intensified cropping sequences on soil physical properties in contrasting environments. *Catena*, 207, 105690.
- Crespo, C., Wyngaard, N., Sainz Rozas, H., Barbagelata, P., Barraco, M., Gudelj, V., Barbieri, P. (2021b). Improving soil organic nitrogen and sulfur pools by cover cropping and fertilization in soybean-based cropping systems. *Soil Till. Res.*, 213, 105138
- Crespo, C., Wyngaard, N., Rozas, H. S., Studdert, G., Barraco, M., Gudelj, V., ... & Barbieri, P. (2021c). Effect of the intensification of cropping sequences on soil organic carbon and its stratification ratio in contrasting environments. *Catena*, 200, 105145.
- Crespo, C., Novelli, L., Wyngaard, N., Martínez, R. D., Barraco, M., Gudelj, V., ... & Barbieri, P. A. (2023). Optimizing resource productivity in soybean-based sequences through long-term crop intensification. *Field Crops Research*, 301, 109018.
- Das, S. K., & Varma, A. (2010). Role of enzymes in maintaining soil health. In *Soil enzymology* (pp. 25-42). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Doran J.W., Parkin T.B., Coleman, D.C., Bezdicsek, D.R., Stewart, B.A. (1994). Defining soil quality for a sustainable Environment. American Society of Agronomy and Soil Sci. Society of America, Madison, WI.
- Doran, J.W. y Parkin, T.B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. En: Doran, J.W., Jones, A.J. (eds.). *Methods for assessing soil quality*. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, EEUU, pp. 25-37.
- Doran, J.W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agric Ecosyst Environ*, 88, 119–127.4.
- Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19.
- Fernández, D. S., Puchulu, M.E., Rostagno, C.M., La Manna, L., Becker, A.R., Grumelli, M.D.T., & Schiavo, H.F. (2022). Agricultural land degradation in Argentina. *Impact of Agriculture on Soil Degradation I: Perspectives from Africa, Asia, America and Oceania*, 1-47.
- Hamer, U., Meyer, M. U. T., Meyer, U. N., Radermacher, A., Götze, P., Koch, H. J., & Scherber, C. (2021). Soil microbial biomass and enzyme kinetics for the assessment of temporal diversification in agroecosystems. *Basic and Applied Ecology*, 53, 143-153.
- Karaca, A., Cetin, S.C., Turgay, O.C., y Kizilkaya, R. (2011). Soil enzymes as indication of soil quality. *Soil enzymology*, 119-148.
- Keeney, D.R. (1982). Nitrogen-availability indexes. In: AL Page (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties - Agronomy Monograph 9* (2nd ed.). Pp. 643-698. ASA.SSSA. Madison, WI.
- Keeney, D.R., & Nelson, D.W. (1982). Nitrogen—inorganic forms. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 643-698.
- Lopes, A. A. C., Sousa, D. M. G., dos Reis Jr, F. B., Figueiredo, C. C., Malaquias, J. V., Souza, L. M., & Mendes, I. C. (2018). Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, 12, 72-82.
- Manzoni, S., & Porporato, A. (2009). Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7), 1355-1379.

- Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercu, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J., ... & Grassini, P. (2015). Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154.
- Murphy, J., y Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem.* (27), 31–36.
- Ndiaye E.L., Sandeno, J.M., McGrath, D., Dick R.P. (2000). Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. *Am J Altern Agric* 15:26–36
- Parham, J.A. y Deng, S.P. (2000). Detection, quantification and characterization of B- glucosaminidase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 1183-1190.
- Peregrina, F., Pilar Pérez-Álvarez, E., & García-Escudero, E. (2014). Soil microbiological properties and its stratification ratios for soil quality assessment under different cover crop management systems in a semiarid vineyard. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(4), 548-559.
- Sainju, U.M., Liptzin, D., & Dangi, S.M. (2022). Enzyme activities as soil health indicators in relation to soil characteristics and crop production. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5(3), e20297.
- Sanaullah, M., Razavi, B. S., Blagodatskaya, E., & Kuzyakov, Y. (2016). Spatial distribution and catalytic mechanisms of β -glucosidase activity at the root-soil interface. *Biology and fertility of soils*, 52, 505-514.
- Soil Survey Staff, (2014). Keys to soil taxonomy. Washington, DC, USA.
- Thapa, V. R., Ghimire, R., Acosta-Martínez, V., Marsalis, M. A., & Schipanski, M. E. (2021). Cover crop biomass and species composition affect soil microbial community structure and enzyme activities in semiarid cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 157, 103735.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3 chemical methods*, 5, 475-490.
- Tyler, H. L. (2020). Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. *Pedobiologia*, 81, 150666.
- Videla-Mensegue, H., Caviglia, O.P., Degioanni, A., Marcos, J., & Bonadeo, E. (2021). Modelling water productivity for ecological intensification of crop sequences in the Inner Argentinean Pampas. *Field Crops Research*, 271, 108246.
- Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37
- Weerasekara, C. S., Udawatta, R. P., Gantzer, C. J., Kremer, R. J., Jose, S., & Veum, K. S. (2017). Effects of cover crops on soil quality: selected chemical and biological parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(17), 2074-2082.
- Wright, A.L., y Hons, F.M. (2004). Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 507–513.
- Wyngaard, N., Crespo, C., Angelini, H., Eyherabide, M., Larrea, G., Reussi Calvo, N., Carciochi, W., Sainz Rozas, 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.

Fertilización con diferentes dosis y fuentes nitrogenadas durante V6 del maíz en la región NOA

► ► Robledo, G. E.*; Sanzano, G. A.*; Rojas Quinteros, H. C.*;
Navarro Di Marco, J. P.*; Scalora, F.** y Perez D. R.***

*Ings. Agrs., Sección Suelos y Nutrición Vegetal; **Ings. Agrs.; Sección Granos;***
Ing. Agr., Sección Estadísticas y Economía. Estación Experimental Agroindustrial
Obispo Colombes. Tucumán – Argentina. E-

✉ gerobledo@eeaoc.org.ar

>. INTRODUCCIÓN

Los sistemas productivos de granos en el NOA se caracterizan por presentar un bajo porcentaje de gramíneas en la rotación. Esta situación, sumado a la baja reposición de nutrientes en lotes comerciales durante largo tiempo, y la aparición de híbridos de maíz con alto potencial de rendimiento han provocado la degradación física, química y biológica de nuestros suelos. La degradación química se traduce en bajos contenidos de materia orgánica y disminución en la disponibilidad de nutrientes del suelo. Esta situación no solo ha llevado a la experimentación de una fertilización nitrogenada convencional, sino también al uso de otras fuentes con el fin de mejorar la performance de dicha práctica. Por otra parte, la falta de lluvias al inicio del cultivo sumada a la incertidumbre sobre la severidad del ataque de ciertas plagas, provoca que algunos productores demoren la fertilización unos días.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia de la fertilización nitrogenada sobre el cultivo de maíz, se llevó a cabo un ensayo en la localidad de San Agustín, departamento Cruz Alta, en la zona Este de la provincia de Tucumán, que consistió en la aplicación de distintas dosis y fuentes nitrogenadas al suelo, sin incorporar y cuando el maíz presentó seis hoja verdaderas (V6).

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la campaña 2023-2024, en la subestación Monte Redondo, ubicado en la Localidad de San Agustín, provincia de Tucumán, se llevó a cabo un ensayo de fertilización nitrogenada utilizando distintas dosis y fuentes. Se evaluaron siete tratamientos: un testigo absoluto sin fertilizar, tres tratamientos utilizando Urea (46-0-0) como fuente nitrogenada con dosis de 50, 75 y 100 kg/ha; y otros tres tratamientos utilizando Nitrato de Amonio Calcáreo (CAN; 27-0-0) aplicando las mismas dosis de N antes mencionadas. Los fertilizantes nitrogenados fueron aplicados cuando el cultivo de maíz presento seis hojas verdaderas (V6). En la Tabla 1 se indica en detalle cada uno de los tratamientos evaluados en el ensayo.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos realizados y momento de aplicación de los fertilizantes y enmienda.

<u>Tratamientos</u>	<u>Dosis N (kg/ha)</u>	<u>Fuentes</u>
TA	-	-
U N50	50 kg/ha	Urea (46-0-0)
CAN N50	50 kg/ha	CAN (27-0-0)
U N75	75 kg/ha	Urea (46-0-0)
CAN N75	75 kg/ha	CAN (27-0-0)
U N100	100 kg/ha	Urea (46-0-0)
CAN N100	100 kg/ha	CAN (27-0-0)

El diseño experimental utilizado en el ensayo fue en bloques al azar con cuatro repeticiones. El análisis de la varianza de los rendimientos de cada tratamiento fue realizado mediante LSD Fisher ($P>0,10$). Cada parcela estuvo constituida por seis líneas sembradas a 52 cm de distanciamiento, con un largo de 10 m, sumando así una superficie aproximada de 31 m² por parcela. La densidad de siembra del cultivo de maíz fue de 55.000 pl/ha, utilizando el híbrido SYN 126 Viptera 3 de NK Semillas. Durante madurez fisiológica se cosecharon las espigas de tres líneas centrales de cada parcela, en una longitud de 5 m. Las mismas se trillaron en máquinas fijas para obtener el peso de granos de cada parcela y finalmente se estimó rendimiento en kg/ha corregido por humedad. La fecha de siembra fue 16/01/2024 y la fecha de cosecha el 06/08/2024. Previo a la siembra se realizó muestreo de suelos hasta 30 cm de profundidad. Cuando el cultivo de maíz presentó 6 hojas verdaderas (V6), se realizó otro muestreo para la determinación de nitratos de suelo. En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis de suelos realizado en laboratorio de Sección Suelos de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres en la provincia de Tucumán.

Tabla 2. Resultados de análisis de suelos del sitio donde se realizó el ensayo

<u>Profundidad (cm)</u>	<u>pH</u>	<u>Salinidad (dS/m)</u>	<u>CO₃ (%)</u>	<u>Textura</u>	<u>Materia orgánica (%)</u>	<u>P Bray I (ppm)</u>	<u>N-NO₃ (ppm)</u>
0-30 cm	6,5	0,4	-	Franco	1,7	15,4	18,7

Con los contenidos de N-NO₃ (ppm) de suelos en V6 del maíz junto a las dosis de N aplicadas con ambas fuentes se estimó la cantidad disponible de N para el cultivo (N suelo + N fertilizante), que junto a los rendimientos de cada tratamiento permitió estimar la eficiencia de uso de N (kg grano/kg de N disponible de suelo) para ambas fuentes utilizadas en el ensayo.

Cabe destacar que durante la campaña, en la región NOA, se caracterizó por una fuerte presión de *Dalbulus maidis*, principal vector de *Spiroplasma* o achaparramiento del maíz. En esta localidad se observó un aumento poblacional de la plaga, como también un aumento en el porcentaje de infectividad de la misma a partir de Noviembre de 2023, lo que motivó rendimientos del cultivo más bajos de lo normal. Con los datos de rendimientos obtenidos en el ensayo y los distintos precios, tanto del maíz como de los fertilizantes utilizados, se realizó un análisis económico con el fin de conocer la rentabilidad de la práctica de fertilización ante la situación mencionada.

>. RESULTADOS

A pesar de las limitaciones que caracterizaron a la campaña, el cultivo de maíz respondió a la fertilización nitrogenada. Los rendimientos de granos obtenidos en cada uno de los tratamientos evaluados se pueden observar en la figura 1.

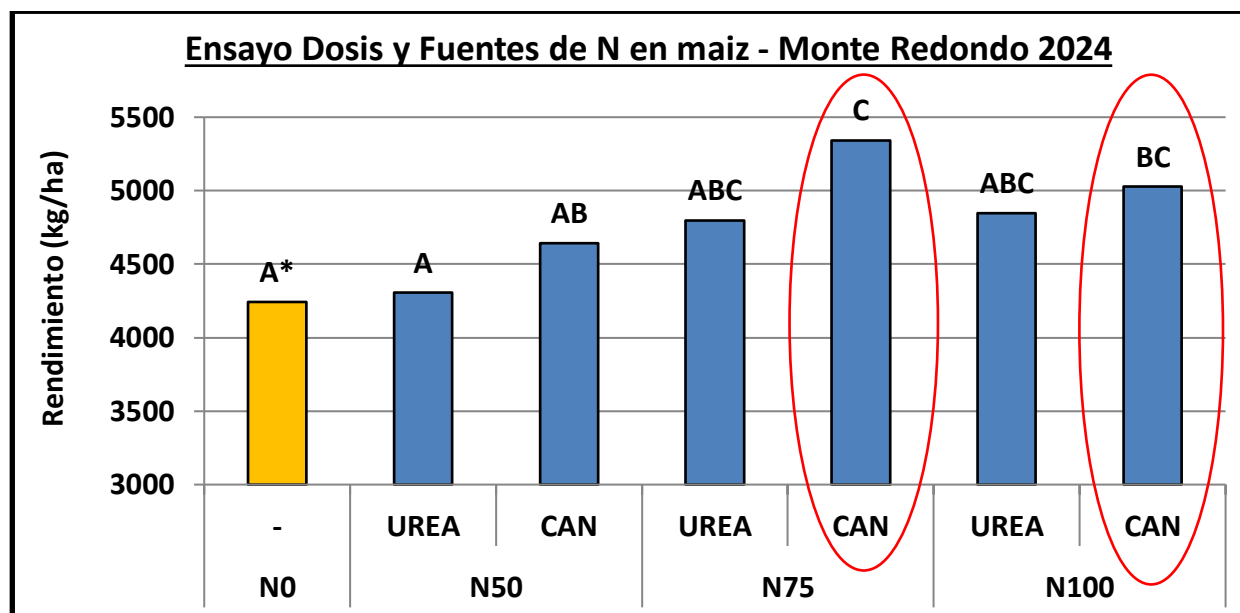


Figura 1. Rendimiento maíz (kg/ha) de cada tratamiento evaluado durante la campaña 2024. San Agustín, Cruz Alta, Tucumán – Argentina.

**Letras distintas indican diferencias significativas con test LSD Fisher, con una probabilidad de error del 10% ($P > 0,10$)*

Como se observa en la figura anterior, sólo cuando la fuente fue CAN con las dos dosis más altas, los tratamientos se diferenciaron estadísticamente del testigo sin fertilizar. Por otro lado, comparando una misma dosis de N, el rendimiento del maíz fue ligeramente mayor a favor de CAN, respecto a la Urea como fuente nitrogenada, aunque sin diferencias significativas entre ambos. En el cuadro 1 se observan las diferencias de rendimientos a igual dosis de N utilizando ambas fuentes nitrogenadas.

Cuadro 1. Diferencia de rendimiento en maíz a favor de CAN comparado con Urea según dosis utilizada durante la campaña 2024. San Agustín, Cruz Alta, Tucumán – Argentina.

DOSIS N (KG/HA)	RDTO MAIZ (KG/HA)		
	con UREA	con CAN	DIF a favor de CAN
N50	4305	4644	339
N75	4798	5341	543
N100	4849	5026	177
RDTO MEDIO	4651	5004	353

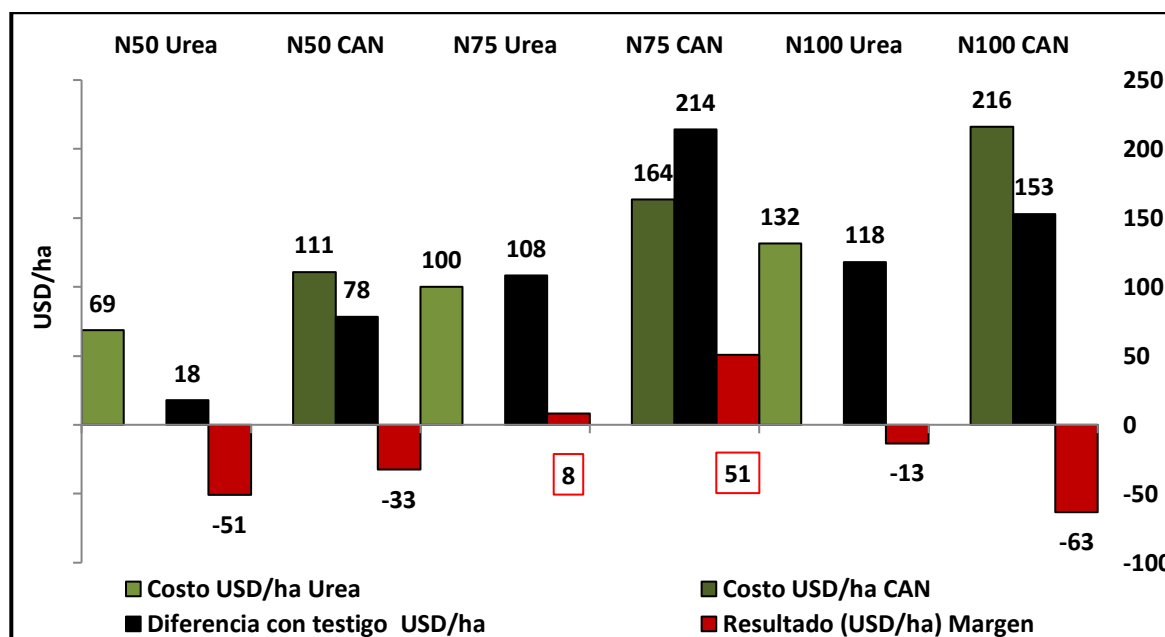
Cuando se aplicó la menor dosis de N (N50), la diferencia de rendimiento por parte del cultivo a favor de la aplicación con CAN fue de 339 kg/ha, con dosis de 75 kg/ha dicha diferencia fue de 543 kg/ha, y finalmente, cuando se utilizó la dosis más alta en el ensayo (N100) la diferencia a favor de CAN fue de 177 kg/ha. Sin embargo, dichas diferencias en el rendimiento del cultivo no fueron significativas desde el punto de vista estadístico al comparar ambas fuentes de una misma dosis de N. Se puede decir que en promedio el aumento en el rendimiento del cultivo cuando se aplicó CAN, comparado con la Urea, fue de 353 kg/ha a favor del primero para todas las dosis ensayadas.

Cuadro 2. Eficiencia de uso de N (kg de grano/kg de N) utilizando ambas fuentes nitrogenadas durante la campaña 2024. San Agustín, Cruz Alta, Tucumán – Argentina.

<u>N suelo (kg/h a)</u>	<u>N fertilizante (kg/ha)</u>	<u>N disponible (N suelo + N fert)</u>	<u>Con Urea (46% de N)</u>		<u>Con CAN (27% de N)</u>	
			<u>Rdto Maíz (kg/ha)</u>	<u>EUN (kg grano/kg N)</u>	<u>Rdto Maíz (kg/ha)</u>	<u>EUN (kg/grano/kg N)</u>
105	50	155	4305	27,8	4644	30,0
105	75	180	4798	26,7	5341	29,7
105	100	205	4849	23,7	5026	24,5
			<u>EUN media Urea</u>	<u>26,0</u>	<u>EUN media CAN</u>	<u>28,1</u>

Con Urea el valor promedio de la eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) según dosis utilizadas, fue de 26 kg de grano de maíz por cada kg de N disponible (N fertilizante + N suelo), mientras que con CAN la EUN fue de 28,1 kg de grano por cada kg de N disponible. Lo que significa una eficiencia del 8% más a favor de CAN respecto de la Urea.

Figura 1. Costo de fertilizantes, diferencia de rendimiento con TA y rentabilidad de cada tratamiento durante la campaña 2024. San Agustín, Cruz Alta, Tucumán – Argentina.



Con precios actualizados de maíz, Urea, CAN y costo de fertilización (a marzo de 2025) se realizó un análisis económico para conocer cuál de los tratamientos evaluados arrojó una rentabilidad económica a pesar de los bajos rendimientos obtenidos durante el ensayo. Los precios utilizados durante el análisis fueron: maíz 198 U\$/tn, Urea 580 U\$/tn, CAN 569 U\$/tn y costo de fertilización 5,50 U\$/ha. Con estos valores se pudo observar que los únicos tratamientos que tuvieron una rentabilidad económica fue cuando se aplicó 75 kg/ha de N, utilizando ambas fuentes. Con Urea la rentabilidad fue de 8 U\$/ha, mientras que con CAN fue de 51 U\$/ha.

>. CONCLUSIONES

- A pesar de las limitaciones que caracterizaron a la campaña se observó respuesta por parte del cultivo al agregado de fertilizantes nitrogenados.
- Solo las dosis de 75 y 100 kg/ha de N utilizando CAN como fuente, fueron los únicos tratamientos que se diferenciaron estadísticamente del testigo absoluto sin fertilizar (TA).
- A igual dosis de N, el maíz rindió más cuando se utilizó CAN como fuente comparado con la Urea. En promedio esa diferencia de rendimiento de maíz a favor del primero fue de 353 kg/ha.
- La EUN (kg grano/kg N disponible) fue mayor cuando se aplicó CAN como fuente nitrogenada, respecto de la Urea. Esa diferencia fue de un 8% aproximadamente.
- Al realizar el análisis económico con precios actualizados a marzo de 2025, los únicos tratamientos que dieron una rentabilidad fue la dosis de 75 kg/ha utilizado ambas fuentes nitrogenadas. Siendo la rentabilidad de la Urea de 8 U\$/ha, mientras que para CAN la rentabilidad fue de 51 U\$/ha.

Beneficios y desafíos agronómicos del uso de purines porcinos estabilizados en lagunas anaeróbicas (Córdoba, Argentina)

► ► Pegoraro, V.^{1*}, Sosa N¹, Mathier D¹, Bragachini M¹,
Vélez G¹, Lorenzon C¹, Conde MB¹, Mazzini P¹, Miralles S², Crema N²,
Poliotti V², Gonzales E², Rocha L², Cuello P², Inga M², Avendaño M², Merino B²,
Del Bo C², Gómez S², Chagra Y², Pacharoni F², Ferrari J⁴, Castro P⁴, Lenarduzzi
V⁴, López E⁴, Archilla MV³, Merlo C³ & Vázquez C³

¹INTA, Argentina; ²CEPROCOR, Argentina; ³UNC, FCA, Argentina; ⁴Secretaría de Ambiente,
Córdoba, Argentina; ⁵Secretaría de Ganadería, Córdoba, Argentina;

✉ pegoraro.vanesa@inta.gob.ar

Los efluentes ganaderos se utilizan a nivel mundial como fertilizantes en suelos agrícolas. Sin embargo, en Argentina esta práctica es relativamente reciente. La provincia de Córdoba fue la primera en regular el uso agronómico de los residuos pecuarios mediante la Resolución N°29/2017 “Gestión y Aplicación Agronómica de Residuos Pecuarios.” En línea con esta iniciativa, MINCyT financió el Proyecto “IMPACTAR N° 119,” que evaluó los efectos de la aplicación de efluente porcino estabilizado en lagunas anaeróbicas sobre las propiedades del suelo. En 14 granjas porcinas ubicadas en Córdoba, se recolectaron muestras de efluente crudo y estabilizados en lagunas anaeróbicas para determinar variables físicas, químicas y microbiológicas. Además, se recogieron muestras de suelo con y sin aplicación de efluente a diferentes profundidades. Se determinaron indicadores microbiológicos patógenos en la profundidad de 0-10 cm, mientras que indicadores químicos en las profundidades de 0-20 y 20-60 cm. Los análisis de datos se realizaron utilizando el software estadístico Infostat Professional. Las lagunas anaeróbicas redujeron los sólidos totales, volátiles y la DQO, y en menor medida, N y P. En contraste, los niveles de Na, K, Cu, pH y alcalinidad aumentaron significativamente ($p < 0.05$). En cuanto a los microorganismos, se observaron reducciones en coliformes termotolerantes (31%), E. coli (29%), Salmonella spp. (58%) y estreptococos fecales (24%). Al evaluar la calidad de los suelos agrícolas con aplicación de efluente porcino, se detectaron aumentos en N orgánico, N mineral, P extraíble, K, Zn y Cu, nutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, se observó un incremento en la CE y Na, lo que podría atribuirse al contenido salino en la dieta de los cerdos y/o a la presencia de sales en el agua subterránea utilizada para lavar las instalaciones de confinamiento. En relación con los parámetros microbiológicos, no se detectaron Escherichia coli ni Salmonella spp. No obstante, se observó un aumento del 27 y 37% en coliformes totales y estreptococos fecales, respectivamente, en suelos con aplicación de efluente porcino en comparación con los suelos de control. El efluente pecuario es una valiosa fuente de materia inorgánica y orgánica como nutrientes para los suelos agrícolas. Sin embargo, también puede contener microorganismos patógenos para humanos y/o animales y acumular metales potencialmente tóxicos. Por ello, es crucial estabilizarlo antes de su uso y gestionarlo adecuadamente para minimizar los impactos en la cadena alimentaria y el ambiente.

Identificación y manejo de nutrientes limitantes en el cultivo de alfalfa en Entre Ríos

► ► Pautasso JM^{12*}, Barbagelata PA² & Giacinti SA³

¹INTA; ²FCA UNER; ³Asesor privado

✉ juan@inta.gob.ar

>. INTRODUCCIÓN

La alfalfa es el cultivo forrajero más importante a nivel mundial, compatibilizando altas producciones y valor nutricional. En Argentina los cultivos forrajeros perennes ocupan alrededor de 3,8 millones de hectáreas, proporcionalmente el 12% de la superficie total cultivada (INDEC, 2018). En este contexto, la especie forrajera perenne más importante del país es la alfalfa, sembrada en 3 millones de hectáreas.

En otras regiones del mundo la fertilización de cultivos forrajeros es una práctica habitual y a pesar de ser una herramienta probada y eficaz para incrementar la producción primaria también en la Argentina, su uso en los establecimientos ganaderos locales es escaso (Marino 2023).

En nuestra provincia la baja disponibilidad de fósforo (P) es una de las limitantes principales para poder maximizar la producción de pasturas (Quintero, 2000; García et al., 2002), pero como consecuencia de una agricultura tradicionalmente extractiva, las brechas de rendimiento pueden también explicarse por la deficiencia de otros nutrientes. Pasturas creciendo con deficiencias nutricionales, además de producir menos forraje que pasturas bien fertilizadas, generan una menor reserva en el carbono orgánico del suelo, limitando la capacidad productiva del sistema (Chan et al.; 2010).

Una alternativa para cerrar brechas de rendimiento de los cultivos consiste en la mejora conjunta del sistema de producción, y no sólo del ajuste de prácticas individuales en cada cultivo (Guilpart et al., 2017). Los sistemas ganaderos poseen características propias, diferentes a los sistemas netamente agrícolas, como el mayor reciclaje de nutrientes (especialmente en sistemas pastoriles) y alta proporción de forrajeras leguminosas, con aporte significativo de nitrógeno al sistema, entre otras (Rubio et al.; 2012). Por lo tanto, cultivos forrajeros bien nutridos y correctamente utilizados generan una mejora en el sistema que puede ser aprovechada durante la rotación con cultivos de granos (Li et al., 2023; Yost et al., 2014; Yost et al., 2012).

El objetivo de este trabajo es realizar una síntesis de diferentes ensayos de fertilización realizados en el cultivo de alfalfa que aporten información para un manejo eficiente de la nutrición del cultivo.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron 19 ensayos de fertilización en alfalfa en establecimientos ganaderos situados en el Centro Oeste de la provincia de Entre Ríos y se analizaron en tres grupos, de acuerdo con el/los nutrientes estudiados. Al momento de la implantación se tomaron muestras de suelo de los primeros 20 cm.

Todos los ensayos tuvieron un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones y las unidades experimentales fueron de 2 por 5 metros. Los muestreos se realizaron antes del aprovechamiento que hacía el productor, cortando material con un aro de cuarto metro cuadrado en el centro de cada parcela. Las muestras se pesaron en verde y se estimó el porcentaje de materia seca con muestras secadas en estufa a 60° durante 48 horas. Algunos de estos ensayos continúan bajo evaluación en la actualidad.

Grupo 1: Nutrición nitrogenada (estimación de la respuesta a la inoculación con bacterias simbiótica).

En el año 2024 se instalaron dos ensayos para estimar el impacto de la inoculación con bacterias *Esinifer meliloti* (sinónimo de *Sinorhizobium meliloti*). Ambos sitios no tuvieron alfalfa implantada en, al menos, los últimos 10 años. Los lotes donde se hicieron los ensayos se ubicaron en el Departamento Diamante, sobre suelos Argiudoles ácuicos. Los tratamientos evaluados fueron dos, con y sin inoculante. Uno de los lotes se instaló en un lote con larga historia agrícola (P Bray 5,9 ppm y MO 2,5%); el otro ensayo se instaló sobre un lote sin historia agrícola, donde anteriormente se concentraba la hacienda (P Bray 395 ppm y MO 7,2%).

Grupo 2: Nutrición fostatada (estimación de la respuesta al agregado de P).

Doce ensayos se instalaron en lotes comerciales con diferentes disponibilidades de P Bray en suelo. Se implantó un ensayo en 2013, dos en 2015, uno en 2016, uno en 2017, dos en 2018 y uno en 2021. Además, se agrega a este set de datos los tratamientos testigos y con agregado de P de los ensayos del grupo 3.

Estos ensayos se ubicaron en los departamentos Diamante y Paraná, sobre suelos Peludertes argiudólicos, Argiudoles ácuicos y vérticos. Los tratamientos evaluados fueron dos, con y sin agregado de 20 kg de P por hectárea, aplicados al momento de la siembra y en cobertura total.

Grupo 3: Nutrición con otros nutrientes (estimación de la respuesta al agregado de azufre, potasio y zinc).

Se instalaron cinco ensayos desde el 2021 (1 ensayo), 2022 (1 ensayo) y 2023 (3 ensayos) en los departamentos Paraná y Diamante sobre suelos Peludertes argiudólicos, Argiudoles ácuicos y vérticos. Los ensayos instalados en el 2022 y 2023 aún se están evaluando.

Los tratamientos evaluados fueron: 1) testigo absoluto; 2) 20 kg de P por hectárea; 3) tratamiento 2 más 10 kg de S por hectárea agregado anualmente; 4) tratamiento 3 más 50 kg de K por hectárea y 5) tratamiento 4 más 1 kg de Zn por hectárea.

Todos los nutrientes se agregaron a la siembra, en cobertura total y por única vez (excepto el S que se repone cada año a razón de 10 kg por hectárea).

>. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS:

Se realizaron regresiones lineales, ANOVA y test LSD Fisher de comparación de medias; las respuestas se evaluaron estadísticamente utilizando el método de inferencia de la media de una muestra, considerando un nivel de significancia de 0,05. Se utilizó el paquete estadístico InfoStat (Di Renzo y col., 2020).

Para el cálculo de los umbrales de respuesta al agregado de P se obtuvieron los coeficientes del modelo lineal-plateau a través de algoritmos apropiados, logrando su resolución mediante la subrutina Solver del programa Microsoft® Excel 2007.

Para el cálculo de los umbrales de P Bray se usó la metodología propuesta por Dyson y Conyers (2013) modificada por Correndo et al. (2017), denominado método del arcoseno-logaritmo (ALCC), que considera variables aleatorias tanto al rendimiento relativo (RR, %) como al valor del análisis de suelo (P Bray). El RR se calculó como el cociente porcentual entre la producción total de materia seca del tratamiento sin fertilizar y el rendimiento máximo medio observado (producción total acumulada en los años evaluados).

>. RESULTADOS

Grupo 1 - Nutrición nitrogenada (impacto del agregado de inoculantes a base de *Esinfer meliloti*)

La inoculación produjo un incremento del rendimiento de alrededor del 8% (Figura 1). En la figura 1 se presentan todas las mediciones de MS, correspondientes a 6 cortes en ambos ensayos, por los tres bloques (36 pares de datos). La regresión mostró una pendiente significativamente distinta de cero ($p < 0,01$).

En promedio la respuesta fue distinta de 0 y el incremento fue de 277 kg de MS por corte y por hectárea (con un intervalo de confianza del 95%, esta media se ubica entre 75 y 478 kg de MS por hectárea).

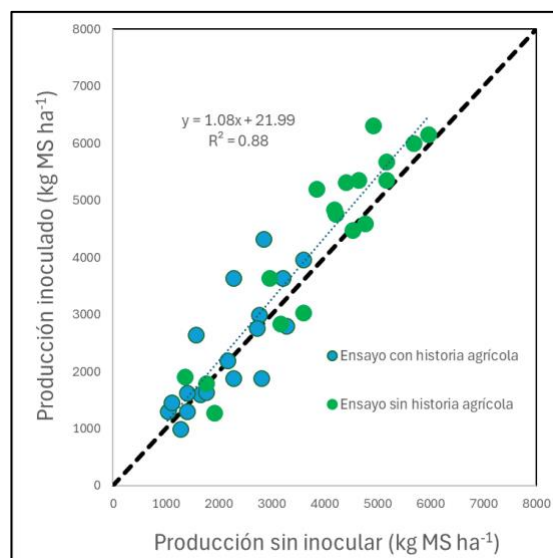


Figura 1: Producción por corte del cultivo de alfalfa inoculado en función del testigo sin inocular.

Este resultado evidencia las ventajas de la inoculación del cultivo, siendo esta una práctica eficiente para proveer al cultivo del nitrógeno que demanda. Además, la bibliografía informa que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en alfalfa rara vez es beneficiosa o rentable (Clark, 2023; Meyer et al., 2007).

Grupo 2- Nutrición fosfatada (impacto del agregado de P)

Tanto el umbral de P Bray determinado (Figura 2), como el intervalo de confianza del mismo, confirman los valores obtenidos en trabajos publicados recientemente (Marino y Echeverría, 2018; Pautasso y Barbagelata, 2017). La respuesta promedio de todos los ensayos, considerando la producción total, fue de 3492 kg de MS, con valores máximos de alrededor de 7735 kg de MS por hectárea, en los ensayos con valores de P Bray por debajo de 10 ppm (Figura 3), lo que representa un incremento del 49% con respecto al testigo sin fertilizar.

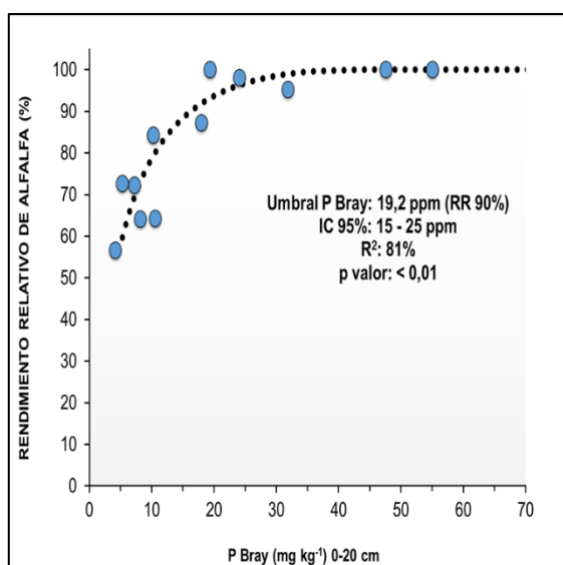


Figura 2: Relación entre el nivel de P Bray en el suelo y el rendimiento relativo (RR) de pasturas de alfalfa.

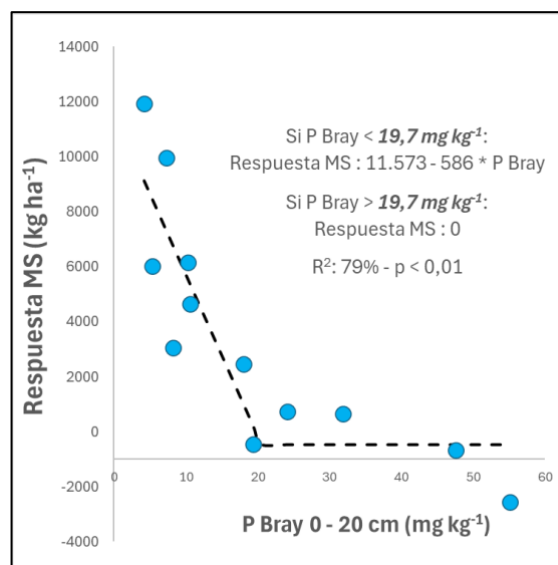


Figura 3: Respuesta al agregado de P en función del P Bray en el suelo.

Grupo 3 - Otros Nutrientes (impacto del agregado de S, K y Zn)

Los cinco ensayos realizados se instalaron sobre sitios donde la disponibilidad de P Bray fue alta. En la Figura 4 se muestran las producciones anuales promedio de todos los sitios, ya que no se halló interacción tratamiento por sitio (Tabla 1). La producción se incrementó en un 14% debido al agregado de azufre. No se encontró respuesta al agregado de K y Zn.

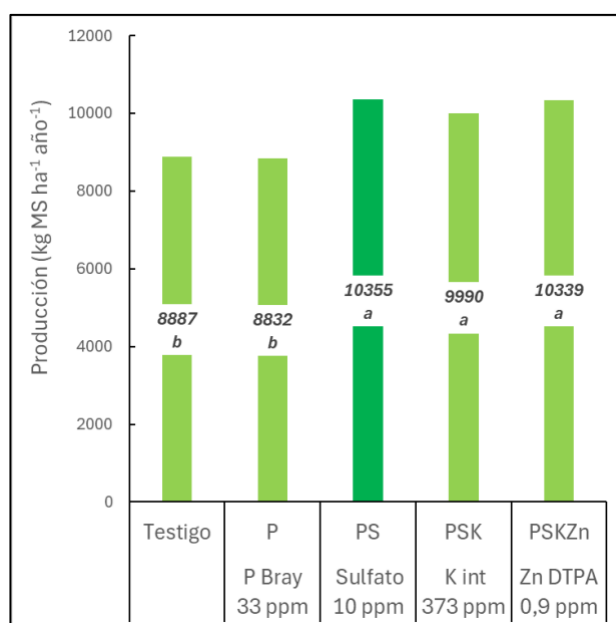


Figura 4: Producción anual de MS de alfalfa por hectárea en función de los tratamientos. Se muestran los valores promedio de análisis de suelos de los 5 sitios.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). Test LSD Fisher.

Tabla 1: Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) de los tratamientos.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo	1245964122	34	36646004	6.91	<0.0001	
Tratamiento	70058866	4	17514716	3.3	0.01	
Sitio>Bloque	65878062	10	6587806	1.24	0.273	
Sitio	1081607331	4	270401833	41.05	<0.0001	(Sitio>Bloque)
Tratamiento*Sitio	28419863	16	1776241	0.33	0.99	
Error	610322618	115	5307153			
Total	1856286740	149				

>. CONCLUSIONES

Mediante un buen manejo de la nutrición de la alfalfa en Entre Ríos, se pueden lograr producciones anuales de al menos 10.000 kg de MS por hectárea.

Los nutrientes con mayor impacto en la producción de alfalfa en el centro oeste de Entre Ríos son el P y el S. El N se debe manejar a partir de una buena práctica de inoculación de la semilla.

En el caso del P, tanto la probabilidad de respuesta, así como su magnitud son altos cuando se agrega P de fertilizantes en sitios con niveles de P Bray por debajo del umbral determinado de 19 ppm. En el caso del S, el mismo se puede manejar con aplicaciones anuales de este nutriente a razón de 10 kg de S por hectárea, logrando un incremento promedio de la producción del 14%.

>. BIBLIOGRAFÍA

Chan KY, Oates A., Li GD, Conyers MK, Prangnell RJ, Poile G., Liu DL, Barchia IM. 2010. Soil carbon stocks under different pastures and pasture management in the higher rainfall areas of south-eastern Australia. Australian Journal of Soil Research 48, 7-15. <https://doi.org/10.1071/SR09092>

Clark J. 2023. Fertilizer Recommendation Guide. Department of Agronomy, Horticulture & Plant Science. College of Agriculture, Food & Environmental Sciences. South Dakota State.

Correndo, A.A., F. Salvagiotti, y F.O. García, y F.H. Gutiérrez-Boem. 2017. A modification of the arcsine-log calibration curve for analyzing soil test value–relative yield relationships. Crop & Pasture Science 68 (3): 297-304, doi:10.1071/CP16444.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Dyson, C.B., y M.K. Conyers. 2013. Methodology for online biometric analysis of soil test-crop response datasets. Crop & Pasture Science 64, 435-441.

Guilpart N., P. Grassini, V. Sadras, J. Timsina, K. Cassman. 2017. Estimating yield gaps at the cropping system level. Field Crops Research, Volume 206, 2017, Pages 21-32, ISSN 0378-4290. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.02.008>

INDEC, 2018. Censo Nacional Agropecuario 2018. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87> (Verificación abril 2025).

Li, A., Y. Wu, X. Tai, S. Cao & T. Gao. 2023. Effects of Alfalfa Crop Rotation on Soil Nutrients and Loss of Soil and Nutrients in Semi-Arid Regions. *Sustainability*, 15(20), 15164. <https://doi.org/10.3390/su152015164>

Marino, M. A. y Echeverría, H. E. 2018. Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa* L.) en argiudoles. *Agriscientia* [online]. 2018, vol.35, n.1, pp.11-24. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-298X2018000100002&script=sci_arttext

Marino, MA. 2023. Nutrición eficiente de pasturas para una producción ganadera sustentable. *Actas del Simposio Fertilizar 2023*. Pg. 96-103.

Meyer R., D. Marcum; S. Orloff and J. Schmierer. 2007. Alfalfa Fertilization Strategies. UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Division of Agriculture and Natural Resources. Publication 8292.

Pautasso, J. M. y Barbagelata, P. A. 2017. Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 26, 13-16.

Quintero C. 2000. Estado de fertilidad de los suelos de Entre Ríos. Principales Limitaciones. En: *Revista Facultad de Agronomía. UBA*, 20: 15-19.

Rubio G., F. Micucci y F. García. 2013. Capítulo 14: Ciclado de nutrientes y fertilización de pasturas. En *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. ISBN 978-987-27793-7-5. Páginas 263-292.

Yost, M., M. Russelle & J. Coulter. 2014. Field-Specific Fertilizer Nitrogen Requirements for First-Year Corn following Alfalfa. *Agronomy Journal*. 106. 645. 10.2134/agronj2013.0416. DOI:10.2134/agronj2013.0416

Yost, M.A., J. Coulter, M. Russelle, C. Sheaffer and D. Kaiser. 2012. Alfalfa Nitrogen Credit to First-Year Corn: Potassium, Regrowth, and Tillage Timing Effects. *Agronomy Journal*, 104: 953-962. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0384>

Evaluación física y económica de la fertilización con fósforo en experimentos de largo plazo

► ► **Pagani A.^{1*}, Gutiérrez Boem F.H.² & Estelrich C.³**

¹ Clarion, ²FAUBA, ³AER INTA Bolívar

✉ apagani@precisionclarion.com

>. INTRODUCCIÓN

El manejo deficiente del fósforo (P) ha sido un problema de gran impacto en los sistemas agrícola-ganaderos pampeanos, afectando en forma conjunta su productividad, rentabilidad y sostenibilidad. Si bien el consumo de fertilizantes en Argentina se ha incrementado en los últimos años en sincronía con el aumento de la producción, la reposición de P sigue siendo inferior a la exportación con los granos (García y González Sanjuán, 2013). Esto ha generado un deterioro significativo en los niveles de este nutriente en casi toda la región pampeana (Sainz Rozas et al., 2019), lo cual tiene implicancias económicas de corto plazo, restringiendo los niveles de productividad de los cultivos, pero también de largo plazo, comprometiendo el valor de la tierra y la sustentabilidad de los sistemas de producción.

En los Molisoles de la región pampeana se ha generado información sobre la respuesta a la fertilización fosforada en cultivos de trigo, soja y maíz (Correndo, 2018) y sobre cómo los balances de P de las rotaciones agrícolas pueden disminuir, mantener o aumentar los niveles de P disponible en el suelo (Rubio et al., 2008; Sucunza et al., 2018; Appelhans, 2020). Sin embargo, son muy escasos los estudios de más de una campaña con dosis crecientes de P, ya que la mayoría han comparado el tratamiento fertilizado versus el testigo sin aplicación de P (Correndo et al., 2018). Los experimentos de larga duración contribuyen a generar información muy valiosa, ya que contemplan los efectos acumulados sobre la productividad de los cultivos y la fertilidad del suelo. Debido a su alto costo y laboriosidad, generalmente, este tipo de estudios de mediano o largo plazo no se realizan con niveles crecientes de fertilización que posibiliten ajustar modelos continuos para optimizar la conveniencia económica de la fertilización. Asimismo, son poco frecuentes los estudios donde el balance anual de P se realice determinando la concentración de P en el grano todos los años y en todas las unidades experimentales. Estos balances de P y su efecto sobre la disponibilidad en suelo permiten estimar las dosis anualmente necesarias para no restringir la productividad de los cultivos ni deteriorar la fertilidad del suelo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta física y económica de trigo, maíz y soja, la concentración de P en grano y el balance de P en función dosis crecientes de P aplicadas anualmente y ii) evaluar la relación entre el P disponible en el suelo en relación al balance acumulado para un Hapludol Típico del centro oeste bonaerense.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

En el año 2017 en la Chacra Experimental Bellocq (35°55'49"S; 61°29'17"O), Partido de Carlos Casares, provincia de Buenos Aires, se establecieron tres experimentos de fertilización fosforada en forma simultánea, uno con trigo como cultivo inicial de la rotación (Ensayo 1), uno con maíz (Ensayo 2) y otro con soja (Ensayo 3). Los experimentos fueron llevados a cabo durante cinco campañas (2017-22), bajo siembra directa y con una rotación de trigo/soja de segunda, maíz, soja de primera (cuatro cultivos cada tres años). Los tratamientos fueron cinco dosis de P: 0, 10, 20, 30 y 40 kg ha⁻¹, aplicadas en forma anual al voleo previo a la siembra del trigo, maíz y soja de primera, utilizando la fuente súper fosfato triple (0-46-0). No se utilizó arrancador que contenga P junto a la semilla en ningún caso, siendo el tratamiento aplicado al voleo la única fuente de P que recibieron las parcelas. Los ensayos fueron conducidos en parcelas de 35 m², con cuatro repeticiones y un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA). El tipo de suelo fue un Hapludol Típico de la serie Bellocq franco arenoso (11 % arcilla, 29 % limo, 60 % arena). Las prácticas de manejo como fechas de siembra, elección del cultivar, fertilización con otros nutrientes, control de malezas, plagas y enfermedades fueron las recomendadas para la zona.

Previo a la aplicación de los tratamientos, se realizó un muestreo de suelo inicial (0-20 cm) para determinar el nivel de P disponible (P-Bray1, Bray y Kurtz, 1945) y otras variables edáficas (Tabla 1). La cosecha se realizó en forma manual y la trilla con trilladora estacionaria, expresando el rendimiento a la humedad de recibo de cada grano. Cada año, una vez finalizado el ciclo de los cultivos, se realizó un muestreo de suelo (0-20 cm) y análisis de P-Bray1 y se tomaron muestras de grano de cada parcela para determinar la concentración de P total (Miller, 1998).

Se calcularon retornos netos a la fertilización fosforada utilizando precios de fertilizante y granos promedio de los últimos 15 años (Márgenes Agropecuarios, 2025) de 189, 157, 295, 597 US\$ ha⁻¹ para trigo, maíz, soja y súper fosfato triple, respectivamente. Se calcularon rendimientos relativos para cada cultivo y año definidos como el cociente entre el rendimiento de los cultivos en cada parcela y el rendimiento promedio de las parcelas que recibieron la máxima dosis de P (40 kg ha⁻¹).

En las parcelas fertilizadas se calculó un índice de disponibilidad de P en el suelo sumando a la disponibilidad determinada mediante el análisis de suelo (P-Bray1), la dosis de P aplicada en cada parcela dividida por la inversa de la pendiente de la relación entre el P-Bray1 y el balance positivo acumulado de P (Fig. 4).

Tabla 1. Propiedades edáficas iniciales de los tres experimentos de fertilización fosforada iniciados en 2017. MO: materia orgánica; P-Bray1: fósforo disponible; EC: conductividad eléctrica.

Ensayo	Cultivo Inicial	MO* %	P-Bray1 mg kg ⁻¹	EC** uS cm ⁻¹	pH
1	Trigo	2.8	9.5	54	6.1
2	Maíz	2.8	7.0	62	6.2
3	Soja	2.6	9.8	58	6.2

*MO, Materia orgánica

**EC, Conductividad eléctrica

Se ajustaron modelos de regresión lineales o cuadráticos (dependiendo del caso) para explicar la relación entre: a) el rendimiento del cultivo, b) el retorno neto a la fertilización (ingreso menos costo de fertilizante fosforado) y c) el balance de P (kg de P aplicados menos kg de P exportados con los granos) en función de la dosis de P aplicada. Adicionalmente, se relacionó el P disponible en suelo con el balance de

P acumulado durante los cinco años para determinar la pendiente de esta relación y poder calcular cuántos kg de P de balance positivo son necesarios para elevar 1 mg kg^{-1} de P en el suelo, de manera similar a lo propuesto por Sucunza et al. (2018). Finalmente, se relacionó el rendimiento relativo y la concentración de P en grano de cada parcela y cultivo con el índice de disponibilidad de P en suelo propuesto para este trabajo.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosforada era esperada en los tres ensayos, considerando el bajo nivel inicial de P disponible en el suelo (Tabla 1) de acuerdo con trabajos previos en Molisoles de la Región Pampeana (Correndo, 2018). Sin embargo, la respuesta a P varió marcadamente dependiendo del cultivo, el año y el nivel de rendimiento (Fig. 1). Para el trigo, la fertilización aumentó significativamente ($p < 0.01$) el rendimiento en todas las campañas, excepto en la primera (2017-18), presumiblemente debido al bajo nivel de rendimiento alcanzado ($< 3 \text{ Mg ha}^{-1}$) a causa de un control deficiente de enfermedades durante las etapas reproductivas (datos no mostrados). Para este cultivo, se observó una respuesta a P con un notable componente lineal en las campañas 2018-19 y 2019-20 (con rendimientos máximos entre 4 y 6 Mg ha^{-1}) y una respuesta de tipo cuadrática en las campañas 2020-21 y 2021-22, con rendimientos máximos $> 6.5 \text{ Mg ha}^{-1}$, alcanzados entre 20 y 30 kg P ha^{-1} . No se observó respuesta significativa del maíz al P durante las dos primeras campañas (2017-18 y 2018-19), resultado que no era esperado considerando el bajo nivel inicial de P en el suelo y los niveles de rendimiento relativamente obtenidos (especialmente durante la segunda campaña). Para este cultivo se observó una respuesta de tipo cuadrática en las últimas tres campañas con un notable decaimiento por encima de 20 kg P ha^{-1} para la campaña 2021-22 y una claro plateau en 2019-20 y 2020-21. Estos resultados difieren de los reportados por Tellería et al. (2016) quienes observaron respuestas lineales a la fertilización fosforada en suelos similares a los de este trabajo, pero con niveles inferiores de P disponible en el suelo (P-Bray1 $< 7 \text{ mg kg}^{-1}$). La soja mostró la respuesta a la fertilización más alta y consistente ($p < 0.01$), independientemente del nivel de rendimiento (Fig. 1). Sorprendentemente, en la soja de primera se observó una respuesta lineal a la aplicación de P en todas las campañas excepto en 2021-22, donde una sequía severa y el estrés térmico limitaron la productividad del cultivo por debajo de 3.5 Mg ha^{-1} . Patel et al. (2024) también informaron que, durante años secos, los beneficios del rendimiento del cultivo de la fertilización con P podrían ser menos pronunciados debido a limitaciones de humedad. La respuesta relativamente alta de los cultivos a la fertilización con P en soja de segunda, independientemente de su menor potencial de rendimiento, puede explicarse parcialmente por la absorción de P del cultivo anterior (trigo) que evidentemente exacerbó la deficiencia de P. Este efecto del cultivo anterior se ha informado para varios recursos como agua y otros nutrientes. Un estudio previo en la misma zona informó respuestas a la fertilización fosforada de magnitud similares, de 43% en trigo, 26% en maíz, 49% en soja de primera y 26% en soja de segunda (Rillo et al., 2016).

La falta de respuesta con niveles bajos de P-Bray1 podría deberse a varias razones entre las que pueden mencionarse el aporte de P desde fracciones orgánicas del suelo, no contempladas por la extracción Bray-1 (Suñer et al., 2002; Ciampitti et al., 2011b; Wyngaard et al., 2013; Appelhans et al., 2016). En este sentido, la mineralización del P orgánico ha sido sugerida como más relevante en suelos con bajos contenidos de P extractable (Sharpley, 1985; Steward y Sharpley, 1987; Thien y Myers, 1992). En el Oeste de la provincia de Buenos Aires, con suelos más arenosos, se ha encontrado que el P orgánico representa entre el 29% y el 51% de la reserva total (Galantini et al., 1997).

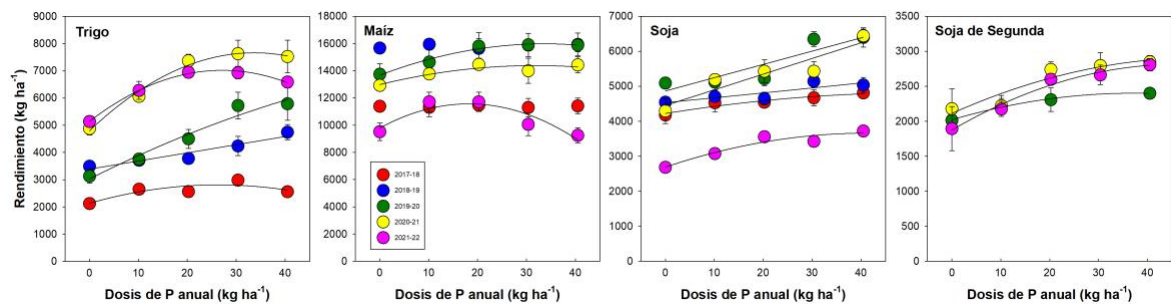


Figura 1. Rendimiento promedio de trigo, maíz, soja de primera y soja de segunda en función de la dosis de fósforo (P) anualmente aplicada durante las cinco campañas (2017-2022). Las líneas representan modelos de regresión lineal o cuadrático, dependiendo del caso y las barras verticales representan los errores estándar de la media. La soja de segunda no fue cosechada durante la primera y segunda campaña por una sequía extrema en el primer caso y por un error operativo en el segundo.

La rentabilidad de la fertilización fosforada fue muy alta y consistente para la secuencia trigo-soja de segunda (retornos máximos entre 380 y 500 US\$ ha⁻¹) y menor y más variable para maíz y soja de primera (retornos máximos entre -150 y 200 y entre 0 y 300 US\$ ha⁻¹, respectivamente, Fig. 2). Es importante destacar que el doble cultivo se beneficia de mayor manera de la fertilización fosforada por contener dos cultivos que se favorecen de una única fertilización anual. Similares niveles de beneficio económico de la fertilización con P en estos cultivos fueron informados por numerosos trabajos realizados en esta y otras zonas de la región pampeana.

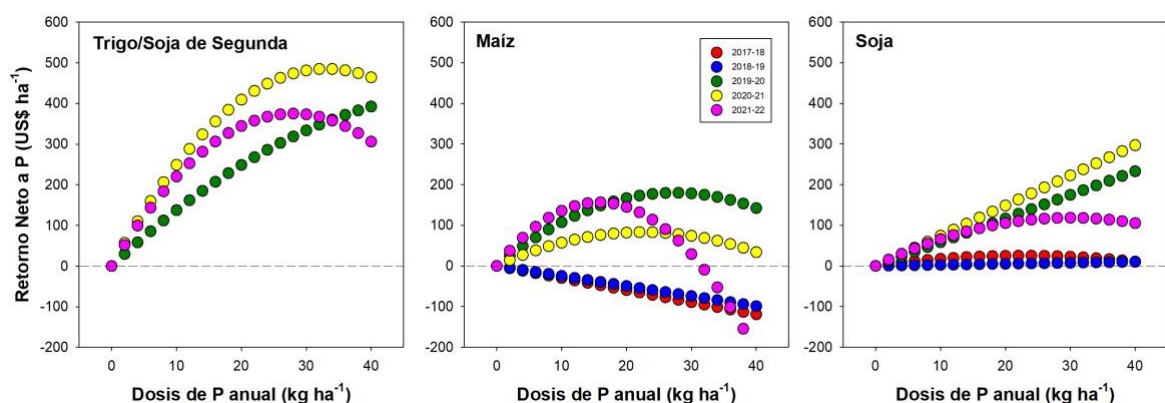


Figura 2. Retorno neto a la fertilización para trigo/soja de segunda, maíz y soja de en función de la dosis de fósforo (P) anualmente aplicada durante las cinco campañas (2017-2022). Resultados calculados a partir de las ecuaciones de la regresión lineal ajustadas a los rendimientos promedio de cada dosis de P. La soja de segunda no fue cosechada durante las dos primeras campañas por lo que el análisis económico no fue realizado para la secuencia trigo/soja de segunda en 2017-18 y 2018-19.

El balance de P aumentó linealmente ($p < 0.01$) de valores negativos a positivos a medida que aumentó la dosis de P anual en todos los cultivos y campañas (Fig. 3), excepto en el trigo-soja de segunda en 2021-22, donde el aumento del balance de P fue exponencial ($p < 0.01$). El balance de P varió entre -20 y 10, entre -35 y 22 y entre -20 y 25 kg ha⁻¹ para el trigo/soja de segunda, el maíz y la soja de primera, respectivamente. La dosis de P requerida para generar un balance cero varió entre 27 y 34, entre 16 y 42 y entre 10 y 27 kg P ha⁻¹ para trigo/soja de segunda, maíz y soja de primera, respectivamente. Estos

resultados coinciden con los informados por Sucunza et al. (2018) y son de relevancia práctica para señalar a los productores el rango de dosis de fertilización fosforada necesaria para mantener los niveles de P en el suelo, considerando los niveles de producción promedio para una rotación típica de la zona.

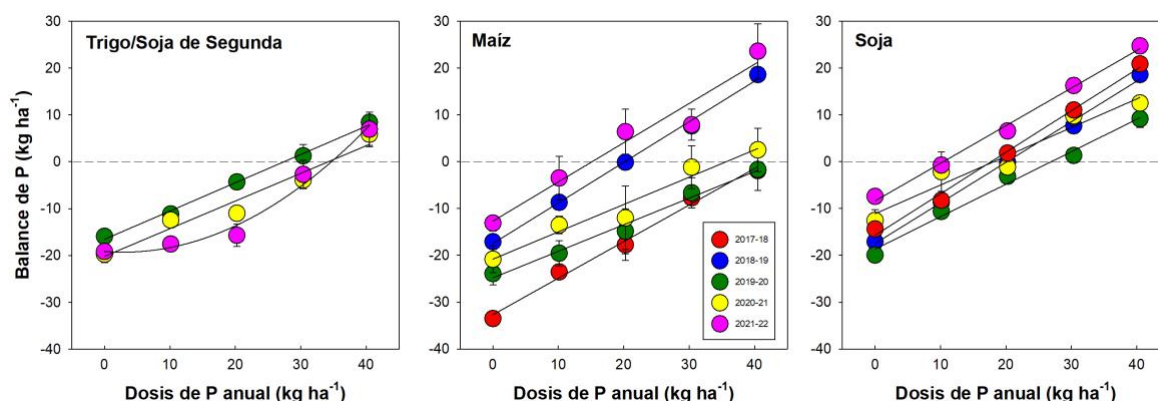


Figura 3. Balance de fósforo (P) en función de la dosis de P anualmente aplicada durante las cinco campañas (2017-2022) para trigo/soja de segunda, maíz y soja de primera. Las líneas representan modelos de regresión lineal o cuadrático, dependiendo del caso y las barras verticales representan los errores estándar de la media. La soja de segunda no fue cosechada durante las dos primeras campañas por lo que el cálculo del balance de P no fue realizado para la secuencia trigo/soja de segunda en 2017-18 y 2018-19.

Luego de los cinco años del estudio, la tasa de decrecimiento del P en el suelo fue descripta a través de una relación de decaimiento exponencial ($p < 0.01$) para balances acumulados negativos, es decir, cuando la tasa de exportación de P con los granos superó lo aportado mediante la fertilización (Fig. 4). Appelhans et al. (2020) también encontraron que esta relación podía ser descripta mediante una ecuación de decaimiento exponencial en parcelas que no habían recibido fertilización fosforada de 12 experimentos de largo plazo (7 a 17 años) en la Región Pampeana.

Cuando el nivel de P aportado mediante la fertilización superó la exportación por parte de los cultivos, se observó una relación lineal positiva entre el nivel de P disponible en el suelo y el balance acumulado de P ($p < 0.01$). A partir de dicha relación pudo establecerse que 3.3 kg P ha⁻¹ de balance positivo fueron necesarios para aumentar la disponibilidad de P-Bray1 en el suelo en 1 mg kg⁻¹. Estos resultados son similares a los observados por Sucunza et al. (2018) quienes trabajando en ensayos de larga duración en cinco sitios de Santa Fe y Córdoba informaron que este factor fue de 3.2 kg de P ha⁻¹. Por su parte, Ciampitti et al. (2011) obtuvieron valores de 2.5 a 3.3 kg P ha⁻¹ de balance acumulado de P por unidad de cambio en el P Bray-1 en suelos con P Bray-1 inicial de < 25 mg kg⁻¹. De igual manera, estudios internacionales (Blake et al., 2003; Selles et al., 1995) reportaron incrementos lineales en el P disponible en el suelo en respuesta a balances acumulados positivos. En nuestro trabajo, el rango de balance positivo acumulado fue relativamente pequeño (70 kg P ha⁻¹) en relación a lo normalmente observado en estudios de mayor duración, lo que concuerda con lo sugerido por Allen y Mallarino (2006) quienes propusieron que las relaciones pueden ser curvilíneas o lineales dependiendo del nivel de acumulación de P.

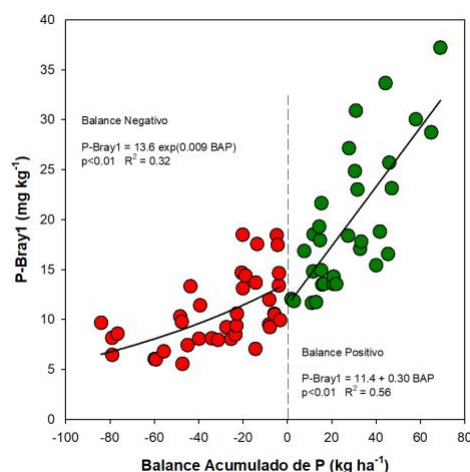


Figura 4. Disponibilidad de P en el suelo (P-Bray1) en función del balance de P acumulado durante las cinco campañas (2017-2022) para trigo/soja de segunda, maíz y soja de primera. Las líneas representan modelos de regresión lineal (balance positivo) o cuadrático (balance negativo), dependiendo del caso y las barras verticales representan los errores estándar de la media.

El rendimiento relativo de los tres cultivos se relacionó significativamente ($p<0.05$) con el nivel de P disponible estimado en el suelo mediante un modelo exponencial-máximo (Fig. 5), aunque de manera muy débil para maíz, probablemente debido al efecto que tuvieron las dos campañas donde no se observó respuesta significativa a la fertilización. A pesar del nivel de variabilidad observado en los tres casos puede observarse una clara tendencia a que la probabilidad y magnitud de la respuesta a la fertilización aumentaron a medida que disminuyó la disponibilidad inicial de P en el suelo, sosteniendo la utilidad del muestreo y análisis de suelo como herramienta fundamental para el diagnóstico de la fertilización fosforada en estos tres cultivos. En la Región Pampeana Argentina, las estimaciones de niveles críticos, por debajo de los cuales la probabilidad de respuesta a la fertilización es elevada, muestran resultados variables dependiendo del cultivo: entre 11 y 18 mg kg^{-1} para maíz (Echeverría y García, 1998; Barbagelata, 2011; Correndo y García, 2014), entre 8 y 17 mg kg^{-1} para soja (Fontanetto et al., 2008; Melchiori, et al., 2008; Espósito et al., 2008; Gutiérrez-Boem et al., 2010; Appelhans et al., 2016; Boxler et al., 2017) y superiores a 19 mg kg^{-1} para trigo (Sucunza et al., 2018). Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en eficiencia de absorción de P entre ambos cultivos (Fernández et al., 2009), a la composición de sitios o zonas geográficas representadas en las diferentes calibraciones, como así también a variantes en la metodología de estimación de los umbrales (Colwell, 1994; Cate y Nelson, 1971).

El hecho de que los niveles críticos se vean afectados por las propiedades del suelo y otros factores ambientales y de manejo (Bray, 1954; Bell et al., 2013), sugiere que las comparaciones inter-específicas precisas pueden evaluarse mejor a través de ensayos realizados en los mismos sitios experimentales y condiciones de cultivo. Sin embargo, no es abundante el número de trabajos que cumplan con estas condiciones (Dodd y Mallarino, 2005) por lo que el presente estudio representa una contribución considerable en este sentido.

La concentración de P en grano aumentó ($P<0.01$) con el nivel estimado de P disponible en el suelo hasta llegar a valores máximos estimados por los modelos que fueron de 0.35, 0.27 y 0.50 % para trigo, maíz y soja, respectivamente (Fig. 5). Estos resultados coinciden con lo reportado en el Medio Oeste Americano (Mallarino y Prater, 2007) para maíz, explorando un rango similar de P en el suelo (entre 3 y 55 mg kg^{-1} P-Bray1) donde tampoco se observó un notable consumo de lujo. Sin embargo, son marcadamente inferiores a los informados en la misma región por Anthony et al. (2013) para el cultivo de soja, quienes observaron una estabilización en la concentración de P en grano de aproximadamente 0.7%. Probablemente, diferencias en el tipo de suelo, en las fracciones de P o, especialmente, en la genética de soja utilizada en dicho estudio contribuyan a explicar las diferencias con las de nuestro trabajo.

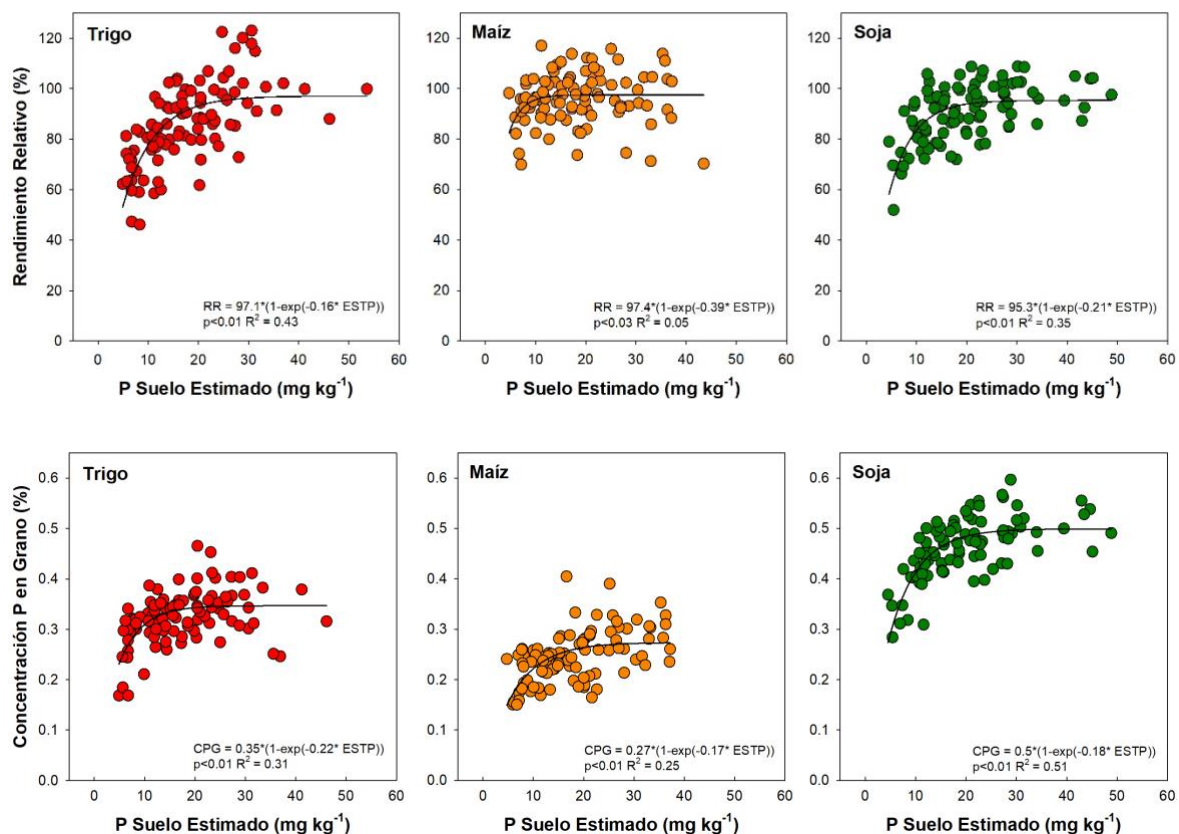


Figura 5. Rendimiento relativo y concentración de fósforo (P) en grano de trigo, maíz y soja en función del nivel estimado de P en el suelo (P-Bray1 + P aplicado) agrupando información de las cinco campañas (2017-2022). Las líneas representan modelos exponenciales.

>. CONCLUSIÓN

Este estudio de larga duración contribuye a demostrar la importancia del manejo del P para la productividad, rentabilidad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas de la región. La fertilización fosforada produjo incrementos promedio de rendimiento de 24, 9, 21 y 24 % para trigo, maíz, soja de primera y soja de segunda, respectivamente. Aunque una mayor magnitud de respuesta era esperada en maíz considerando el bajo nivel de P inicial en el suelo, la fertilización fosforada fue rentable en todos los cultivos con retornos máximos (promedio de las cinco campañas) de 417, 84 y 136 US\$ ha⁻¹ para trigo/soja de segunda, maíz y soja de primera, respectivamente. La dosis de P requerida para generar un balance cero varió entre 27 y 34, entre 16 y 42 y entre 10 y 27 kg P ha⁻¹ para trigo/soja de segunda, maíz y soja de primera, respectivamente. La tasa de decrecimiento del P en el suelo fue descrita a través de una relación de decaimiento exponencial para balances acumulados negativos, pero mediante una relación lineal positiva para balances positivos. En concordancia con resultados obtenidos para suelos similares de otra zona, 3.3 kg P ha⁻¹ de balance positivo fueron necesarios para aumentar la disponibilidad de P-Bray1 en el suelo en 1 mg kg⁻¹. El rendimiento relativo de los tres cultivos se relacionó con el nivel de P disponible estimado (P-Bray1 + P aplicado) en el suelo, aunque de manera más débil que lo esperado para el cultivo de maíz. La concentración de P en grano aumentó con la disponibilidad de P en el suelo hasta estabilizarse en un plateau, sugiriendo que el consumo de lujo no constituiría un problema de ineficiencia productiva, para las condiciones exploradas en este estudio.

>. REFERENCIAS

- Allen, B.L., and Mallarino, A.P. 2006: Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer and manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 454–463.
- Anthony, P.M., G. L. Malzer, S. D. Sparrow, y M. Zhang. 2013. Corn and soybean grain phosphorus content relationship with soil phosphorus, phosphorus fertilizer, and crop yield. *Commun. Soil Sci. Plant An.* 44:1056–1071.
- Appelhans, S.C.; R.J. Melchiori; y L.E. Novelli. 2016. Assessing Organic Phosphorus Contributions for Predicting Soybean Response to Fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:1688–1697.
- Appelhans SC, Carciocchi WD, Correndo A, et al. Predicting soil test phosphorus decrease in non-P-fertilized conditions. *Eur J Soil Sci.* 2020.
- Barbagelata, P.A. 2011. Fertilización fosfatada para trigo y maíz en siembra directa: Diagnóstico de fertilidad y estrategias de fertilización. pp. 90-97. En: F. García y A. Correndo (Eds.). *Simposio Fertilidad 2011: La nutrición de cultivos integrada al sistema de producción.* 18-19 de Mayo de 2011. Rosario. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC.
- Bell, R., D. Reuter, B. Scott, I. Sparrow, W. Strong, & W. Chen W. (2013). Soil phosphorus–crop response calibration relationships and criteria for winter cereal crops grown in Australia. *Crop and Pasture Science* 64:480–498. <http://dx.doi.org/10.1071/CP13016>
- Blake, L.; S. Mercik; M. Koerschens; S. Moskal; P.R. Poulton; K.W.T. Goulding; A. Weigel; y Y. Powlson. 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 56: 263-275.
- Boxler, M.; F.O. García; A.A. Correndo ; S. Gallo; R. Pozzi; M. Uranga; M. Salinas; N.I. Reussi Calvo; y A. Berardo. 2017b. Resultados de la campaña 2015/16: Maíz. Red de Nutrición de Cultivos CREA Sur de Santa Fe-IPNI-ASP.
- Bray, R.H. 1954. A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. *Soil Sci.* 78 (1):9–22.
- Ciampitti I.A., F.O. García, L.I. Picone, G. Rubio. 2011. Phosphorus budget and soil extractable dynamics in field crop rotations in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:131-142.
- Cate, R.B.Jr.; y L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* (35):658-659.
- Correndo, A.A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis Maestría. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Correndo, A.A.; y F.O. García. 2014. Bases para la nutrición del cultivo de maíz. En: *Maíz: técnicas probadas para una producción rentable.* 96pp. AACREA, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-1513-13-0
- Colwell, J. D. 1994. *Estimating Fertilizer Requirements.* CAB Int. England, Wallington, UK: Biddles, LTD. 259p.
- Dodd, J.R.; y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69(4):1118–1128.
- Echeverría, H.E.; y F.O. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico* 149 Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. 16 p.
- Espósito, G.; C.A. Castillo; G.R. Balboa; y R.G. Balboa. 2008. Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos del sur de Córdoba para el cultivo de soja. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (AACS). San Luis, 13-16 de Mayo de 2008. Actas Cd-ROM.
- Fernández, M.C.; H. Belinque; F.H. Gutiérrez-Boem; y G. Rubio. 2009. Compared Phosphorus Efficiency in Soybean, Sunflower and Maize. *J. Plant Nutr.* 32 (12):2027-2043.

- Fontanetto, H.; O. Keller; D. Gialevra; L. Belotti; y C. Negro. 2008. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos de la region central de Santa Fe: respuesta física del cultivo, eficiencia de uso del P y niveles críticos en el suelo. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, AACS. San Luis, Mayo 2008.
- Galantini, J.A.; M.R. Landriscini; A.M. Miglierina; J.O. Iglesias; y R.A. Rosell. 1997. Formas de fósforo en Agroecosistemas de La Pampa. Argentina. VIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. La Serena. Chile.
- García, F.O.; y M.F. González Sanjuán. 2013. La nutrición de suelos y cultivos, y el balance de nutrientes. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica Nº 9 (Marzo):1-5. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Gutiérrez-Boem, F.H.; F.O. García; y M. Boxler. 2010. ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo?. En: Simposio Fertilidad 2011. La Nutrición de Cultivos Integrada al Sistema de producción. IPNI – Fertilizar AC. Rosario, Santa Fe. pp. 191-193.
- Mallarino, A.P., and J. Prater. 2007. Corn and soybean grain yield, phosphorus removal, and soil-test responses to long-term phosphorus fertilization strategies. pp. 241-253. In The Integrated Crop Management Conf. Proceedings. Nov. 29-30, 2007. Ames, IA. Iowa State Univ. Extension.
- Miller, R.O. 1998. "Nitric-perchloric acid wet digestion in an open vessel", in Handbook of methods for plant analysis, Kalra, Y.P., Ed., CRC Press, Boca Raton, 57-61.
- Melchiori, R.J.M.; M. Ferrari; H. Fontanetto; y S.M. Albarenque. 2008. Fertilidad fosfatada en soja en siembra directa: aporte de la fracción orgánica lábil. Actas XXI Congreso Argentino de Ciencias del Suelo. Potrero de Los Funes, San Luis.
- Patel, S., Shapiro, C., & Iqbal, J. (2024). Long-term comparison of targeted soil test values and crop removal as a phosphorus fertilization strategy in corn. *Agronomy Journal*, 116, 3240–3255. <https://doi.org/10.1002/agj2.21677> doi:10.1016/j.fcr.2008.05.007
- Rillo, S., C. Álvarez, M. Diaz-Zorita, and E.J. Noellemeyer. 2016. Aplicación de fósforo en secuencias agrícolas en siembra directa en Hapludoles Enticos. *Ciencia del suelo (Soil Science Argentina)* 34(2): 245-251, 2016.
- Rubio, G., F.H. Gutiérrez Boem, and M.J. Cabello. 2008. Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus additions in Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1721–1727.
- Sainz Rozas, H.R; M. Eyherabide; G. Larrea; N. Martínez Cuesta; H. Angelini; N. Reussi Calvo, and N. Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Simposio de fertilidad. FERTILIZAR. Rosario, 8 y 9 de mayo de 2019.
- Selles, F.; C.A. Campbell; y R.P. Zentner. 1995. Effect of cropping and fertilization on plant and soil phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 140-144.
- Sharpley, A. N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:905-911.
- Sharpley, A., Daniel, T. C., Sims, J. T., & Pote, D. H. 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51, 160–166.
- Stewart, J.; y A. Sharpley. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: R. Follet, J. Stewart y C. Cole (ed.) *Soil fertility and organic matter as critical components of production systems*. SSSA Spec. Pub. No. 19. SSSAASA. Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Sucunza, F.A.; F.H. Gutiérrez-Boem; F.O. García; M. Boxler; y G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Europ. J. Agronomy*, 96: 87-95.
- Suñer, L.G.; J. A. Galantini; R.A. Rosell; y M.D. Chamadoira. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum*). *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104(2):105-111.
- Tellería, M.G., F.H. Gutiérrez-Boem, & G.N. Ferraris. 2016. Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación anticipada de fósforo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* No. 22: 20-24.
- Thien, S.J.; y R Myers. 1992. Determination of bioavailable phosphorus in soil. *Soil Sci Soc Am J.* 56:814-818
- Wyngaard, N.; A. Vidaurreta; H.E. Echeverría; y L.I. Picone. 2013. Dynamics of phosphorus and carbon in the soil particulate fraction under different management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:1584–1590.

Potasio: Explorando deficiencias y respuestas a la fertilización en las regiones pampeana y mesopotámica argentinas

► ► **Orcellet Juan M.^{1*}, Cesar Quintero², Fernando Salvagiotti³, Hernán Sainz Rozas⁴, Luis Ventimiglia⁵, Gustavo Ferraris⁶, Enrique Figueroa⁷, Miguel Boxler⁸, Esteban Kehoe⁹, María Micaela Biassoni³, Damianos Damianidis³, María Fernanda González Sanjuan¹⁰, Esteban Ciarlo^{10,11}, Fernando O. García^{12*}**

¹Nidera Semillas, Argentina; ²Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Entre Ríos; ³Grupo Manejo de Cultivos, Suelos y Agua, EEA Oliveros INTA y CONICET, Santa Fe; ⁴IPADS INTA-CONICET Balcarce/Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Buenos Aires; ⁵AER INTA 9 de Julio, 9 de Julio, Buenos Aires; ⁶EEA INTA Pergamino, Pergamino, Buenos Aires; ⁷EEA INTA Mercedes, Mercedes, Corrientes; ⁸Consultor, Arias, Córdoba; ⁹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Zavalla, Santa Fe; ¹⁰Fertilizar AC, Buenos Aires; ¹¹Cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; ¹²Consultor y Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Buenos Aires

✉ juanmanuelorcellet@gmail.com / fgarcia1957@gmail.com

Este trabajo ha sido aceptado en la revista Ciencia del Suelo y actualmente está En Prensa, <https://cienciadelsuelo.suelos.org.ar/>

RESUMEN EXPANDIDO

Relevamientos recientes han evidenciado suelos con bajos niveles de potasio extractable (Kext) en zonas de la región pampeana argentina y de gran parte de la Mesopotamia. Entre 2019 y 2021, se plantearon redes experimentales con los objetivos de i) evaluar los niveles de Kext y las respuestas a la fertilización potásica en la región pampeana central (RPC) y Mesopotamia (MPT) y ii) determinar umbrales de respuesta a la fertilización con K a partir del análisis de Kext. Se llevaron a cabo 31 ensayos y 16 franjas exploratorias en maíz, soja, trigo y arroz en MPT (Entre Ríos y sur de Corrientes) y 29 ensayos en RPC (sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba, centro, oeste y sudeste de Buenos Aires). Los niveles de Kext promediaron 225 mg kg⁻¹ y 495 mg kg⁻¹ en MPT y RPC, respectivamente. En MPT se observaron respuestas significativas a la fertilización potásica en 18 de los 48 sitios evaluados. Las respuestas fueron estadísticamente significativas en 50% de los sitios de maíz, 23% de los de soja, 43% de los de trigo y ninguno de los de arroz, con incrementos de rendimiento promedio de 35%, 28% y 28% en maíz, soja y trigo, respectivamente. En RPC se registraron respuestas significativas en 4 de 28 ensayos. La calibración del análisis de suelo de Kext indica un rango crítico de 157-213 mg K kg⁻¹ por debajo del cual la probabilidad de respuesta a la fertilización potásica es alta. Los análisis de planta, foliares o de grano, no permitieron diferenciar las situaciones sin y con deficiencia. Los resultados muestran que el K puede limitar el rendimiento de los cultivos y que el diagnóstico de fertilidad potásica basado en el análisis de suelo sería una metodología capaz de detectar condiciones de deficiencia o suficiencia de este nutriente.

Evaluación de uso agronómico de efluente porcino en cultivo de soja (Campaña 2023-2024)

► ► Mathier DF^{1*}, Sosa N¹ & Bragachini MA¹

¹ INTA EEA Manfredi

✉ mathier.diego@inta.gob.ar

>. INTRODUCCIÓN

La producción porcina nacional, atravesó una difícil situación económica reflejada en la fuerte caída de los márgenes de las granjas de producción intensiva de cerdo durante el primer semestre de 2024. Según Ieral (2024), granjas de eficiencia media registraron solo 2 meses con números positivos (enero-febrero) y en 4 no cubrieron los costos (marzo a junio). Las pérdidas de mayo-junio ascendieron a \$177 - \$251 por kilo de animal producido y se posicionaron como los peores registros de los últimos 8 años para la actividad.

La falta de rentabilidad en la producción porcina implica realizar ajustes en las empresas agropecuarias para que sean más eficientes y competitivas. En este sentido, una correcta gestión de los efluentes de las granjas porcinas y su utilización como enmienda orgánica de suelo para nutrición de cultivos, permitiría reducir el uso de fertilizantes minerales y traducirse esto en una mejora en la rentabilidad de las empresas agropecuarias.

Estos subproductos, utilizados bajo un plan de aplicación agronómico, pueden contribuir a mitigar las deficiencias de nutrientes en los suelos y mejorar el rendimiento de los cultivos ya que son fuente de nutrientes y materia orgánica para los suelos. El Objetivo General del trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de efluente de cerdo estabilizado sobre el cultivo de soja.

>. METODOLOGÍA

El ensayo se realizó en el establecimiento Porcal de la Empresa Dos Ríos en la localidad de Despeñaderos. El mismo se viene realizando desde el año 2017 siendo esta la séptima campaña ininterrumpida de evaluación.

Los purines de cerdos utilizados en este sitio experimental provienen del sector cría-terminación de un criadero de 1500 madres, los cuales fueron tratados mediante 3 lagunas de estabilización impermeabilizadas. El efluente se tomó de la última laguna del sistema, luego de pasar por una criba autolimpiante para evitar el ingreso de impurezas al sistema de aspersión.

Las aplicaciones se realizaron con un pivot central y las evaluaciones se efectuaron en 2 círculos contiguos.

Tratamientos círculo 1:

1. Testigo sin aplicación de efluente ni de fertilizante (T).
2. 250.000 litros de efluentes porcinos/ha. Sin fertilizante mineral (25 E).
3. 250.000 litros de efluentes porcinos/ha con 110 kg/ha de superfosfato simple (25 E + SPS).
4. 125.000 litros de efluentes porcinos/ha con 110 kg/ha de superfosfato simple (12,5 E + SPS).

Tratamientos círculo 2:

1. Testigo sin aplicación de efluente ni de fertilizante (T).
2. 375.000 litros de efluentes porcinos/ha. (37,5 E)
3. 500.000 litros de efluentes porcinos/ha (50 E).
4. 625.000 litros de efluentes porcinos/ha (62,5 E).

Cada parcela corresponde a un cuarto del círculo de riego (2 ha aproximadamente). El diseño del ensayo se puede observar en la Figura 1.

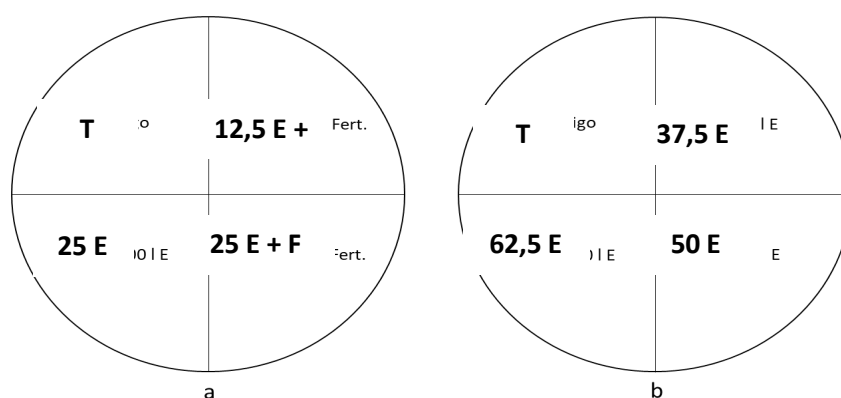


Figura 1: a) círculo 1, b) círculo 2.

Previo a la aplicación, se tomaron muestras del efluente y se enviaron a laboratorio para su caracterización. Se determinaron los siguientes parámetros: pH, Conductividad eléctrica (CE), Sólidos Totales (ST), Nitrógeno Total (Nt), Fósforo Total (P), Potasio (K), Sodio (Na), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de análisis de efluente porcino.

pH	CE	ST	Nt	P	K	Na	Ca	Mg
	dS m ⁻¹	%	g l ⁻¹	ppm	g l ⁻¹			
7,90	27,88	13,5	8,72	103,25	2,68	0,95	0,308	0,140

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis microbiológico de efluentes.

Tabla 2: Resultados del análisis microbiológico de efluente.

Parámetro	Muestra	Métodos
Coliformes totales (NMP/100mL)	2,8x10 ³	APHA 9221 B1-3. Ed. 22
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	1,4x10 ³	APHA 9221 C. Ed. 22
Escherichia coli (NMP/100 mL)	4,0x10 ²	APHA 9221 F. Ed. 22
Salmonella spp. / 25 mL	Ausencia	APHA 9260 3,4,6,7,8 Ed. 22

El ensayo se realizó en un suelo argiustol típico. Debido a que la aplicación de efluente se anticipó, no se pudo hacer el muestreo de suelo previo a la aplicación del mismo. Por tal motivo, se tomaron los datos del muestreo post cosecha campaña 2022/23. Las determinaciones realizadas fueron: Carbono Orgánico (CO), Materia Orgánica (MO), Nt, Fósforo extractable (Pe), pH, CE, Nitrógeno de Nitrato (N-NO_3^-), Ca, Mg, Na, K, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI). Los resultados obtenidos se pueden observar en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3: Resultados de análisis de suelo postcosecha, campaña 2022/23 (0-20 cm).

Parcela	MO	Nt	Pe	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	CIC	PSI	Zn	Cu
	g/100g suelo		ppm		dS m ⁻¹	(cmol kg ⁻¹)					%	ppm	
T	2,52	0,13	4	7,42	0,36	10	2,3	0,2	1,5	20,9	0,9	0,5	1,2
12,5 E + SPS	2,62	0,15	37	7,26	0,88	9,9	2,2	0,1	3	21,9	0,4	2,8	3,6
25 E + SPS	3,10	0,16	39	7,24	0,88	10,9	2,1	0,2	4,3	20,8	1,2	3,7	4,6
25 E	3,11	0,15	29	7,60	1,05	10,7	2,1	0,2	4,2	23,1	1,1	3,9	4,6
37,5 E	3,54	0,22	45	7,20	1,77	11,2	2	0,3	4,9	22,8	1,5	5,1	6,8
50 E	4,6	0,21	59	7,40	1,85	11,3	2,2	0,5	4,7	25,9	2,0	7,4	7,5
62,5 E	3,55	0,19	73	7,11	1,77	10,8	2,3	0,7	6,4	23,1	3	8,1	8,6

Tabla 4: Contenido de N-NO_3^- postcosecha, campaña 2022/23.

Prof. (cm)	N-NO ₃ ⁻ (ppm)						
	T	12,5 E + F	25 E + F	25 E	37,5 E	50 E	62,5 E
0-20	8	22,2	21,1	15,4	42	44,4	39,5
20-60	1,5	12,6	19,4	20	35,6	14,4	29,6

Las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo se pueden observar en la Figura 2.

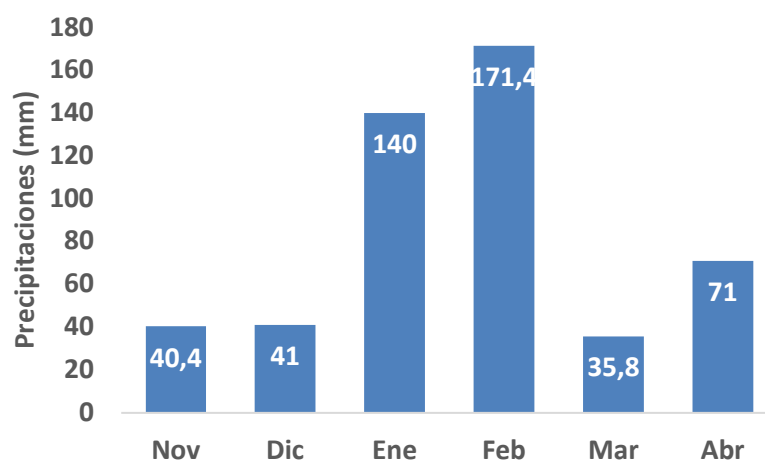


Figura 2: Precipitaciones (mm).

La aplicación del efluente se realizó mediante un pivot central el 26/9/2023; se sembró el 18/11/2023 la variedad DM 46i20 en los dos círculos mediante sistema de siembra directa con una densidad de 390.000 semillas/ha.

Para la determinación del rendimiento del cultivo, se realizó cosecha manual a campo (5/04/2024). Para esto se tomaron 4 muestras por parcela en donde se recolectaron las plantas de 2 surcos contiguos por 4,2 metros de largo (8,4 metros lineales). Las muestras luego fueron trilladas con una cosechadora de parcela, se las pesó y se midió su contenido de humedad y peso de mil granos. El 8/04/2024 se cosechó todo el lote con máquina comercial equipada con monitor de rendimiento.

Posterior a la cosecha del cultivo se realizó un monitoreo de suelo para evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre las propiedades químicas del mismo. Se realizó un análisis completo en la profundidad 0-20 cm y de N-NO_3^- para la profundidad 20-60 cm. Los resultados de los análisis se pueden observar en las Tablas 5 y 6.

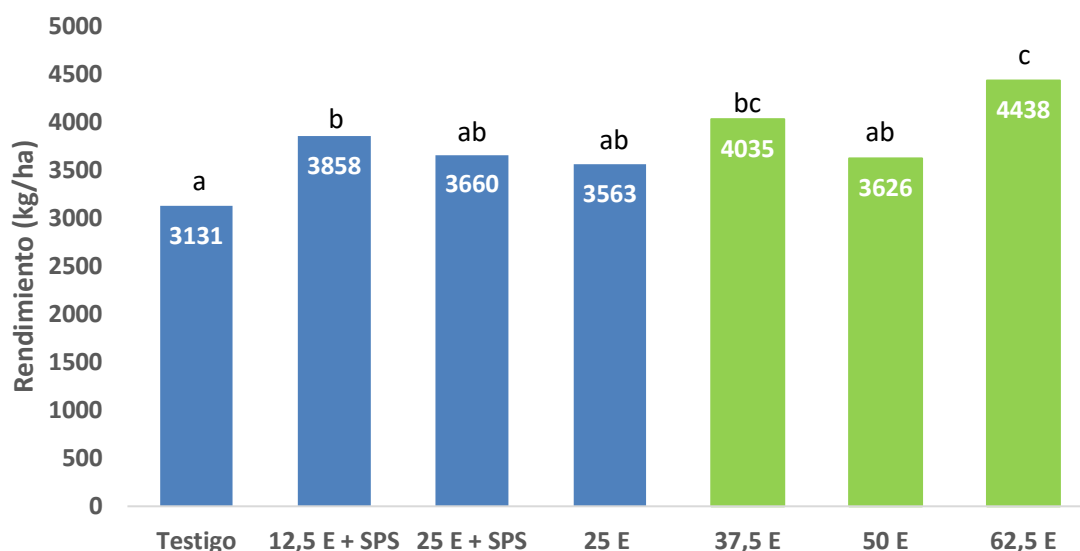
>. RESULTADOS OBTENIDOS

Efluente

Se reafirma la variabilidad interanual existente entre los valores obtenidos de los análisis. Se enfatiza el elevado valor de CE y NT en la presente campaña.

Rendimiento

La aplicación de efluente tuvo incidencia en el rendimiento de los distintos tratamientos evaluados (Figura 3). Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre 62,5 E y el resto de los tratamientos, excepto 37,5 E. También se observan diferencias significativas entre 62,5 E, 37,5 E y 12,5 E + SPS con el testigo. No existen diferencias estadísticamente significativas entre 25 E, 50 E, 25 E + SPS, 12,5 E + SPS y 37,5 E.



Figura

Figura 3: Rendimiento de soja Dos Ríos, campaña 2023/2024.

Se reafirma lo observado en las campañas anteriores donde el tratamiento 25 E y 37,5 E resultaron ser la dosis óptima económica para el círculo 1 y 2 respectivamente. Esto permitiría utilizar una lámina menor, equiparando rendimiento y ampliando la superficie enmendada. No se observó respuesta al agregado de fertilizante mineral.

Suelo poscosecha

Se presentan en la Tabla 5 y 6 los resultados de los análisis de suelos evaluados luego de la cosecha del cultivo. Analizando los resultados obtenidos entre el muestreo poscosecha de la campaña 2023/24 respecto de la 2022/23, se observó una reducción de los valores de MO y NT en todos los tratamientos, en cambio se incrementó el valor de P en todas las parcelas, excepto 37,5 E. Luego de 7 años de evaluación, al igual que lo observado en campañas anteriores, el valor de P es el que manifestó el mayor incremento respecto al tratamiento testigo, alcanzando en algunos tratamientos (50 E y 62,5 E) valores superiores a 70 ppm.

Se observa un leve incremento de pH en todos los tratamientos, excepto en 12,5 E + SPS. La CE se incrementó en T y 25 E + SPS, en cambio en el resto de los tratamientos se registró una leve reducción de este parámetro. Ambos parámetros se encuentran dentro de rangos adecuados. Se destaca una disminución del PSI en los tratamientos con aplicación de efluente, excepto en (12,5 E + SPS).

Analizando los cationes de intercambio, en todos los tratamientos la saturación de calcio (Ca) se encuentra por debajo del rango ideal (61-75% del valor CIC). Respecto al Magnesio (Mg) en la parcela 37,5 E el valor de este nutriente es bajo, en cambio en el resto de los tratamientos es alto ya que se encuentran todos por encima del valor de referencia de 10% de saturación. No se observan inconvenientes respecto al contenido de sodio (Na) en el suelo que se encuentra dentro de valores bajos. El contenido de potasio (K) es muy elevado ya que en todos los tratamientos supera el valor adecuado (entre un 3-5%).

Respecto a los micronutrientes evaluados, es importante destacar la carencia de los mismos en gran parte de la región pampeana (Sainz Rosas et al, 2018). El rango crítico de Zn en suelo para el cultivo de maíz es de 0,8 a 1,2 ppm de Zn (Barbieri et al, 2017) y para la soja de 0,51 a 1,27 ppm (Bustos et al, 2019); mientras que el rango crítico de Cobre en suelo se encuentra entre 0,4 y 0,6 ppm de Cu (Kruger et al, 1985). El tratamiento testigo presenta valores bajos de Zn, en cambio los tratamientos con aplicación de efluente se encuentran con valores superiores al rango crítico de producción. Todos los tratamientos presentan elevados niveles de Cu.

Hay un marcado incremento en el contenido de N-NO_3^- en todas las parcelas con aplicación de efluente respecto a T en poscosecha, esto es debido a las aplicaciones de efluentes de los seis años previos. A pesar de esto, los valores de N-NO_3^- poscosecha de la presente campaña son inferiores a los de la campaña 2022-2023, excepto en T, 50 E y 62,5 E para la profundidad de 20-60 cm.

Tabla 5: Resultados de análisis de suelo poscosecha (0-20 cm).

Parcela	MO	Nt	Pe	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	CIC	PSI	Zn	Cu
	g/100g suelo		ppm		dS m^{-1}	(cmol kg^{-1})					%	Ppm	
T	1,78	0,12	6	7,6	0,85	12	2,6	0,04	2,1	19,5	0,22	0,54	1,35
12,5 E + F	1,71	0,12	53	7,2	0,73	9,8	2,3	0,13	4,4	20,4	0,6	2,67	3,80
25 E + F	1,85	0,13	67	7,7	1,21	12,4	2,3	0,22	5,8	21,7	1	5	5,30
25 E	1,87	0,11	43	7,6	0,79	10	2	0,17	5,4	19,2	0,9	3,6	4,20
37,5 E	2,08	0,14	44	7,5	1,17	12,5	2,1	0,22	6,2	21,2	1	3,95	5,10
50 E	2,44	0,15	87	7,8	1,62			0,3	8,5	20,9	1,45	7,60	7,90
62,5 E	2,51	0,15	78,4	7,4	1,09	9,6	2,22	0,35	8,21	21,3	1,63	7,40	7,60

Tabla 6: Contenido de de N-NO_3^- postcosecha.

Prof. (cm)	N- NO_3^- (ppm)						
	T	12,5 E + F	25 E + F	25 E	37,5 E	50 E	62,5 E
0-20	6,3	12	13,7	12,2	14,5	18	34,5
20-60	3,4	6,3	8,9	12,4	11,3	24,7	34,2

>. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se reafirma la variabilidad en la composición nutricional del efluente porcino, por tal motivo se recomienda previo a su aplicación, hacer una caracterización del mismo.

En la presente campaña se destaca el rendimiento del tratamiento 12,5 E + SPS en el círculo 1 y el tratamiento 62,5 E en el círculo 2. De todas formas, las dosis de 25 E y 37,5 E resultaron ser las óptimas económicas para cada uno de los círculos.

Posterior a 7 campañas ininterrumpidas de evaluación de aplicación de efluente porcino, se reafirma el incremento del contenido de P en el suelo, como así también el de micronutrientes esenciales (Cu y Zn) para la producción de los cultivos.

Los resultados obtenidos desde 2017 a la actualidad, demuestran el efecto positivo que genera el correcto uso agronómico de los efluentes porcinos en los sistemas productivos, además de los beneficios económicos en las empresas agropecuarias.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Barbieri, P.A.; Sainz Rozas, H.R.; Wyngaard, N.; Eyherabide, M.; Reussi Calvo, N.I.; Salvagiotti, F.; Correndo, A.; Barbagelata, P.A.; Espósito Goya, G.; Colazo, J.C.; Echeverría, H.E. 2017. Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn?, Soil Science Soc. Am. J. 81:556-563.
- Bustos, A.N.; Sainz Rozas, H.R.; Alvarez, C.; Barbieri, P.A.; Eyherabide, M.; Wyngaard, N. 2019. Diagnóstico de la disponibilidad de zinc para el cultivo de soja. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Montevideo, Uruguay.
- Ieral, 2024. <https://www.ieral.org/noticias/margenes-granjas-porcinos-minimos-ultimos-anos-4831.html>
- Kruger, G.A.; Karamanos, R.E.; Singh, J.P.1985. The copper fertility of Saskatchewan soils. Can. J. Soil Sci. 65:89-99.
- Sainz Rozas, H.; Eyherabide, M.; Larrea, G.; Martínez Cuesta, N.; Angelini, H.; Reusi Calvo, N.; Wyngaard, N. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Simposio Fertilidad. Rosario, Argentina, pp. 141–158.

Un Nuevo Enfoque para la Fertilización en Maíz: Predicción de la Demanda de Nitrógeno con Curvas de Absorción Crítica

► ► **Maltese N.^{1*}, Melchiori R.², Lattanzi F.¹, Novelli L.^{2,3},
Pautasso J.^{2,3}, Mazzilli S.¹, Baraibar N.¹ & Berger A.¹**

¹ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA),
Estación Experimental "Dr. Alberto Boerger", Ruta 50, km 11, Colonia, Uruguay.

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA),
Estación Experimental Paraná, Ruta 12, km 12.5, Oro Verde, Argentina.

³ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11,
Km. 10.5, Oro Verde, Argentina.

✉ nmaltese@inia.org.uy

RESUMEN EXPANDIDO

La curva de dilución de nitrógeno (CDN) crítica, o su análoga, la curva de absorción de N crítica, permiten cuantificar el estado óptimo nutricional en el cual se maximiza la tasa de crecimiento del cultivo, por lo tanto, resultan una herramienta útil como método de referencia para el manejo de la fertilización. Particularmente en maíz (*Zea mays* L.), la curva ajustada por Plenet & Lemaire (1999), que relaciona la biomasa acumulada con su concentración de N crítica, ha demostrado un alto grado de robustez a través de diferentes combinaciones de genotipo x manejo x ambiente (Ciampitti et al., 2021). Con relación a esto, numerosos estudios se han focalizado en la utilización de las CDN con fines de diagnóstico, proponiéndose el índice de nutrición nitrogenada (INN) como criterio para tal fin, y en menor medida como base para el diseño de modelos de recomendación de fertilización nitrogenada. En este trabajo, se propone una novedosa aplicación de la curva de absorción crítica de N para estimar la demanda futura de N, con el propósito de generar recomendaciones dinámicas de fertilización durante el ciclo de cultivo de maíz. Además de cuantificar el estado nutricional actual, este modelo predice las necesidades futuras de N del cultivo basado en su capacidad de acumular biomasa durante el periodo crítico, una métrica ampliamente estudiada que puede ser estimada través de muestreos *in situ*, modelos alométricos, de simulación o herramientas de sensoramiento remoto. Con el objetivo de calibrar y validar la metodología, se propuso un modelo de balance que considera los siguientes componentes: (i) N disponible en el suelo previo a la re-fertilización (N suelo a la siembra + N fertilizante previo + N mineralizado previo), (ii) N acumulado en el cultivo actual, (iii) estimación de la demanda futura de N, y (iv) estimación de aportes por mineralización de N desde el suelo. La integración de estos componentes permite una recomendación dinámica de re-fertilización nitrogenada. Este método, esta propuesto para ser aplicado en una ventana temporal del ciclo de cultivo comprendida entre V11 y V14, i.e. etapa del ciclo de cultivo que resulta lo suficientemente "tarde" para detectar deficiencias y determinar el potencial de crecimiento y lo suficientemente "temprano" para poder realizar una aplicación del fertilizante. Este trabajo reporta el marco conceptual del modelo, y la metodología empleada para su calibración y validación preliminar mediante una red experimental conducida en Uruguay y Argentina por INIA e INTA, respectivamente.

>. AGRADECIMIENTOS:

A los técnicos y productores que colaboraron con sitios experimentales de validación (Barolín S., Michelin C., El Hinojo SA, Gebahr, H., Laudato N., Kleist A., Planchon J.).

>. REFERENCIAS

Plénet, D., & Lemaire, G. (1999). Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and soil*, 216, 65-82.

Lemaire, G., Jeuffroy, M. H., & Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of agronomy*, 28(4), 614-624.

Ciampitti, I. A., Fernandez, J., Tamagno, S., Zhao, B., Lemaire, G., & Makowski, D. (2021). Does the critical N dilution curve for maize crop vary across genotype x environment x management scenarios? - a Bayesian analysis. *European Journal of Agronomy*, 123, 126202.

Maíz en el NEA: ajuste de la fertilización nitrogenada

► ► **Madias, A.^{1,2}, Stahringer, N.I.³, Borrás, L.⁴, Saenz, E.⁵, Gambín, B.L.⁵, Rubio, G.^{6,7}**

¹ Aapresid . ² Facultad Cs. Agrarias UNR. ³ Facultad de Cs. Agrarias UNNE. ⁴ Corteva. ⁵ Iowa State University. ⁶ CONICET. ⁷ FAUBA.

✉ madias@aapresid.org.ar

RESUMEN EXPANDIDO

Una gran proporción de la producción de maíz en el NEA se realiza sin fertilización nitrogenada o con dosis muy bajas, limitando significativamente el rendimiento alcanzable. La ausencia de modelos predictivos precisos de respuesta al nitrógeno (N) constituye una de las principales causas de esta situación. El objetivo de este trabajo fue identificar variables que determinan la respuesta a la fertilización con N y desarrollar un modelo predictivo para la toma de decisiones en la región NEA. Se realizaron 43 ensayos de campo entre 2020 y 2022, bajo un diseño de bloques completos al azar en macroparcelas, con 3 o 4 repeticiones por sitio. Cada sitio incluyó 4 o 5 niveles de fertilización con N (N_F), siempre incorporando un testigo sin N, con dosis máximas de hasta 184 kg N ha⁻¹. Los rendimientos fueron determinados mediante cosecha mecánica y se relevaron variables de manejo (densidad de siembra, tipo de híbrido, antecesor, fecha de siembra, entre otras) y variables ambientales (pH, CIC, carbono orgánico, nutrientes del suelo, agua útil, lluvias, y estrés térmico). El análisis siguió los pasos propuestos por Coyos et al (2018), y resumidamente consistió en: 1) ajustar un modelo cuadrático-plateau entre N_F y rendimiento, incorporando efectos aleatorios por sitio mediante modelos mixtos; 2) explorar y preseleccionar variables asociadas a cambios en los parámetros del modelo entre sitios (análisis gráfico y de correlaciones); 3) realizar una inferencia multimodelo para identificar variables de mayor importancia relativa; 4) desarrollar modelos predictivos integrando dichas variables sobre los parámetros del modelo; y 5) graficar los efectos de las covariables sobre la respuesta a N y la eficiencia en el uso de N (relación grano:N) a través de la primera derivada del modelo. El Carbono Orgánico Particulado (COP), el estrés térmico alrededor de floración (ET; número de días con temperaturas máximas >35 °C), y el nitrógeno disponible en el suelo al momento de la siembra (NS) fueron las variables más influyentes sobre la respuesta a la fertilización. Se identificaron dos modelos predictivos con un R^2 condicional de 0,94. Según uno de los modelos, y considerando una relación grano:N de 10:1, la dosis óptima económica varió ampliamente entre 85 y 0 kg N ha⁻¹ según en nivel de COP (0.11 a 0.34%), entre 65 y 0 kg N ha⁻¹ según en nivel de estrés térmico (0 a 17 días), y entre 59 y 3 kg N ha⁻¹ según en nivel de N_s (41 a 128 kg N_s ha⁻¹). Los resultados indican que la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz en el NEA estuvo condicionada principalmente por factores de suelo y clima, y no por variables de manejo. Además, se demuestra la posibilidad de predecir la respuesta a N a partir de las covariables identificadas, lo que permite desarrollar recomendaciones más precisas. Los modelos generados constituyen herramientas prometedoras para mejorar la eficiencia del uso de N en maíz en el NEA, con implicancias productivas y económicas.

¿Mejoramos el rendimiento y calidad de maíz y soja con el encalado?

► ► **Rom Larrea GE^{1*}, Wyngaard N², Reussi Calvo N, Barbieri PA³, Eyherabide M², Garelo FJ¹, Sainz Rozas HR² pani J.M. ¹, Mercáu J.L.² y Pagani A.³**

¹ EEA INTA Cuenca del Salado, ²Unidad Integrada INTA-FCA, Balcarce, Buenos Aires

✉ larrea.gaston@inta.gob.ar

>. INTRODUCCIÓN

La corrección de la acidez del suelo se realiza utilizando enmiendas calcáreas (CaCO_3), productos que aplicados al suelo producen un incremento en el pH y aportan calcio (Ca) (Espinosa y Molina, 1999). Por lo tanto, la respuesta de los cultivos a la práctica de encalado podría deberse en parte a una mejora en el ambiente edáfico por correcciones del pH y, en parte, a una mejora de la nutrición cálcica.

La modificación del pH causada por el encalado trae aparejado respuestas por parte de los cultivos. Godsey *et al.* (2007) reportaron que la aplicación de cal en suelos con niveles de pH mayores a 5.5 no aumentaba el rendimiento. Sin embargo, Pagani y Mallarino (2015) para suelos de Iowa hallaron mejoras en el rendimiento en grano en los cultivos de soja y maíz en algunos sitios con pH superficial de hasta 6.5 y pH del subsuelo más bajo. En la actualidad, en Argentina, son escasos los trabajos que evalúen cómo el cambio de pH afecta el rendimiento de los cultivos. Por otra parte, la acidez del suelo es un factor importante en la fijación biológica de nitrógeno (FBN), ya que puede afectar fuertemente la colonización y nodulación de las raíces del cultivo de soja por parte de las bacterias. En este mismo sentido, Gutierrez-Boem y Salvaggiotti (2014) reportaron que la acidez no solo reduce la infección y formación de nódulos, sino también la supervivencia de los rizobios en el suelo. Esto sugiere que la corrección de la acidez mediante encalado podría contribuir no solo a la mejorar del rendimiento del cultivo de soja sino también la calidad nutricional del grano, ya que aumentaría la FBN. Por lo tanto, surge la necesidad de evaluar el efecto del encalado sobre el rendimiento y calidad del grano de diferentes cultivos extensivos.

El suministro adecuado de Ca a los cultivos es fundamental para su crecimiento y desarrollo. Aunque en suelos con una larga historia agrícola de la Región Pampeana (RP) se han informado niveles promedio de Ca intercambiable (Ca_i) medios o altos, se han encontrado zonas, como en el oeste de la provincia de Buenos Aires y sur de Córdoba, donde se han reportado valores bajos de Ca_i ($< 1000 \text{ mg kg}^{-1}$) (Sainz Rozas *et al.*, 2013). Esto sugiere la posible existencia de deficiencias de Ca en algunos sitios de estas áreas, lo cual podría afectar la nutrición de los cultivos. En este sentido, Vivas y Fontanetto (2003) y Vázquez y Pagani, (2014) para suelos del norte de la RP informaron incrementos de rendimiento de soja y de maíz por aplicaciones de cal. Sin embargo, esta información necesita ser estudiada un rango más amplio de condiciones edafoclimáticas.

En síntesis, teniendo en cuenta las limitaciones productivas que pueden provocar los bajos valores de pH y de Ca de los suelos de la RP, surge la necesidad de profundizar el conocimiento sobre dichos procesos. Los objetivos de este trabajo son: i) Evaluar el efecto de los cambios en los niveles de pH y Ca_i del suelo generados por el encalado sobre el rendimiento en grano del cultivo de maíz y soja y II) evaluar el efecto del cambio de pH sobre la concentración de N total en el grano soja.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se instalaron durante el año 2015 (n=6) y 2017 (n=4) en diez sitios de la RP con prolongada historia agrícola, los cuales fueron preseleccionados por diferencias en sus propiedades edáficas (Figura 1).

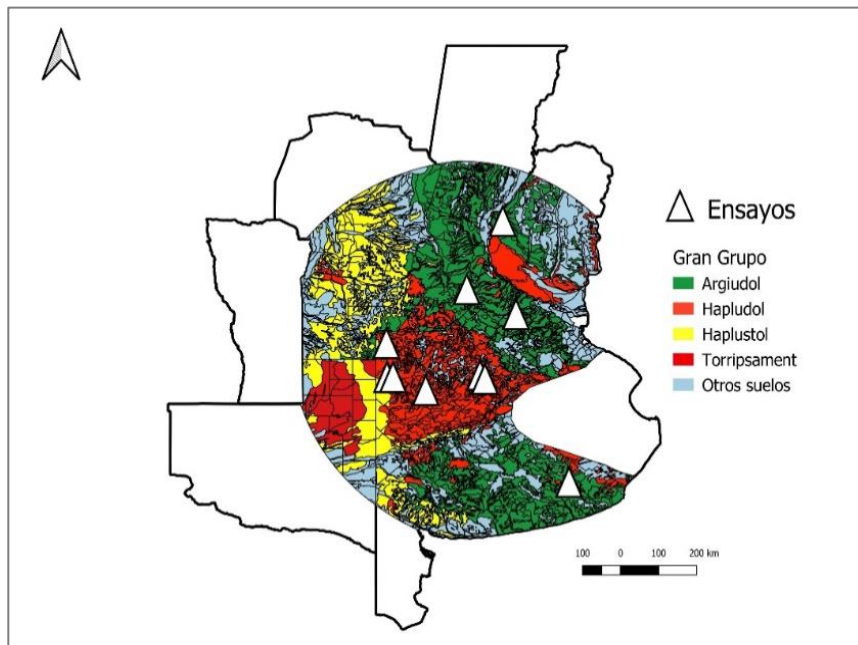


Figura 1. Ensayos de larga duración distribuidos en la Región Pampeana.

Los ensayos se realizaron sobre rotaciones que incluían: soja (*glycine max* L.) y maíz (*Zea mays*, L.). El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones y las unidades experimentales fueron de 40 m² de superficie (4 m de ancho por 10 m de largo). Los tratamientos consistieron dosis crecientes de cal. Las dosis de cal (micronizada y con 97.3% de pureza) utilizadas fueron de 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 y 6 Mg ha⁻¹, la cual se aplicó por única vez en superficie, tres meses antes de la siembra del primer cultivo (Julio).

Se tomaron muestras de suelo compuestas de 0-10, 10-20 y 20-40 cm de profundidad para cada tratamiento de suelo se le determinó el pH actual en agua (relación suelo: H₂O 1:1 y 1:2.5) y en Cl₂Ca 0.01mol L⁻¹ (relación suelo: Cl₂Ca 1:1), la concentración Ca_i (Haby *et al.*, 1990), CIC (Chapman, 1965) y se calculó la saturación cálcica (S_{Ca}) (cociente entre el Ca_i y la CIC).

A la madurez de los cultivos se evaluó el rendimiento en los tres surcos centrales cubriendo 10m². El rendimiento se expresó a la humedad de recibo de cada cultivo: maíz (14.5%) y soja (13.5%). Además, se calculó el rendimiento relativo (RR) como el cociente entre el rendimiento obtenido para cada tratamiento con el rendimiento máximo por sitio y campaña, multiplicado por 100.

De los granos de soja y maíz cosechados de todas las parcelas se extrajo una muestra y a la misma se le determinó la concentración de N total, la cual se expresó en g 100g⁻¹.

>. ANÁLISIS DE DATOS:

Los datos se analizaron con modelos lineales simples (Pinhiero, 2007). Se ajustó un modelo que consideró como efecto fijo la dosis de CO₃Ca, y este se realizó por ensayo y campaña. Para realizar el análisis de varianzas se utilizó el programa R versión 33.1. (R core Team, 2022). A su vez, se utilizó el método del Arcoseno (ALLC) para hallar el umbral crítico de Ca_i y de S_{Ca}% para alcanzar un RR umbral de 90% (Correndo *et al.*, 2017).

>. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los rendimientos promedios en granos para diferentes sitios, campañas, cultivos y dosis de CO_3Ca . De los 21 ensayos realizados entre 2015 y 2020, en el 33% de los sitios se observó un efecto significativo del encalado ($p\text{-valor} < 0.1$), de los cuales 15% fueron cultivos de maíz y 18% de soja. La respuesta promedio en maíz y de soja fue de 2.3 y 1.4 Mg ha^{-1} , respectivamente (Tabla 1).

Por otra parte, se modeló el RR en función del pH, de la concentración de Ca_i y de la $\text{S}_{\text{Ca}\%}$ del suelo para el cultivo de maíz y de soja, sin embargo, solo se observó asociación significativa entre el RR del cultivo soja con la concentración de Ca_i y la $\text{S}_{\text{Ca}\%}$ (Figura 2). Para este cultivo se determinó un contenido crítico significativo de Ca_i y $\text{SB}_{\text{Ca}\%}$ para obtener el 90% de rendimiento relativo, de 8.1 meq 100 g^{-1} y de 65%, respectivamente.

Tabla 2. Rendimientos promedio en grano de soja, maíz para diferentes dosis de CaCO_3 y campañas.

Sitio	Cultivo	Dosis de CaCO ₃ (Mg ha ⁻¹)							
		0	0.25	0.5	1	2	4	6	p-valor
Campaña 2015/16									
1	S ₁	3.2	3.5	3.7	3.4	3.4	2.8	3.1	NS
2	M ₁	8.4b	9.7ab	10.4a	9.9a	9.9a	9.9a	9.8ab	0.02
4	S ₁	5.4	5.8	5.9	5.4	5.8	5.7	5.6	NS
5	S ₁	4.2b	4.5ab	4.5ab	4.3ab	4.5ab	5.9a	4.8ab	0.05
6	S ₁	5.9	5.3	5.1	5.6	5.1	5.2	5.9	NS
Campaña 2016/2017									
2	S ₁	4.3b	4.3ab	4.4ab	4.5ab	4.6a	4.5ab	4.2ab	0.009
3	M ₁	5.8	5.9	5.8	5.3	5.4	5.7	6.7	NS
4	S ₂	3.3	3.4	3.7	3.3	3.3	3.4	3.5	NS
5	M ₁	7.4b	7.2ab	7.6ab	7.2ab	8.8a	8.7b	8.3ab	0.05
6	M ₁	10.7	9.3	10.5	10.9	10.5	11.2	11.1	NS
Campaña 2017/2018									
2	S ₂	3.3	3.4	3.7	3.3	3.3	3.4	3.5	NS
3	S ₁	3.8b	4.4ab	4.4ab	4.3ab	4.7a	4.6ab	4.5ab	0.1
4	S ₁	3.2	3.5	3.4	3.6	3.5	3.4	3.7	NS
5	S ₁	1.1	1.1	0.8	0.8	1.3	1.2	0.9	NS
7	S ₁	0.7	1.9	1.1	2.2	1.3	1.7	1.5	0.17
8	M ₁	7.7b	7.6b	7.4b	7.6b	6.9b	5.9b	11.5a	1.10 ⁻⁵
9	M ₁	9.4	9.4	9.8	9.0	9.9	9.9	9.6	NS
10	S ₁	2.9	2.9	3.1	2.7	3.1	2.8	2.8	NS
Campaña 2018/2019									
5	M ₁	12.3	11.6	13.1	12.4	12.4	11.7	12.4	NS
7	M ₁	13.0	14.1	14.3	13.3	13.8	12.9	13.2	NS
8	S ₁	3.0	3.2	2.8	3.2	3.4	3.10	3.2	NS
9	M ₁	9.1	7.6	7.9	9.5	6.9	7.7	10.4	NS
Campaña 2019/2020									
7	S ₁	2.9	3.4	3.0	3.2	3.4	3.5	3.2	NS
8	M ₂	4.3	3.7	4.2	3.8	3.5	3.0	4.4	NS
9	M ₁	6.9	7.6	8.6	8.8	7.8	8.2	7.4	NS

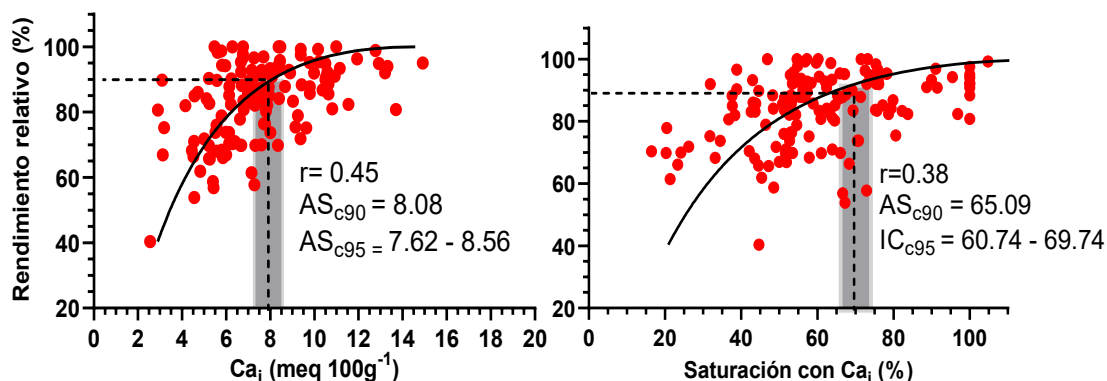


Figura 2. Relación entre el rendimiento relativo de soja en función de la concentración de calcio intercambiable (Ca_i) y la saturación cálcica en 0.10 m de profundidad. Las Líneas cortadas verticales indican el umbral crítico (UC) al 90% de rendimiento relativo, mientras que la región sombreada en gris representa su intervalo de confianza al 95%.

En el análisis de la concentración de nitrógeno en el grano de soja fue de $5.7 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$, mientras que para el maíz fue de $1.15 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Se evaluó el efecto del cambio de pH (en Cl_2Ca y H_2O) sobre el contenido de N en el grano de soja y maíz. No se observó relación entre la concentración de N en grano en ninguno de los dos cultivos y el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($p\text{-valor} < 0.05$), aunque si para el cultivo de soja con $\text{pH}_{\text{Cl}_2\text{Ca}}$ (1:1) (Figura 3). El pH medido en Cl_2Ca (1:1) explicó el un 24% de la variación del nitrógeno en el grano de soja (Figura 3). Además, la concentración de N en el grano de soja aumentó un 0.61% por cada unidad de aumento de pH.

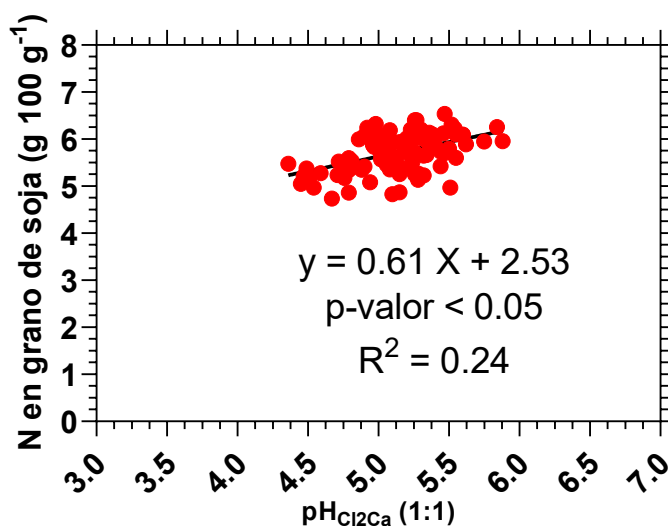


Figura 3. Relación entre el contenido de N en el grano de soja y el pH de suelo medido en cloruro de calcio (1:1).

A su vez, se ajustó una regresión múltiple entre el contenido de N en el grano de soja, el $\text{pH}_{\text{Cl}_2\text{Ca}}$ y el contenido de Ca_i (Tabla 2). El pH y el nivel de Ca_i en conjunto explicaron el 36% de la variación observada en el contenido de N en el grano (Tabla 2). Por lo tanto, los resultados hallados sugieren que suelos con un pH elevado y mayor concentración de Ca_i poseen una mayor disponibilidad de N para el cultivo de soja.

Tabla 2. Parámetros de modelo de regresión que relaciona la concentración de N en el grano de soja con la concentración de Ca intercambiable (Ca_i) y el pH medido en cloruro de calcio (pH_{Cl_2Ca}) para el estrato de suelo 0-10 cm.

Variable	Valores de los parámetros	p-valor	R ²
Intercepto	2.76	<0.05	0.36
Ca_i	0.07	<0.05	
pH_{Cl_2Ca}	0.49	<0.05	

>. DISCUSIÓN

El RR no se asoció consistentemente con el aumento de pH superficial del suelo, lo que podría ser explicado, en parte, por el pH relativamente alto del estrato subsuperficial (20-40cm) de los suelos de los diferentes sitios. A pesar de que el pH inicial del estrato 0-10 cm y 10-20 cm en todos sitios (datos no mostrados) estuvo por debajo de los valores críticos reportados por Pagani y Mallarino (2015) para los cultivos de soja y maíz (5.95 y 6.2 superficial, y 6.9 y 6.5 subsuperficial), el pH del estrato 20-40 cm estuvo por encima de 6.20. Según Pagani y Mallarino (2015) para suelos con pH subsuperficiales en el rango de 6.0-6.4, las respuestas del maíz y de la soja fueron cercanas o inferiores al 1%. De manera similar, Bianchini y Mallarino (2002) informaron respuestas inconsistentes al encalado en sitios con subsuelos calcáreos hasta los 91 cm de profundidad, incluso en suelos con pH ácidos (<6) en la capa superficial (0-15cm). Por lo tanto, el pH relativamente alto del estrato subsuperficial podría haber mitigado el efecto esperado del encalado como se ha documentado en estudios previos.

Se observaron asociaciones significativas entre el RR del cultivo de soja y el nivel de Ca_i del suelo (Figura2), lo cual puede estar explicado por los bajos contenidos de Ca_i iniciales de los ensayos. Estos hallazgos coinciden con otros trabajos realizados en molisoles de la RP que han reportado respuestas al agregado de Ca (Vivas y Fontanetto, 2003; Vázquez *et al.*, 2012; Vázquez y Pagani, 2014; Barbieri *et al.*, 2015).

El RR del cultivo de soja mostró aumentos con los incrementos en la $S_{Ca\%}$ y el valor crítico hallado en este trabajo es similar a lo hallado por Barbieri *et al.* (2015) y Eckert (1987), aunque superior a los valores hallados por Frageria (2008). Frageria 2008, informó aumentos de rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris*) para rangos de $S_{Ca\%}$ similares a los observados en este trabajo (18- 65%) aunque los máximos rendimientos se alcanzaron con $S_{Ca\%}$ del 53%. Las diferencias halladas pueden ser debidas a que Frageria (2008) trabajó en sistemas de labranza convencional con incorporación del material calcáreo con disco, mientras que en el presente trabajo la cal fue aplicada superficialmente sobre sistemas de siembra de directa (SD). En sistemas de SD, la mayor estratificación de nutrientes y la menor exploración de raíces provoca una mayor dependencia de los cultivos del estrato superficial de suelo. Por lo tanto, necesitan una mayor concentración en esa zona de nutrientes para asegurar un adecuado crecimiento (Subbulakshmi *et al.*, 2009).

Las leguminosas desempeñan un rol crucial tanto en sistemas naturales como agrícolas, ya que son responsables de una parte substancial del flujo global del N desde el N_2 atmosférico hacia otras formas orgánicas e inorgánicas en el suelo (Zahran, 1999). Las concentraciones de N en el grano de soja obtenidas en este estudio concuerdan con las informadas por Salvagiotti *et al.* (2008), quienes informaron contenidos de N en el grano de soja entre 3.84 y 8.08%. Además, dichos autores informaron que el contenido de N en soja es cuatro veces mayor que en los cereales y, en este trabajo la concentración promedio de N del grano de soja fue 4.7 veces superior al del maíz.

Aunque el pH del suelo no mostró asociación significativa con el RR de los cultivos, si presentó asociación con la concentración de N en el grano de soja (Figura 3). Taylor *et al.* (1991) informaron que la

colonización y nodulación de las raíces de soja por las cepas de *Bradyrhizobium japonicum* pueden verse severamente afectadas por la acidez del suelo. En este mismo sentido, Gutierrez-Boem y Salvagiotti (2014) informaron que la acidez de suelo disminuye no solo la infección y formación de los nódulos, sino también la supervivencia de los rizobios en el suelo. Estos resultados sugieren que el encalado del suelo puede mejorar la calidad industrial de la soja.

Además de la acidez, la fijación biológica de N también se ve afectada por el bajo contenido de Ca. Mientras que la acidez del suelo afecta la fijación de N, el Ca es fundamental para la formación y estabilidad del nódulo en las raíces. Un déficit de Ca afecta la integridad estructural de los nódulos, reduciendo su capacidad de alojar a las bacterias fijadoras (Zahram, 1999). Además, el Ca está involucrado en la señalización celular y en la regulación de diversos procesos fisiológicos, lo que puede impactar en la comunicación entre la planta y las bacterias para una simbiosis eficaz (Zahran, 1999; Dakora y Phillips, 2002). Los resultados hallados en este trabajo sugieren que la corrección de ambos factores (Ca y pH) mediante el encalado podría ser una estrategia eficaz para mejorar el rendimiento y la calidad industrial del grano de soja por mayor rendimiento de proteína.

>. CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo muestran un 33% de respuesta al encalado, siendo la misma en promedio de 2.3 en maíz y 1.4 Mg ha⁻¹ en soja. Además, fue posible ajustar un nivel crítico de Ca_i y de S_{Ca%} de 8 meq 100 g⁻¹ y 65% para soja, respectivamente. Si bien el aumento de pH del suelo por el encalado no impactó directamente en el rendimiento de los cultivos, afectó indirectamente la disponibilidad de N en soja, ya que se determinaron incrementos en el contenido de N en el grano.

>. BIBLIOGRAFIA

- Espinosa J.; Molina, E.** 1999. Acidez y encalado de los suelos. Inpofos. DOI:[10.13140/2.1.3888.9281](https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281)
- Godsey, C.B.; Pierzynski, G.M.; Mengel, D.B.; Lamond, R.E.** 2007. Evaluation of common lime requirement methods. SSSA. 71:843-850. DOI: [10.2136/sssaj2006.0121](https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0121).
- Pagani, A.; Mallarino, A. P.** 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. Agron. J. 107(1), 71-82. DOI: [10.2134/agronj14.0314](https://doi.org/10.2134/agronj14.0314).
- Sainz Rozas, H.; Eyherabide, M., Echeverría, H.E.; Barbieri, P.A.; Angelini, H.P.; Larrea, G.E.** 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En: García F.O., Correndo, A.A (Eds.), Simposio Fertilidad 2013. Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable.
- Vivas, H.; Fontanetto, H.** 2003. Fósforo, azufre y calcio en la producción de soja en el departamento San Justo. 2002/2003. INTA, EEA Rafaela. Información Técnica de Cultivos de Verano. Campaña 2003. Publicación Miscelánea N°100, N°15. 5p.
- Vázquez, M.; Pagani, A.** 2014. Calcio y Magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. Cap. 11: 317-350. En: Fertilidad de los suelos y Fertilización de Cultivos. H. Echeverría y F. García (eds). Balcarce: Ediciones INTA. pp. 317-350.
- Gutierrez Boem F.H.; Salvagiotti, F.** 2014. Soja. En: Fertilidad de los suelos y Fertilización de Cultivos. H. Echeverría y F. García (eds). Balcarce: Ediciones INTA. pp 479-507.
- Chapman, H.D.** 1965. Cation-exchange capacity, in: Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 891-901.
- Haby, V.A.; Russelle, M.P.; Skogley, E.O.** 1990. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium in: Westerman, R.L. (Ed.). Soil testing and plant analysis. 3rd ed. SSSA Book Ser. 3. SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 181-227.
- Pinheiro, J.; Bates, D.; DebRoy, S.; Sarkar, D.; Team, R.C.** 2007. Linear and nonlinear mixed effects models. R package version, 3(57), 1-89.

- R Core Team.** 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from: <https://www.R-project.org/>.
- Correndo, A.A., F. Salvagiotti, F.; García, F.O.; Gutiérrez-Boem, F.H.** 2017. A modification of the arcsine–log calibration curve for analysing soil test value–relative yield relationships. *Crop Pasture Sci.* 68:297-304. DOI: [10.1071/CP16444](https://doi.org/10.1071/CP16444).
- Bianchini, A. A.; Mallarino, A. P.** 2002. Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean–corn rotation. *Agon J.*, 94(6), 1355-1366. DOI: [10.2134/agronj2002.1355](https://doi.org/10.2134/agronj2002.1355).
- Vázquez, M.; Pagani, A.** 2014. Calcio y Magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. Cap. 11: 317-350. En: *Fertilidad de los suelos y Fertilización de Cultivos*. H. Echeverría y F. García (eds). Balcarce: Ediciones INTA. pp. 317-350.
- Vázquez, M.; Terminiolo, A.; Casciani, A.; Millán, G.; Gelati, P., García Díaz, J.; Kostiria, J.; García, M.** 2012. Evaluación del efecto de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago Sativa*) y propiedades edáficas en ámbitos templados argentinos. *Cienc. Suelo.* 28, 141-154. .
- Barbieri, A.P.; Sainz Rozas, H.; Echeverria, H.E.** 2015. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. *Soil Tillage Res.* 152: 29-38. DOI: [10.1016/j.still.2015.03.013](https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.013).
- Eckert, D. J.** 1987. Soil test interpretations: basic cation saturation ratios and sufficiency levels. *Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation.* 21, 53-64.
- Fageria, N. K.** 2008. Optimum soil acidity indices for dry bean production on an Oxisol in no-tillage system. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 39(5-6), 845-857. DOI: [10.1080/00103620701880909](https://doi.org/10.1080/00103620701880909).
- Subbulakshmi, S.; Saravanan, N.; Subbian, P.** 2009. Conventional tillage vs conservation tillage—a review. *Agric. Rev.* 30(1), 56-63.
- Taylor, RW; Williams, ML; Sistani, KR.** 1991. N₂ fixation by soybean-Bradyrhizobium combinations under acidity, low P and high Al stresses. *Plant Soil.* **131**, 293–300 (1991). DOI: [10.1007/BF00009461](https://doi.org/10.1007/BF00009461).
- Zahran, H. H.** 1999. Rhizobium-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *MMBR.* 63(4), 968-989. DOI: [10.1128/MMBR.63.4.968-989](https://doi.org/10.1128/MMBR.63.4.968-989).
- Dakora, F. D.; Phillips, D. A.** 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant Soil.* 245(1), 35-47. DOI: [10.1023/A:1020809400075](https://doi.org/10.1023/A:1020809400075).

Evaluación de fertilizantes orgánico y biológico aplicados en el cultivo de trigo

► ► **Vicente Gudelj, Maria Belén Conde, Claudio Lorenzon y Olga Gudelj**

Técnicos de la EEA INTA Marcos Juárez

✉ gudelj.vicente@inta.gob.ar

>. INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes orgánicos, también llamados abonos orgánicos, y los fertilizantes biológicos son una alternativa complementaria a los fertilizantes químicos, pudiendo suplantarlos en cierta medida. Los fertilizantes orgánicos pueden ser de origen animal, vegetal o mineral; sólidos o líquidos y de aplicación directa al suelo o aplicación foliar. Los fertilizantes biológicos contienen microorganismos vivos que favorecen el crecimiento de las plantas y se pueden aplicar en pre siembra, durante la siembra o en pos emergencia temprana de los cultivos. La utilización de los residuos orgánicos, además de aportar nutrientes, tiene valor como enmienda ya que esencialmente contribuyen a mantener o mejorar la cantidad y la calidad de la materia orgánica del suelo, y en consecuencia, otras propiedades asociadas como estructura, capacidad de intercambio, actividad biológica, disponibilidad de agua, control de la erosión etc. (Mazzarino, 2014). También su utilización permite el reciclaje evitando contaminación de aguas y suelos por lixiviación puntual y la producción de gases efecto invernadero principalmente metano (Schulz y Romheld, 1997). Existen empresas en el país que desarrollan y ofrecen este tipo de fertilizantes; una de ellas, es la Empresa Biosoluciones con la cual el INTA Marcos Juárez llegó a un acuerdo en el ciclo 2024-25 para la evaluación de sus productos. **OBJETIVO:** evaluar la respuesta productiva del cultivo de trigo por la aplicación del biofertilizante sólido Sinergia incorporado al suelo y en superficie total, y del fertilizante biológico líquido Soil Plus en post-emergencia temprana.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Se condujo un experimento a campo en condiciones de secano en un suelo Argiudol típico de la serie Marcos Juárez. El cultivo se implantó en siembra directa y los tratamientos evaluados fueron:

- 1) FERT. N PRODUCTOR (FNP)
- 2) FERT. BASE PRODUCTOR + FERT. N PRODUCTOR (FBP + FNP)
- 3) FERT.SINERGIA SUPERFICIAL (300 kg/ha) + FERT. N PRODUCTOR (FSS+FNP)
- 4) FERT. SINERGIA INCORPORADA (300 kg/ha) + FERT.N PRODUCTOR (FSI + FNP)
- 5) FERT.BASE PRODUCTOR + FERT. N PRODUCTOR + 8 LITROS SOIL⁺ (FBP + FNP + (8 SOIL)
- 6) FERT. SINERGIA INCORPORADA (230 Kg/ha) + FERT.N PRODUCTOR + 8 LITROS SOIL⁺

SINERGIA: compost sólido elaborado a partir de un proceso de compostaje de guano, que luego se pelletiza de manera de lograr una alta calidad agronómica, favoreciendo el transporte y una calidad homogénea. Es un producto altamente soluble que reacciona rápidamente en el suelo en contacto con la humedad.

SOILS PLUS: fertilizante biológico con altos contenidos de compuestos húmicos que además contiene microorganismos específicos (*Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* y *Azospirillum*) que fundamentalmente favorecen el crecimiento radicular y la nutrición del cultivo.

La composición de ambos productos se especifica en la tabla1. El sitio experimental permaneció libre de malezas durante todo el ciclo. No fue necesario aplicar insecticidas ni fungicidas. Las parcelas tuvieron 4 m de ancho por 10 m de largo (40 m²) y se cosechó en la parte central de las mismas 1,26 m x 10 m (12,6 m²). El diseño experimental fue de bloques completos al azar con 4 repeticiones. Para la aplicación del fertilizante foliar se utilizó picos con cono hueco y un caudal de 115 litros/ha. Pevio a la siembra del cultivo se realizó un muestreo de suelo de 0-18 cm de profundidad para evaluar propiedades químicas y se tomaron muestras de suelo hasta 1,5 m de profundidad para determinar agua útil. Las variables evaluadas fueron peso de 1000 granos, peso hectolitrico, rendimiento (kg/ha) y proteína (%). Con los valores obtenidos de los parámetros evaluados se realizó un análisis de variancia y se compararon los promedios con el test LSD de Fisher con nivel de significación del 5%. Se utilizó el software Infostat (Di Rienzo, 2022).

Tabla1. Composición de los productos evaluados-Análisis enviado por la empresa a Senasa

COMPOSICIÓN	FERTILIZANTE		FERTILIZANTE	
	SINERGIA		SOIL PLUS	
Materia orgánica/producto seco	39,5	g/100 g	66,3	g/100 g
pH	7,9		7,5	
Conductividad	2	mS/cm	2	mS/cm
Extractos húmicos totales	6,1	g/100 g	0,42	g/100 g
Fosforo asimilable	0,83	g/100 g	0,04	g/100 g
Potasio soluble	0,7	g/100 g	0,005	g/100 g
Nitrógeno	1,5	g/100 g	0,7	g/l
Azufre	-		0,3	g/l
Calcio	1,3	g/100 g	7	g/l
Magnesio	1	g/100 g	0,36	g/l
Manganeso	-		0,07	g/l
Zinc	0,02	g/100 g	0,04	g/l

Las características generales y manejo de cada sitio se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Características generales y manejo del sitio experimental

CARACTERISTICAS		
Tipo de suelo	Clase I	Argiudol Típico
Años de agricultura	40	
Años en siembra directa	24	
Antecesor	soja	
Control de malezas pre-siembra	1,8 l round up + 200 cc dicamba + 15 g finesse	
Fecha de implantación	7-06-2024	
Variedad utilizada	MS INTA 221	
Densidad	110 kg de semillas/ha	
Fertilización de base del productor	80 Kg/ha Micro Essentials Zn	
Fertilización Nitrogenada	Previo a la siembra se aplicó 220 litros de Solmix 80-20 en todos los tratamientos.	

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3 se muestran los resultados de análisis de suelo realizado en el laboratorio de química de INTA Marcos Juárez, y de agua útil hasta 1,5 m de profundidad determinado por el laboratorio de física de INTA Marcos Juárez. En la tabla 4 se presentan las precipitaciones durante el ciclo del cultivo. El análisis químico mostró que el suelo era levemente ácido, con fertilidad media en cuanto a materia orgánica, nitrógeno y zinc. La provisión de azufre fue regular, mientras que la disponibilidad de fósforo fue alta. El perfil del suelo se recargó con las precipitaciones ocurridas desde madurez fisiológica del cultivo anterior hasta el momento de siembra, totalizando 228 mm de agua útil hasta 1,5 m de profundidad, lo que permitió sobrellevar los meses de junio a setiembre, que transcurrieron con escasas precipitaciones. En tanto que en octubre las mismas fueron abundantes y oportunas permitiendo, en parte, una recuperación del cultivo en su última etapa de crecimiento (Tabla 4).

Tabla 3. Resultados de análisis químico y agua útil

VARIABLE	VALOR OBTENIDO
pH en Agua (1:2,5)	5,7
Conductividad Eléctrica. (1:2.5) mS/cm/25°C	0,12
Materia Orgánica %.	3
Nitrato ppm	53
Nitrógeno total %	0,150
Fósforo asimilable mg/Kg	26
Azufre de Sulfatos mg/Kg	9,4
Zinc (Extr. DTPA) mg/Kg	1,2
Agua útil (mm) hasta 1,5 m de profundidad en momento de siembra	228

Tabla 4. Precipitaciones durante el ciclo del cultivo (mm)

MES	junio	julio	Agosto	setiembre	octubre	noviembre
Precipitaciones	0	0,5	26	0,5	210	97

FUENTE: Agro meteorología, EEA INTA Marcos Juárez – Tco. Patricio Barrios

El análisis de variancia resultó no significativo para las variables peso de mil semillas (p-valor 0.2990) y porcentaje de proteína (p-valor 0.923), pero fue significativo para peso hectolitrico (p-valor: 0.0270) y rendimiento (p-valor 0.0143), donde el test LSD Fisher (Alfa=0,05) mostró diferencias significativas entre tratamientos (figuras 1 y 2). En el caso del peso hectolitrico si bien existen diferencias significativas entre los tratamientos, no lo son desde el punto de vista de la comercialización, dado que los valores hallados están todos en grado 2 de comercialización por lo que no reciben ni bonificación ni rebaja. En cuanto a los rendimientos obtenidos, hubo respuesta a la fertilización de base, fertilización de arranque del productor (80 Kg/ha Micro Essentials Zn). El tratamiento base del productor + nitrógeno superó significativamente al tratamiento del productor, que solo recibió fertilización nitrogenada, en un 14,2 %. Similar resultado se obtuvo cuando se utilizó de base el bio-fertilizante Sinergia incorporado + fertilización nitrogenada que no difirió en rendimiento con el tratamiento base del productor, pero fue significativamente superior al tratamiento del productor que solo recibió fertilización nitrogenada. Esto no ocurrió cuando el bio-fertilizante Sinergia se aplicó en superficie sin incorporar, cuyo rendimiento fue significativamente menor. El análisis de suelo previo a la siembra indicó valores suficientes de azufre, medios de cinc y altos de fósforo, pero hay que considerar que, en siembra directa, producto de la acumulación de rastrojos, pueden darse menores temperaturas en superficie (Marelli et al., 1981; Mengel, D., 1985). También en siembra directa continua (Gudelj et al., 2002) observaron una mayor densificación del suelo entre los 7 y 17 cm de profundidad. Por otro lado, dosis de 12 kg/ha de P2O5 aplicadas como arrancador en forma localizada resultaron importantes en el desarrollo inicial del cultivo de trigo, especialmente en siembra directa (Gudelj et al., 1994). Con todo, una pequeña cantidad de fósforo cercano a la línea de siembra podría estimular el crecimiento radicular beneficiando también el crecimiento del cultivo. Dado los resultados del experimento que estamos analizando tanto la aplicación de la fertilización de base del productor como la aplicación localizada del fertilizante orgánico Sinergia tuvieron un efecto arrancador que mejoró el rendimiento del cultivo de trigo.

La aplicación del fertilizante biológico líquido Soil Plus en post-emergencia temprana no aportó una mejora en los rendimientos, e incluso visualmente se observó, aunque mínimamente, un menor volumen de planta-follaje en los tratamientos 5 y 6 que lo contenían, respecto de los similares, pero sin fertilizante biológico líquido foliar Soil (tratamientos 2 y 4), sugiriendo la necesidad de evaluar diferentes dosis, formas y momentos de aplicar el producto.

PESO HECTOLITRICO

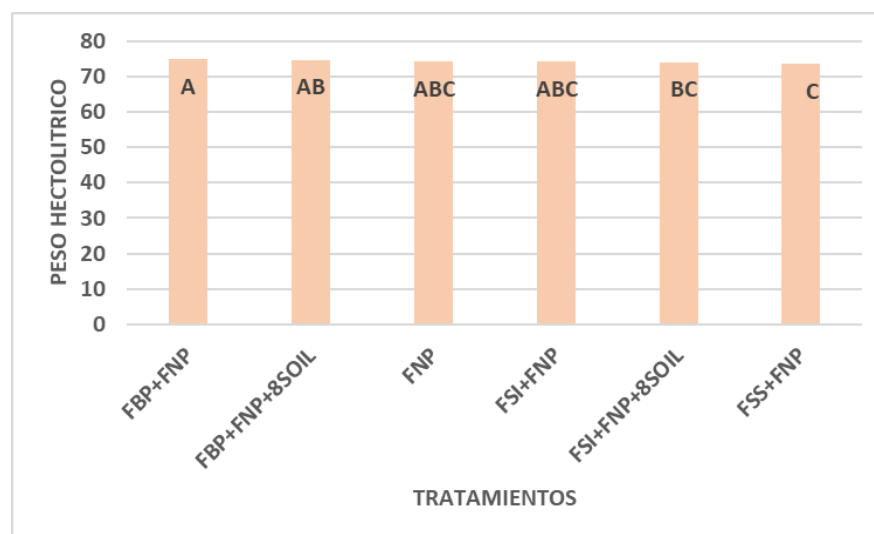


Figura 1: Peso Hectolitrico. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$). DMS=0.74820

RENDIMIENTO (kg/ha)

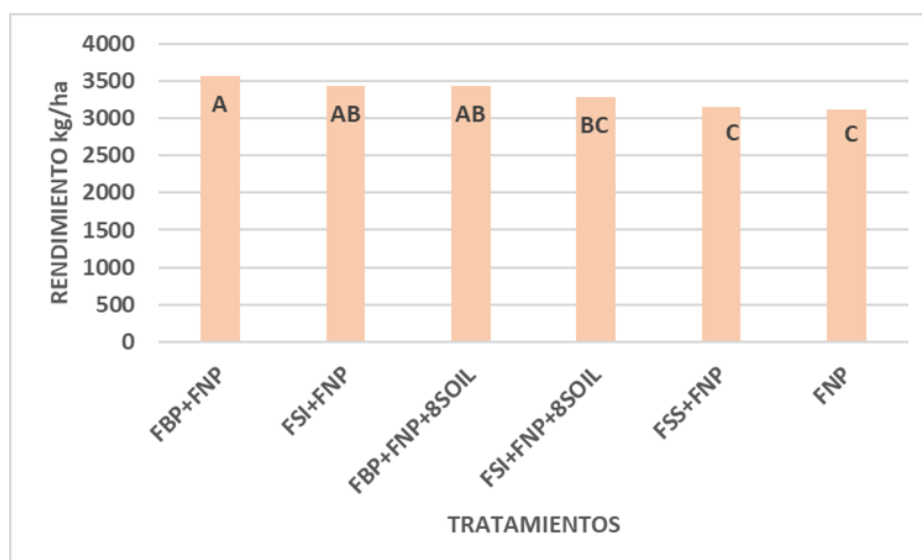


Figura 2: Rendimiento. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)
DMS=260.08918

>. CONCLUSIONES

- No hubo efecto de los tratamientos sobre el peso de mil granos, ni sobre el porcentaje de proteína.
- Si bien hubo diferencias significativas entre tratamientos en el peso hectolitrico, estos no tuvieron relevancia desde el punto de vista de la comercialización del trigo.
- Hubo respuesta en los rendimientos por la aplicación de fertilización de base (fertilización de arranque).
- El bio-fertilizante Sinergia, cuando se incorporó al suelo, igualó los rendimientos de la aplicación de la fertilización base del productor incorporada. Esto no ocurrió cuando el bio-fertilizante Sinergia se aplicó en superficie sin incorporar.
- La aplicación del fertilizante foliar Soil Plus no mejoró los rendimientos en ningún caso, sugiriendo necesaria la evaluación de diferentes dosis, formas y momentos de aplicación de este producto.

>. BIBLIOGRAFÍA

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., González L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2022. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Gudelj, V.; C. Galarza; G. Spoturno; P. Vallone; O. Gudelj; B. Masiero y H. Ghío. 2002. "16 años de experiencias de fertilización en Siembra Directa. Ensayo de larga duración". En Actas del X Congreso Nacional de Siembra Directa.

Gudelj, V.; C. Galarza; P. Novello; Gaci Ayub; A. Legasa; H. Ghio y J. Romagnoli. 1994. Fertilización del cultivo de trigo en siembra directa" Hoja Informativa Nº 255, EEA INTA Marcos Juárez.

Marelli, H., B. Masiero, Lattanzi, A. 1981. La temperatura del suelo y sus relaciones con el sistema de labranza. Informe Especial Nº 14. INTA. EEA Marcos Juárez.

Mazzarino, M.J. 2014. Fuentes alternativas de nutrientes. Pp 827-838. En H. E. Echeverría y F. O. García (eds.). Fertilidad de suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.

Melgar, R. y M.E. Camozzi. 2002. Guía de Fertilizantes, Enmiendas y Productos Nutricionales. INTA-FERTILIZAR.

Mengel, D. 1985. P and K fertilization for reduced tillage. Better crops with plant food. PPI Vol 69 p 10. Atlanta GA.

Schulz, R. y V. Romheld. 1997. Recycling of municipal and industrial organic wastes in agriculture: benefits, limitations, and means of improvement. Soil Sci. Plant Nutr. 43:1051-1056.

Incorporación de nitrógeno en trigo. Moda actual o necesidad? Nitrogen incorporation in wheat: current trend or necessity?

INTA EEA PERGAMINO

► ► **Ings. Agrs. Gustavo N. Ferraris⁽¹⁾ & Fernando J. Mousegne⁽²⁾**

1.INTA EEA Pergamino.Av Frondizi km 4,5 (B2700WAA) Pergamino. 2.AER San Antonio de Areco

✉ ferraris.gustavo@inta.gob.ar

>. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial que participa en la síntesis de proteínas, clorofila y enzimas, lo que favorece el desarrollo vegetativo y la producción de grano. Su aplicación adecuada mejora el contenido proteico del trigo, lo que es especialmente relevante para su uso en panificación. El N ayuda a la expansión y duración del área foliar, mejora la fotosíntesis y la captura de luz.

La incorporación de nitrógeno (N) en trigo es una práctica agronómica importante para maximizar el rendimiento y la calidad del cultivo. La concurrencia de ciclos secos entre el año 2020 y 2024 ha motivado un gran incremento en esta práctica, en especial en zona núcleo pampeana y la región oeste, donde los inviernos son secos y con precipitaciones erráticas. La remoción que genera esta incorporación estimula la mineralización, permite romper compactaciones superficiales y aumenta la temperatura de los suelos. Con incorporación, el daño por frío en pasto es atenuado considerablemente. No obstante, esta labor es costosa, insume tiempo y muchas veces quita humedad para la emergencia.

El objetivo de este experimento es comparar, durante tres campañas, el efecto de la incorporación y el momento de aplicación de nitrógeno en trigo, bajo tres dosis de aplicación. Hipotetizamos que 1. La incorporación de N incrementa los rendimientos, y 2. Si existen lluvias posteriores, en el norte de Bs As es posible realizar aplicaciones en macollaje sin afectar los rendimientos respecto del uso al momento de la siembra.

Palabras clave: trigo, localización, momento de aplicación.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los años 2021, 2023 y 2024 se condujo un experimento de campo en la EEA INTA Pergamino, sobre un suelo Serie Pergamino, Clase I-2, Argiudol típico, familia fina, illítica, térmica (USDA- Soil Taxonomy V. 2006). En la Tabla 1 se describen algunas características de manejo. Todos los experimentos recibieron fertilización fosforada y azufrada a la siembra, para que estos elementos no limiten la producción. Se evaluaron dosis, momentos y localización de nitrógeno, utilizando como fuente urea granulada. En el caso del tratamiento superficie-siembra, la aplicación se realizó previa a la siembra. Los tratamientos con N en superficie no recibieron remoción, por lo que la incorporación refleja el efecto de movimiento de suelo y el N incorporado. La incorporación se realizó mediante una pasada previa con la propia sembradora, incorporando urea en sus diferentes dosis.

El fósforo (P) se aplicó incorporado en línea, mientras que el azufre (S) en cobertura total, pocos días antes de la siembra. Se utilizó un diseño estadístico en bloques completos al azar con 4 repeticiones. Se realizó una aplicación foliar para el control de enfermedades, en el estado Zadoks 37. Las adversidades bióticas alcanzaron baja relevancia y no limitaron el rendimiento. Una descripción de las condiciones de sitio y suelo se presenta en la Tabla 1. Los tratamientos evaluados se describen en la Tabla 2.

Tabla 1: Descripción de los experimentos y su disponibilidad de agua y nutrientes

Fertilización fosforada	Año 2021	Año 2023	Año 2024
Variedad	DM Catalpa	Baguette 610	DM Araucaria
Fecha de siembra	16-Junio	17-Junio	21-Junio
P en suelo (mg kg⁻¹) (0-20 cm)	8,9	10,1	19,7
N en suelo (kg ha⁻¹) (0-60 cm)	83,4	44,2	43,8
Agua a la siembra (mm) (0-100 cm)	159	130	127

Tabla 2: Tratamientos evaluados en los experimentos. INTA Pergamino.

Trat	Momento	Localización	Dosis N
T1	-----	-----	0 kg ha ⁻¹
T2	siembra	superficie	40 kg ha ⁻¹
T3	siembra	superficie	80 kg ha ⁻¹
T4	siembra	superficie	160 kg ha ⁻¹
T5	macollaje	superficie	40 kg ha ⁻¹
T6	macollaje	superficie	80 kg ha ⁻¹
T7	macollaje	superficie	160 kg ha ⁻¹
T8	siembra	incorporado	40 kg ha ⁻¹
T9	siembra	incorporado	80 kg ha ⁻¹
T10	siembra	incorporado	160 kg ha ⁻¹

La cosecha se realizó en forma mecánica, recolectando la totalidad de la parcela. Se recontaron espigas, y sobre una muestra de grano se evaluaron los componentes del rendimiento -número (NG) y peso (PG) de los granos-. Los resultados se analizaron mediante análisis de varianza y comparaciones de medias (DCG $\alpha=0,05$). Los análisis de proteína se realizaron mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), sobre una muestra compuesta proveniente de las cuatro repeticiones.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los años 2021, 2023 y 2024 presentaron un patrón común. En general se trata de un ciclo seco, con precipitaciones por debajo de la media (Figura 1). El más favorable sería 2023, aunque con la ocurrencia de una helada de moderada severidad en espigazón. La reserva de agua inicial fue intermedia, entre 40 y 50 % AU (Tabla 1).

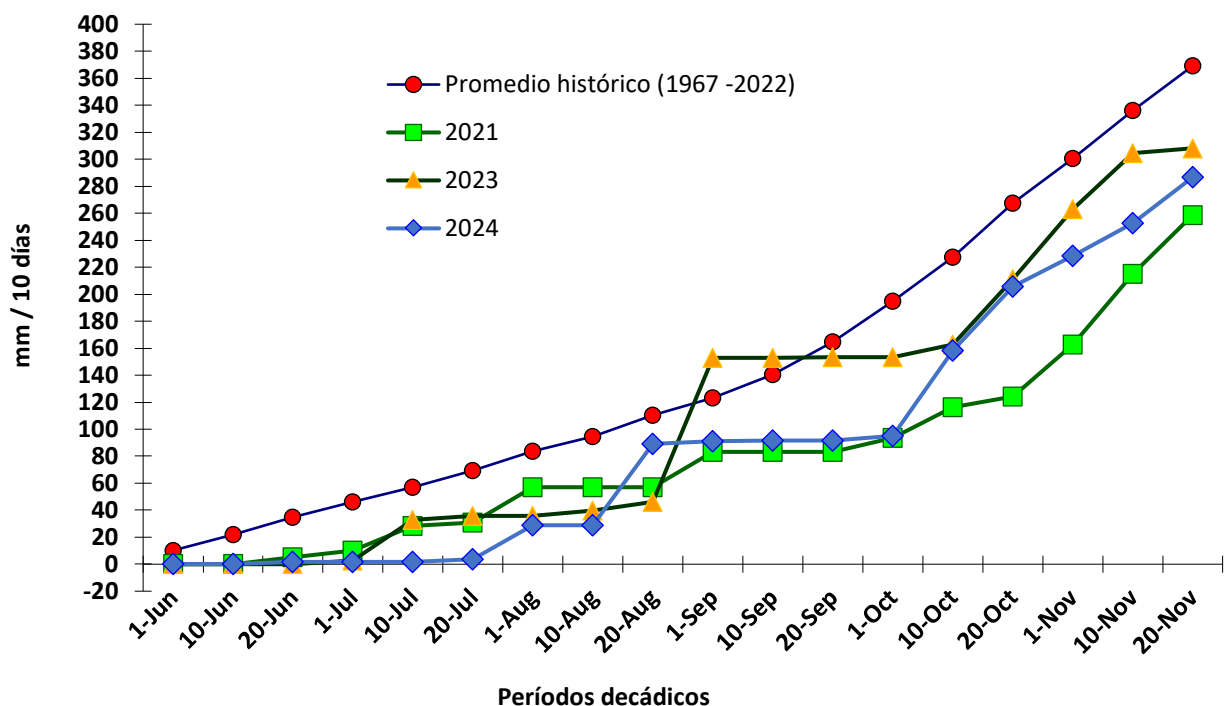


Figura 1: Precipitaciones entre junio y noviembre para la campañas 2021, 2023 y 2024. Pergamino, valores acumulados cada 10 días en mm. Nótese la persistencia de un ciclo seco, con lluvias por debajo de la media.

En todas las campañas se determinaron respuestas significativas a N (Figura 2). En la campaña 2021 el rendimiento medio fue de 6075 kg ha⁻¹, y la proteína de 10,6 %. Se observó una respuesta general a dosis (Figura 2.a), con una tendencia a la saturación de respuesta a N80. Las aplicaciones de macollaje o incorporadas mostraron un comportamiento superior a los tratamientos de siembra en superficie (Figura 2.a). El rendimiento máximo se obtuvo en N160 para macollaje, y N80 para siembra incorporado. La proteína alcanzó valores medios, con prevalencia de los tratamientos en macollaje.

En año 2023, rendimiento medio fue de 6196 kg ha⁻¹, y la proteína de 11,6 %. Nuevamente, se presentó un suave incremento de productividad con la dosis, aunque los rendimientos fueron muy altos aún en el N0 (Figura 2.b). La mayor respuesta a dosis se comprobó con fertilización en superficie a la siembra. Los tratamientos de siembra presentaron sutiles ventajas respecto de los de macollaje. Esto podría estar asociado a las escasas precipitaciones hasta finales de agosto (Figura 1). En la dosis mínima, la incorporación tuvo un impacto significativo. En la dosis máxima, fue posible aplicar el fertilizante a la siembra en superficie. La proteína presentó valores altos evidenciando un uso muy conservativo del N.

Los rendimientos en 2024 fueron más limitados (Figura 2.c), combinación de baja AU a la siembra y lluvias que regresaron en octubre (Figura 1). Aun así, se comprobó una fuerte respuesta a la fertilización nitrogenada, en rendimiento hasta N80 y en calidad hasta N160 (Figura 2.c). La incorporación de N demostró un impacto significativo, aunque con cierta dilución de la proteína.

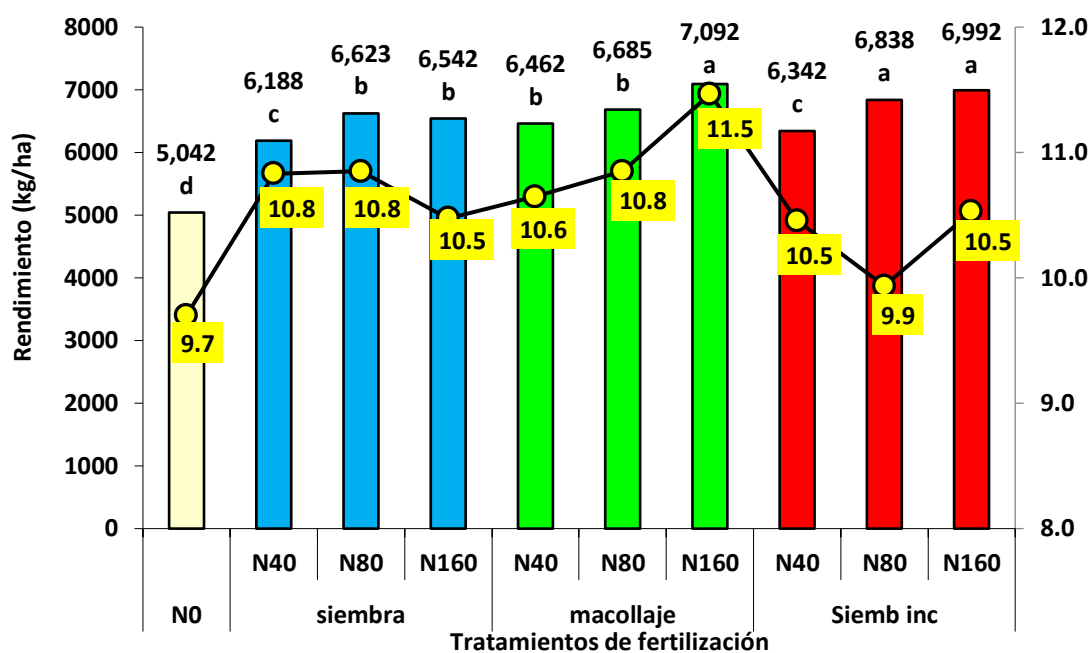


Figura 2.a

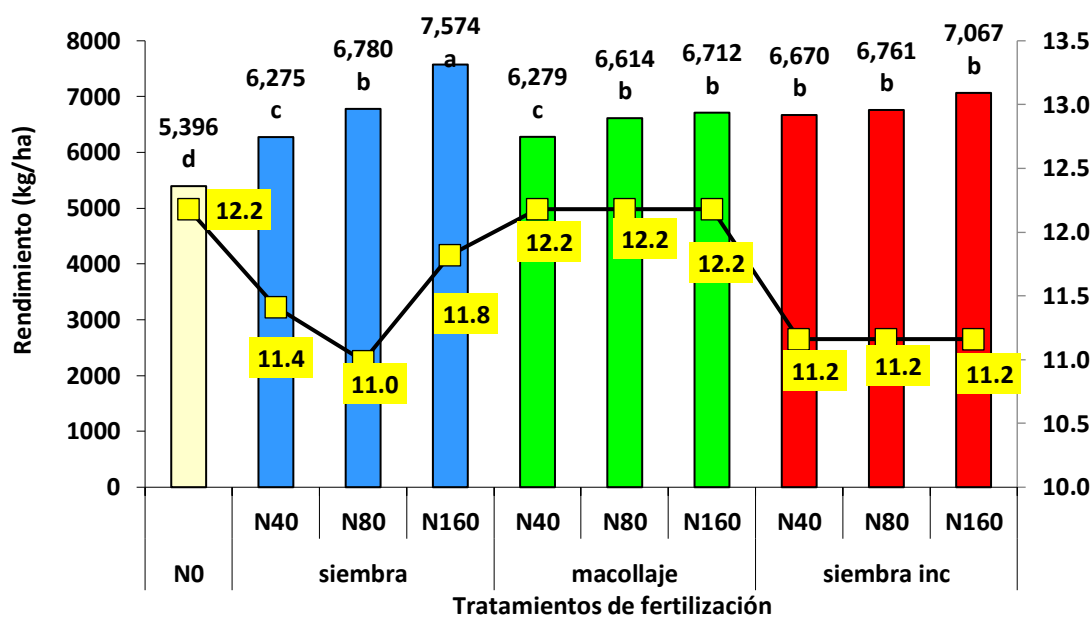


Figura 2.b

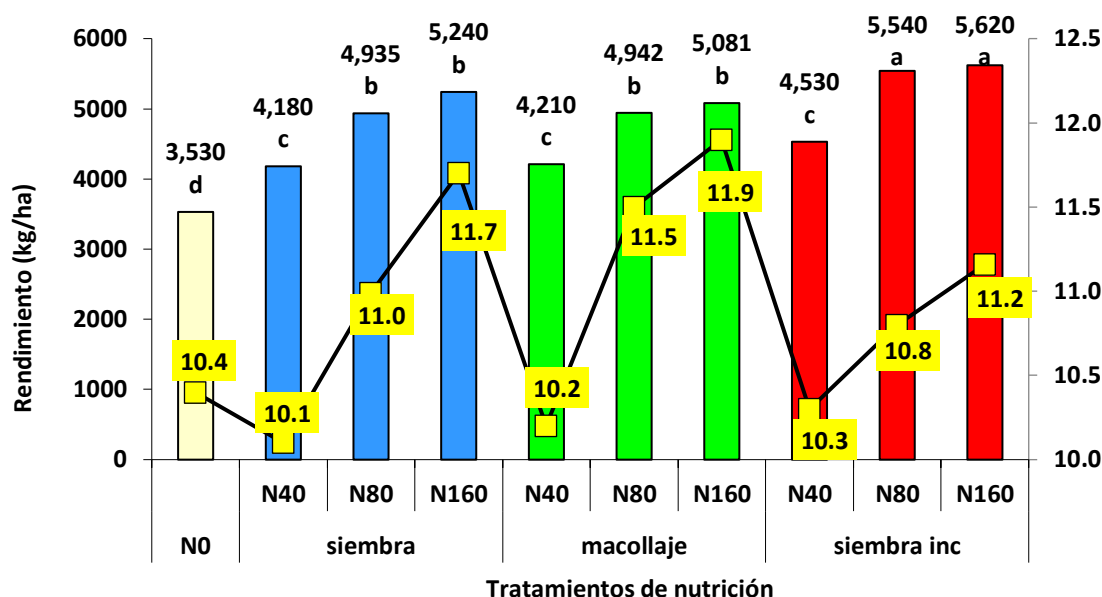


Figura 2.c

Figura 4: Rendimiento medio de trigo según dosis, momentos y localización de nitrógeno. Campañas 2021(a), 2023 (b) y 2024 (c). Para la variable rendimiento, letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos (DCG $\alpha=0,05$).

>. CONCLUSIONES

Si bien el factor más determinante de los rendimientos es la dosis, la tecnología de fertilización entendida como el tiempo y la forma en que se aplica el N, resultó determinante para los rendimientos finales y la concentración de proteína del grano cosechado. El presente ciclo climático, seco y frío, mejora el comportamiento relativo de la incorporación y establece un uso conservativo del N, con buenos balances entre rendimiento y calidad. El desempeño de los tratamientos en macollaje depende de la ocurrencia de precipitaciones de finales de invierno e inicios de primavera.



Fotografía 1: Trigo 2024, en plena encañazón.



Fotografía 2: Vista superior cercana de los tratamientos T6 (izquierda) y T1 (derecha).

>. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- * Alfonso, A. A. O., Gaona, R. Y. M., Rojas, A. J. A., Brítez, N. R. F., & Quintana, L. A. (2025). Dosis y momentos de aplicación de nitrógeno en trigo (*Triticum aestivum* L.). *Revista Científica de la UCSA*, 12(1), 24-30.
- * Kunal, Gosal, S. K., Choudhary, R., Singh, R., & Adholeya, A. (2021). Improving nitrogen use efficiency using precision nitrogen management in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(3), 371-377.
- * Liu, H., Mi, X., Wei, L., Kang, J., & He, G. (2024). Integrated nitrogen fertilizer management for improving wheat yield and the efficiency of water and nitrogen fertilizer use. *European Journal of Agronomy*, 159, 127264.
- * Lopez de Sabando, M. J., Erreguerena, J. M., Besteiro, I., Leaden, K. A., Loizaga, U., & Diaz-Zorita, M. (2023). Fertilización combinada con nps-zn en avena, cebada y trigo. *Ciencia del suelo*, 41(2), 180-192.
- * Mălinaș, A., Vidican, R., Rotar, I., Mălinaș, C., Moldovan, C. M., & Proorocu, M. (2022). Current status and future prospective for nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 11(2), 217.
- * Zhang, L., Xing, X., & Zhang, Y. (2023). Advancements in nitrogen nutrition research in wheat. *Advances in Resources Research*, 3(4), 178-194.

Producción de forraje y eficiencia en el uso del agua en pastura fertilizada con fósforo y azufre

► ► **Fernández R^{1,2*}, Kloster N^{1,2}, Calabaza E¹, Gomez R y Gutierrez P.¹**

¹ INTA Anguil

² Fac Agronomía UNLPam

✉ fernandez.romina@inta.gob.ar

RESUMEN

Debido a la importante respuesta de nutrientes en la producción de alfalfa se estableció como objetivo de trabajo evaluar la producción y eficiencia en el uso del agua en alfalfa con la incorporación de fertilizante fosforado y azufrado. Sobre Paleustol Petrocálcico de la región semiárida pampeana, se estableció una pastura de alfalfa (7 kg ha^{-1}) en el 2023. En septiembre 2023 y febrero 2024 se instalaron los tratamientos de fertilización, los mismos fueron: $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ (9P) - $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P con S}$ (9P S), $18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ (18P) - $18 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P con S}$ (18P S) y $36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}$ (36P) - $36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P con S}$ (36P S). Se determinó biomasa aérea (en ocho cortes desde la implantación), uso consuntivo y eficiencia en el uso del agua. En el tratamiento 9P se cuantificó un 12% más de biomasa cuando se fertilizó con S. Para el tratamiento 18P el agregado de azufre provocó un 6% más de producción de biomasa. En cambio, en 36P no hubo respuesta al agregado de S. La eficiencia en el uso del agua promedio también tuvo relación con el agregado del fertilizante azufrado.

PALABRAS CLAVE: región semiárida pampeana, alfalfa, nutrientes.

>. INTRODUCCIÓN

La alfalfa presenta una alta producción de forraje durante el período comprendido entre la primavera y el otoño (Douglas, 1986; Van Keuren y Matches, 1988), lo cual permite integrarla en diferentes rotaciones dentro de los principales sistemas de producción agrícola-ganaderos (Romero et al., 1995). Es un cultivo con altos requerimientos nutricionales (macronutrientes y micronutrientes). El contenido de fósforo (P) en suelo debe ser superior a 18 ppm para un adecuado crecimiento (Marino y Echeverría, 2018; Pautasso y Barbagelata, 2017) debido a que interviene en el desarrollo de la biomasa aérea y radical, otorgándole a la planta tolerancia al estrés hídrico. Suelos con niveles de P extractable inferiores a 25 ppm, y pH neutro a ligeramente ácido, requieren del agregado de fertilizantes fosfatados para la correcta implantación y el normal desarrollo de la pastura (Loewy, 1994; Loewy y Ron, 1992).

El azufre (S) es un elemento con funciones afines a las del nitrógeno ya que integra la composición de proteínas y por lo tanto interviene en procesos asociados a la eficiencia de uso de la radiación y contribuye a la calidad del forraje aportando proteínas esenciales para la nutrición animal. Es un elemento móvil en el suelo que las plantas captan por el proceso de flujo masal al tomar el agua por lo que el uso de fertilizantes azufrados es la única alternativa de reposición en los sistemas agropecuarios (Díaz Zorita et al., 2022).

En suelos de textura franco a franco-arenosa, se han demostrado importantes contribuciones de aplicaciones de fertilización azufrada durante la implantación o durante el ciclo de crecimiento de la pastura (Fernández et al., 2024; Díaz- Zorita y Fernandez- Canigia, 1998). El aporte por el uso de este fertilizante estimularía la capacidad de nodulación de las plantas y su consiguiente impacto en la fijación biológica del nitrógeno.

La adecuada provisión de los nutrientes mejora el uso de los demás recursos, en este sentido, resultados de estudios en la región semiárida pampeana (RSP) demostraron que la fertilización mejoró la eficiencia en el uso del agua (EUA) de cultivos anuales y también de pasturas perennes (Fernández et al., 2024; Gaggioli, 2019).

El objetivo del trabajo fue evaluar en el cultivo de alfalfa la eficiencia en el uso del agua en tratamientos con fósforo y la respuesta a la aplicación de azufre.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo sobre un Paleustol Petrocálcico localizado en la estación experimental INTA Anguil. La Tabla 1 muestra las propiedades fisicoquímicas del mismo. El 5 de abril de 2023 se sembró 7 kg ha⁻¹ de alfalfa. En el mes de septiembre de 2023 y febrero 2024, se establecieron diferentes tratamientos de fertilización al voleo de fósforo. Los tratamientos fueron: 9 kg ha⁻¹ P (9P) - 9 kg ha⁻¹ P con S (9P S), y 18 kg ha⁻¹ P (18P) - 18 kg ha⁻¹ P con S (18P S) y 36 kg ha⁻¹ P (36P) - 36 kg ha⁻¹ P con S (36P S).

El ensayo fue dispuesto en un diseño de bloque completamente aleatorizados con tres repeticiones.

Se cuantificó biomasa aérea (materia seca, MS) a los 240, 273, 333, 407, 533, 579, 634 y 674 días desde la siembra. Los cortes se realizaron en una superficie de 0,25 m² en cada parcela a 5 cm del suelo y las muestras fueron secadas en estufa a 60 C°.

En cada momento de corte de biomasa se determinó el contenido de humedad del suelo (método gravimétrico) cada 20 cm hasta 140 cm debido a la presencia de manto calcáreo a fin de calcular el uso consuntivo (UC) promedio (López y Arrue, 1997) y la ~~eficiencia en el uso del agua (EUA)~~ a partir de la siguiente ecuación, EUA (kg MS mm⁻¹ ha⁻¹) = Biomasa (kg MS ha⁻¹) / UC (mm)

Los resultados fueron analizados mediante modelos lineales mixtos con medidas repetidas en el tiempo para cada pastura. La comparación de medias se realizó mediante Test de Fischer (p≤ 0,1) utilizando el software Infostat (Di Rienzo et al., 2020).

Tabla 1: Arcilla y limo (A+L), materia orgánica (MO), índice de materia orgánica (IMO), fósforo extractable (P), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K) a 0-20 cm de profundidad del suelo

A+L	MO	IMO	P	pH	CIC	Ca	Mg	Na	K
%	%		ppm				meq 100 g ⁻¹		
52,8	2,6	4,9	10,9	6,5	19,0	11,5	1,0	0,2	2,8

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de MS desde la siembra hasta los 674 días se presenta en la Figura 1. Considerando la producción acumulada, en el tratamiento 9P se cuantificó un 12% más de biomasa cuando se fertilizó con S (22283 y 24933 kg MS ha⁻¹ para 9P y 9P S, respectivamente). Además, se encontraron diferencias significativas ($p < 0,10$) en la producción de biomasa por la fertilización de S que fueron un 67 y 58% más de producción a los 272 días, y 473 días desde la siembra, respectivamente (2do corte 10/1/2023 y 4to corte 18/6/2024) (Figura 1a). Para el tratamiento 18P la fertilización con azufre implicó un 6% más de producción (21839 y 23233 kg MS ha⁻¹ para 18P y 18P S, respectivamente). La aplicación de S produjo mayor producción (17%) sólo a los 579 días desde la siembra (24/10/2024) (Figura 1b). Mientras que para el tratamiento con mayor fertilización fosforada que corresponde a 36P la fertilización con azufre no implicó mayor producción en ningún corte desde la siembra, como tampoco en la producción acumulada (25365 y 24953 kg MS ha⁻¹ para 36P y 36P S, respectivamente) (Figura 1c).

En el tratamiento 9P se encontraron diferencias significativas ($p < 0,10$) en la producción de biomasa por la fertilización de S que fueron un 67 y 58% más de producción a los 272 días, y 473 días desde la siembra, respectivamente (2do corte 10/1/2023 y 4to corte 18/6/2024, respectivamente). También se encontró diferencia estadística significativa en la producción acumulada (de 8 cortes) del 12% (Fig. 1, a). Para el tratamiento 18P solamente la aplicación de S produjo mayor producción (17%) a los 579 días desde la siembra (24/10/2024). La producción acumulada al 8vo corte fue similar entre ambos tratamientos. Para 36P la fertilización con S no produjo mayor producción en ningún corte desde la siembra, como tampoco en la producción acumulada.

El sitio en estudio presenta poca historia agrícola por lo que la fertilización fosforada no ha sido frecuente, debido a ello es que los resultados demuestran poca estratificación del P. En 0-10 cm el P extractable fue de 13,5 ppm y en 10-20 cm de 8,3 ppm, dando un valor promedio para 0-20 cm de 10,9 ppm (Tabla 1).

La respuesta al agregado de S estaría asociada a un uso más eficiente del nitrógeno, P y otros elementos por parte de las plantas (Galantini et al., 2007). En este sentido, varios autores remarcan el efecto positivo de la aplicación de fertilizantes azufrados, poniendo en evidencia la deficiencia de S y demostrando la factibilidad de la fertilización al voleo para aumentar la producción de MS (Fontanetto et al., 2006; Vivas et al., 2004).

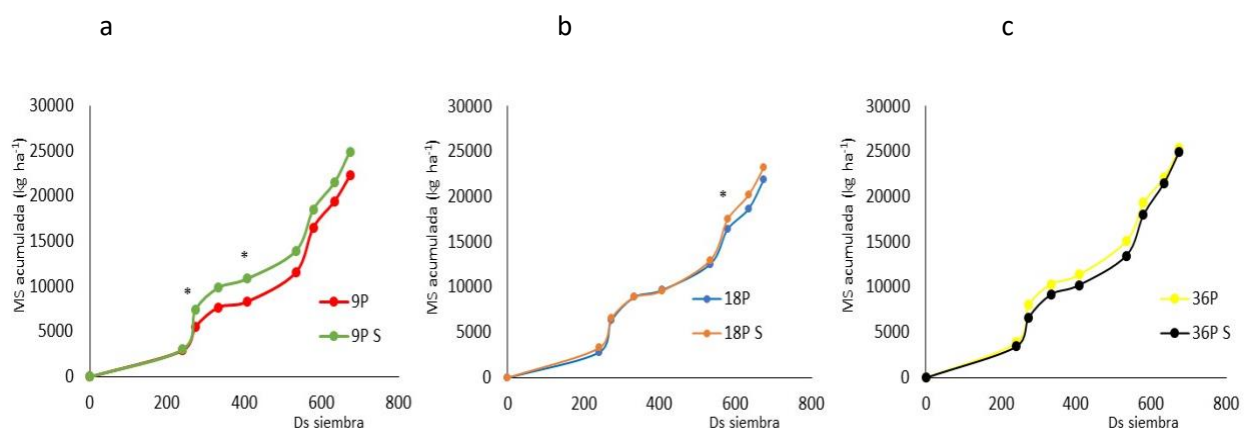


Figura 1: Producción de materia seca (MS) en a) 9 kg ha⁻¹ P (9 P) - 9 kg ha⁻¹ P con S (9 P S), b) 18 kg ha⁻¹ P (18 P) - 18 kg ha⁻¹ P con S (18 P S); y c) 36 kg ha⁻¹ P (36 P) - 36 kg ha⁻¹ P con S (36 P S). * indica diferencia estadística significativa ($p \leq 0,1$).

En la Región Pampeana, la alfalfa requiere entre 1.100 y 1.550 mm de agua por año para lograr una producción potencial de forraje (Collino et al., 2007). En la RSP y sobre suelos con tosca a los 120 cm se han reportado valores entre 600 a 900 mm (Fernández et al., 2017; Fernández et al., 2024).

En el presente estudio, durante el primer año del cultivo de alfalfa, el uso consuntivo fue de 493 mm y en el segundo año de 767 mm, lo cual se relaciona con las precipitaciones que fueron de 434 mm y de 783 mm para el primero y segundo año, respectivamente. En estos dos años de evaluación, la producción de forraje guardó relación con el UC, en promedio para el primero y ~~se~~segundo año de estudio se cuantificaron 9148 y 14727 kg MS ha⁻¹, respectivamente. No obstante, trabajos realizados en la RSP, mostraron baja relación entre precipitaciones y producción de biomasa aérea (Fernández et al., 2017; Fernández et al., 2024), demostrando la importancia de considerar el suelo, su textura y especialmente la profundidad del perfil, como factores importantes en la capacidad de almacenaje y transferencia del agua de las precipitaciones entre distintos periodos.

Considerando cada tratamiento de P por separado, la fertilización con S provocó un aumento en la EUA. Esta mayor eficiencia debido a la aplicación de S fue estadísticamente significativa en los tratamientos 9P y 18P (Figura 2). Dentro del año la EUA fue muy variable, para el primer año se cuantificaron entre 10,3 y 41 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹ y entre 3,3 y 33,8 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹ para el segundo año. Distintos autores han remarcado este tipo variabilidad dentro del año debido principalmente a las diferencias en el grado de sequedad del aire a lo largo del año, que juntamente con otras variables meteorológicas modifica la demanda transpiratoria (López et al., 1997, Collino et al. 2007 y Bolger y Matches, 1990).

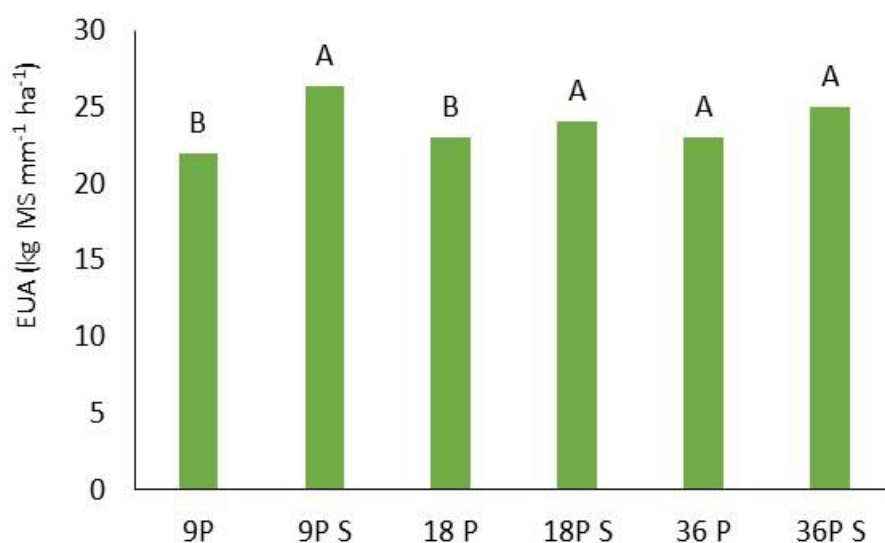


Figura 2: Eficiencia en el uso del agua (EUA) (kg MS ha⁻¹ mm⁻¹) promedio en tratamientos de fertilización, 9 kg ha⁻¹ P (9 P) - 9 kg ha⁻¹ P con S (9 P S), 18 kg ha⁻¹ P (18 P) - 18 kg ha⁻¹ P con S (18P S) y 36 kg ha⁻¹ P (36 P) - 36 kg ha⁻¹ P con S (36 P S). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,1$) al mismo nivel de P con y sin S.

>. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados preliminares de tan solo dos años, se puede concluir que en el suelo franco con bajo contenido de MO y de P, el aporte de S provocó un aumento en la producción de la pastura, en las dosis de 9P y 18P. En la mayor dosis (36P) no se encontró respuesta en biomasa por el agregado de S. El aporte de S tuvo un impacto positivo en la EUA en las dosis 9P y 18P.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Bolger, T. y Matches, A. (1990). Water-use efficiency and yield of sainfoin and alfalfa. *Crop Science*. 30, 143-148.
- Collino, D., Dardanelli, J. y De Luca, M. (2007). Uso del agua y la radiación para la producción de forraje. En: *El cultivo de la alfalfa en la Argentina* (Ed. Basigalup D). Capítulo 3, 47-63
- Douglas, J. A. (1986). The production and utilization of lucerne in New Zealand. *Grass and Forage Sci*. 41, 81-128.
- Díaz-Zorita, M. y Fernández Canigia, M. (1998). Azufre y nitrógeno en la implantación de pasturas perennes en la región de la Pampa Arenosa. *Ciencia del Suelo* 16, 103-106.
- Díaz- Zorita, M., Gambaudo, S. y Quiroga, A. (2022). Fertilización y encalado de alfalfa. En: *El cultivo de la alfalfa en la Argentina* (Ed. Basigalup D). Capítulo 10, 397-430.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2020). Grupo InfoStat. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fernández, R., Álvarez, C. O., Uhaldegaray M., Noellemeyer, E. y Quiroga, A. R. (2024). Efecto de la fertilización sobre biomasa aérea y extracción de nutrientes de alfalfa en suelos contrastantes *Cienc. Suelo* 42 (2), 126-137. ISSN 1850-2067
- Fernández, R., Frasier, I., Uhaldegaray, M., Oderiz, A., Scherger, E. y Quiroga, A. (2017). Eficiencia en el uso del agua en pasturas en un molisol de la región semiárida pampeana. *Semiárida* 27, 19-25.
- Fontanetto, H., Keller, O. y Vivas, H. (2006). Aspectos del manejo de la fertilización de la alfalfa en el área central de Santa Fé. En: *Forrajes 2006, seminario técnico. Los nuevos ambientes ganaderos*. Buenos Aires. p: 165-174.
- Gaggioli, C. (2019). Alternativas de cultivos tendientes a mejorar la sustentabilidad de los sistemas de producción de la Región Semiárida Pampeana. Tesis Doctoral. Departamento de Agronomía UNSur. 306p. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5197>
- Galantini, J., Landriscini, M. y Fernández, R. (2007). Fertilización con Azufre. *Sistemas productivos del Sur y Sudoeste de Buenos Aires. Revista técnica especial AAPRESID*. Pág 50-54. ISSN 1850-0633
- Loewy, T. 1994. Fertilización de pasturas perennes. *Boletín de Divulgación* N° 35. EEA INTA Bordenave.
- Loewy, T. y Ron, M. (1992). Fertilización fosfórica de alfalfa en dos suelos del sudoeste bonaerense. *Rev. Fac. Agron. UBA* 13, 1-10.
- López, M. y Arrue, J. (1997). Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil & Till. Res.* 44, 35-54.
- López, J., Dardanelli, L. Collino, D., Sereno, S y Racca, R. (1997). Efecto del grado de reposo invernal sobre la producción, consumo y eficiencia en el uso del agua en alfalfa cultivada bajo riego. *RIA* 28 (2), 41-48.
- Marino, M. y Echeverría, H. (2018). Diagnóstico de requerimiento de fósforo para alfalfa (*Medicago sativa* L.) en argiudoles. *Agriscientia* 35, 11-24.
- Pautasso, J. y Barbagelata, P. (2017). Actualización del umbral de fósforo Bray para el cultivo de alfalfa en Entre Ríos (Argentina). *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 26, 13-16
- Romero, N., Juan, N. y Romero, L. (1995). Establecimiento de la alfalfa en la Región Pampeana. En: *HIJANO H.; A. NAVARRO (ed.). La alfalfa en la Argentina*. INTA, Subprograma Alfalfa. Enciclopedia Agro de Cuyo Manuales 11, Capítulo 2, 21-36 pp.
- Van Keuren, R. W. y Matches, A. (1988). Pasture production and utilization. In: A. A. Hanson, D. K. Barnes and R. R. Hill (Jr) (ed) *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. ASA-CSSA-SSSA Agronomy Series 29. Madison, Wisconsin. USA, pp. 515-538.
- Vivas, H., Quintero, C., Boschetti, G., Fontanetto, H. y Albrecht, R. (2004). Fertilización con Fósforo y Azufre para la producción de Alfalfa en el centro de Santa Fe. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. 22 al 25 de junio de 2004.

El manejo nutricional como clave para la salud del suelo y la maximización de la productividad

► ► **Cerliani C¹², Morla F¹², Esposito G¹², Martinez Bologna G¹,
Martinez F¹, Naville R, Anzuay S²³, Guazzaroni ME⁴, Silva Rocha R⁵,
Ciario E⁶, Gonzalez Sanjuan MF⁶ & Travaglia C²³**

¹ Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.

² Instituto de Investigaciones Agrobiotecnológicas. ³ Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto. ⁴ FFCLRP-Universidade de São Paulo. ⁵ ByMyCell Inova Simples LTDA. ⁶ Fertilizar AC.

✉ ccerliani@ayv.unrc.edu.ar

>. INTRODUCCIÓN

El sector agropecuario argentino se destaca por ser pionero en la incorporación de tecnologías como aplicación de siembra directa, la incorporación de biotecnología, y el uso de la agricultura de precisión. Sin embargo, no se han contemplado externalidades en cuanto a aspectos ambientales y sociales. Desde el punto de vista ambiental, los principales efectos negativos son la degradación de los suelos, la contaminación con agroquímicos, la deforestación, la pérdida de biodiversidad, las emisiones de gases de efecto invernadero y los problemas derivados del uso de agua azul (Andrade, 2016).

En este sentido, uno de los aspectos más preocupantes es la degradación de suelo que incluye la pérdida de fertilidad de estos. Numerosos autores mencionan el balance negativo de nutrientes en el suelo, producto de la exportación de nutrientes que se hace en los granos y la baja reposición de los mismos vía fertilización (MAGYP, 2021; García y Díaz Zorita, 2015; García y González Sanjuán, 2013; Viglizzo et al., 2001). Esta degradación también incluye pérdida de suelo por erosión hídrica y/o eólica con la consecuente pérdida de materia orgánica de suelo y estabilidad estructural, que promueven menores tasas de infiltración y mayores escurrimientos superficiales (Andrade, 2016; Cisneros et al., 2012).

Los suelos de la región pampeana no solo han sufrido una degradación de su fertilidad química, sino que también varios autores han reportados problemas de compactación (Gudelj et al., 2024; Quiroga et al., 2017; Rollan y Bachmeier, 2015), es decir pérdida de fertilidad física de los suelos.

En los últimos años, diversos estudios se han enfocado en analizar cómo el uso del suelo afecta a las comunidades microbianas edáficas (Vercellino, 2019; Kirilovsky, 2016), dado que estos organismos cumplen funciones esenciales para el ecosistema (Thakur y Geisen, 2019). En particular, desempeñan un papel clave en los procesos biogeoquímicos terrestres, participando activamente en la descomposición de la materia orgánica del suelo, que constituye la principal fuente de nutrientes para las plantas (Sokol et al., 2022).

En la actualidad, la fertilidad del suelo se entiende como un concepto integral que abarca no solo la disponibilidad de nutrientes (fertilidad química), sino también las propiedades físicas que regulan el crecimiento radicular y la disponibilidad hídrica, y la actividad biológica que sustenta los procesos de ciclado de nutrientes. Este enfoque holístico, comúnmente referido como salud del suelo, permite evaluar de manera más completa la capacidad del suelo para sostener la productividad agrícola a largo plazo. En este contexto, el presente trabajo se propone analizar el impacto de distintas estrategias de fertilización sobre la productividad de cultivos, así como sobre indicadores físicos (resistencia mecánica) y biológicos (microbiota) del suelo, en diferentes zonas de manejo.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo sobre un ensayo a campo de larga duración implantado desde la campaña 2016/17. Sobre el mismo se evaluaron distintos tratamientos de fertilización: I- sin aplicación de fertilizante “Testigo”; II- con aplicación de N, P y S según dosis promedio empleada por los productores de la región “Productor”; III- con aplicación de N, P y S en dosis para rendimientos medios “Mejorado”; IV- con aplicación de N, P, S y Zn en dosis para altos rendimientos “Completo”. Este ensayo experimental se ubicó dentro de un lote de producción ubicado en cercanías a la localidad de Río Cuarto (Córdoba, Argentina) y abarca dos zonas de manejo: alta producción “AP” (asociada a una posición de bajo dentro del relieve) y baja producción “BP” (relacionado con la posición de loma).

Los tratamientos de fertilización se realizaron de manera repetida desde la campaña de comienzo del experimento hasta la actualidad, siguiendo la rotación de cultivos que realizó el productor, esta rotación fue de Maíz, Soja, Soja, Maíz, Maní, Trigo, Soja, Maíz y Soja en la campaña 2023/24. Para cada cultivo el manejo agronómico, estructura y protección del cultivo fue el mismo para todos los tratamientos evaluados, y coincidente con el que realizaba el productor en el lote.

Durante todos los años se midió el rendimiento del cultivo en cada tratamiento y zona de manejo, expresados en kg ha^{-1} , corregido a humedad de comercialización.

Para analizar el impacto de las distintas estrategias de fertilización sobre la productividad (medida como el rendimiento en grano de los cultivos) se relativizó el rendimiento de cada tratamiento al rendimiento del tratamiento Testigo en cada zona y para cada año. Además, se calculó la producción acumulada sumando los rendimientos en grano para cada tratamiento y zona. Estos datos fueron analizados mediante ANAVA.

Por otra parte, en la campaña 2022/23, estando el ensayo sembrado con maíz en el estadio fenológico de V6 (Ritchie y Hanway, 1982), se tomaron muestras de los primeros 5 cm de suelo y se procedió a la extracción del ADN metagenómico de cada muestra de suelo, utilizando el kit DNAeasy Powersoil® de QIAGEN, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Posteriormente, una porción del ADN extraído se utilizó para llevar a cabo la amplificación del gen ADNr 16S y de las regiones ITS1 e ITS2, siguiendo las directrices proporcionadas por Oxford Nanopore Technologies - ONT. Es importante mencionar que esta determinación se realizó en ambas zonas de manejo en los tratamientos más contrastantes, es decir, sobre el tratamiento Testigo y el Completo.

Finalmente, durante la campaña 2024/25 se midió la resistencia mecánica del suelo mediante penetrómetro de golpe, para determinar el efecto acumulado de las distintas estrategias de fertilización luego de 8 campañas agrícolas. Esta determinación se realizó sobre todos los tratamientos en ambas zonas de manejo.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Productividad

Al analizar el rendimiento, se encontró que el mismo fue afectado por la zona de manejo ($p<0.0001$), la estrategia de fertilización ($p<0.0001$), pero no por la interacción de ambos factores ($p=0.6889$). Así, los valores de rendimiento se relativizaron a los tratamientos Testigo de cada zona de manejo (AP y BP).

En cuanto al efecto de la zona de manejo, se encontró una mayor producción (10%) en la zona AP. Este resultado se explica por la posición topográfica de esa zona, ubicada en un bajo, donde el suelo presenta una mayor capacidad de retención hídrica. Como consecuencia, los cultivos contaron con una mayor disponibilidad de agua, el principal factor limitante para la producción de los cultivos en la región bajo estudio (Esposito et al., 2013).

En cuanto a los tratamientos de fertilización, se encontró que los mismos afectaron de manera estadísticamente significativa al rendimiento relativo ($p<0.0001$) (Figura 1). En este sentido, los tratamientos Completo y Mejorado presentaron un rendimiento de entre un 24 y 19% superior al Testigo, respectivamente; mientras que el tratamiento Productor generó incrementos del 10% respecto al testigo sin fertilizar. Estos resultados son coincidentes con lo encontrado por varios autores en la región pampeana, donde la aplicación de fertilizantes químicos genera incrementos de rendimientos (Salvagiotti et al., 2017; Esposito et al., 2015).

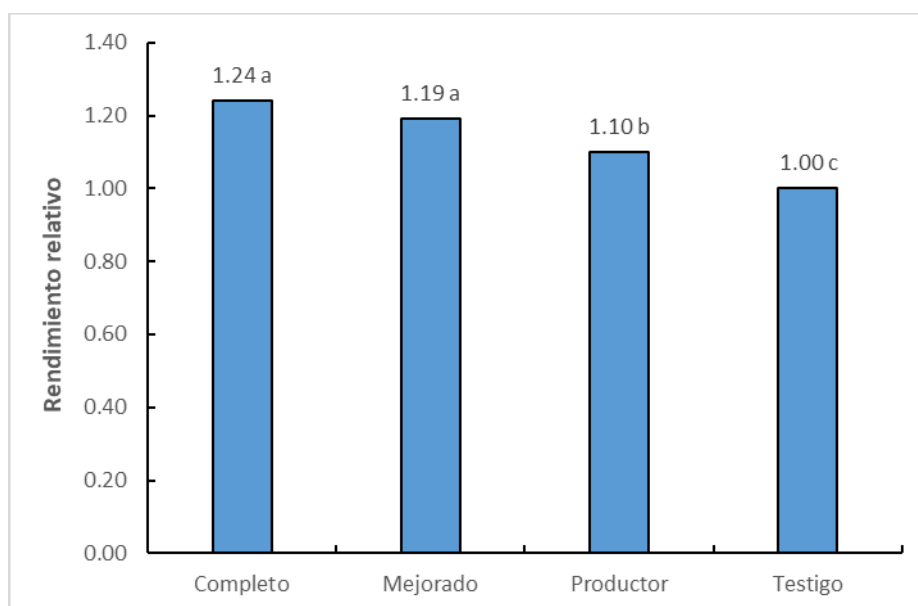


Figura 1. Rendimiento relativo para los distintos tratamientos de fertilización, promedio de ambas zonas de manejo. En columnas letras distintas indican diferencias significativas según test LSD-Fisher $p<0.05$.

Resulta interesante destacar que, al calcular la producción acumulada de grano por tratamiento de fertilización y zona de manejo (Tabla 1), el tratamiento **Completo** generó aproximadamente **10.000 kg ha⁻¹** más que el Testigo en la zona de AP, y **9.000 kg ha⁻¹** más en la zona de BP. Estos resultados evidencian cómo la aplicación de una estrategia de fertilización Completa no solo mejora el rendimiento en ambientes de alto potencial, sino que también eleva la calidad productiva de zonas con menor aptitud, permitiendo alcanzar niveles de producción comparables a los obtenidos en ambientes más favorables con estrategias convencionales, como la del tratamiento Productor. En otras palabras, la fertilización adecuada no sólo incrementa los rendimientos absolutos, sino que también contribuye a mejorar la calidad del ambiente de cultivo, reduciendo brechas de productividad entre zonas contrastantes del lote.

Tabla 1. Producción de grano acumulada (kg ha⁻¹) en las 8 campañas agrícolas en los distintos tratamientos de fertilización y zonas de manejo.

TRATAMIENTO	Producción acumulada (kg ha ⁻¹)	
	AP	BP
Testigo	41.330	36.300
Productor	44.184	41.356
Mejorado	49.267	44.225
Completo	51.313	45.089

Microbiota de suelo

En todas las combinaciones de zonas de manejo y tratamientos de fertilización donde se analizó la microbiota, se observó una composición bacteriana similar, destacándose *Bacillus* spp. como el género más predominante, seguido por *Paenibacillus* spp. y *Vicinamibacter* spp. (Figura 2). Al evaluar la diversidad microbiana mediante el índice de Shannon, se obtuvieron valores similares entre zonas y tratamientos. Sin embargo, se observó una tendencia donde, el tratamiento Testigo presentó valores ligeramente inferiores (2,96 en BP y 3,00 en AP), en comparación con el tratamiento Completo (3,00 en BP y 3,06 en AP).

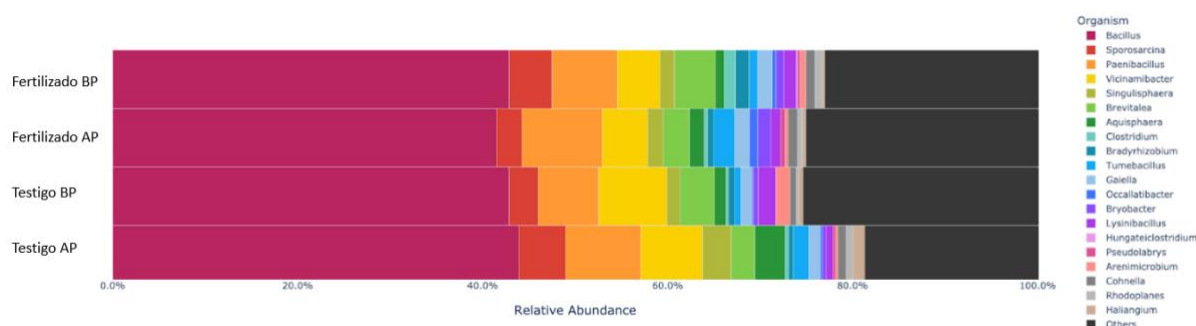


Figura 2. Abundancia relativa de los distintos géneros de bacterias encontrados, en la campaña 2022/23 en el tratamiento Testigo y completo para las zonas de alta producción (AP) y baja producción (BP)

En cuanto a la comunidad de hongos, en el tratamiento Testigo, tanto en la zona de alta como de baja productividad, se observó una mayor abundancia de *Alternaria* spp., un género compuesto por especies fitopatógenas (Figura 3). Por el contrario, en el tratamiento Completo se registró una mayor presencia de *Penicillium* spp., *Mortierella* spp. y *Trichoderma* spp., géneros reconocidos por su papel en el ciclado de la materia orgánica y por contribuir a una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas. El índice de diversidad fúngica mostró valores similares en ambas zonas bajo el tratamiento Completo (3,33 en BP y 3,40 en AP), y fue superior a los valores registrados en el tratamiento Testigo (2,85 en BP y 2,50 en AP).

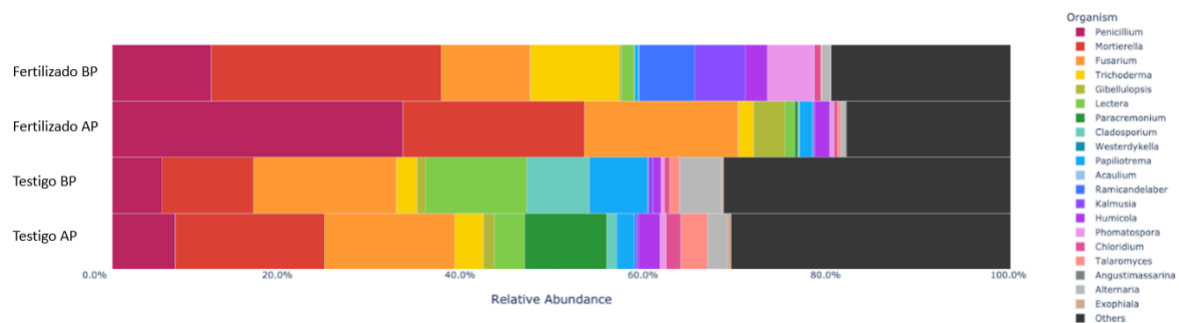


Figura 3. Abundancia relativa de los distintos géneros de hongos encontrados, en la campaña 2022/23 en el tratamiento Testigo y completo para las zonas de alta producción (AP) y baja producción (BP)

Resistencia Mecánica

Los resultados encontrados al medir la resistencia mecánica del suelo demostraron interacción entre los tratamientos de fertilización y la zona de manejo intralote. En este sentido en el bajo (AP), se puede observar que los tratamientos alcanzaron el valor crítico de 2 Mpa, valor por encima del cual se dificulta el crecimiento radical para los principales cultivos agrícolas de la región (Figura 4 A). Se observa que en el tratamiento Testigo los valores de resistencia mecánica son superiores a los encontrados en los otros tratamientos de fertilización, siendo el tratamiento Completo el que presenta la menor resistencia mecánica.

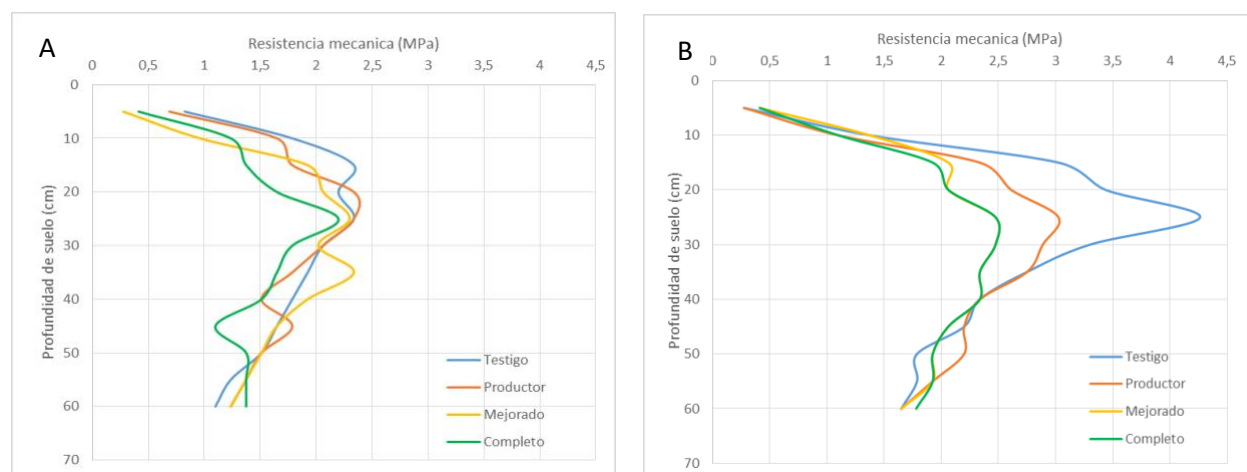


Figura 4. Resistencia mecánica del suelo (MPa) en las distintas profundidades según los tratamientos de fertilización en la zona de manejo de Alta Producción (A) y Baja Producción (B)

Tabla 2. Porcentaje de humedad gravimétrica (g g^{-1}), para distintas profundidades de suelo (0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-60 cm), en los distintos tratamientos de fertilización para ambas zonas de manejo.

Profundidad de Suelo (cm)	Alta Producción				Baja Producción			
	Testigo	Productor	Mejorado	Completo	Testigo	Productor	Mejorado	Completo
0 a 10	19	23	20	20	14	14	16	17
10 a 20	18	20	18	17	14	14	15	15
20 a 30	18	20	18	17	13	14	15	15
30 a 40	18	19	17	15	14	14	14	13
40 a 50	17	18	16	14	14	14	14	13
50 a 60	16	16	16	14	14	14	15	14

En la zona de baja productividad, correspondiente al sector de loma, las diferencias en la resistencia mecánica del suelo fueron evidentes. En esta zona, el tratamiento Testigo superó el valor de 2MPa entre los 15 y 35 cm de profundidad, alcanzando un máximo de 4,37 MPa a los 25 cm. Una tendencia similar se observó en el tratamiento Productor, aunque con un valor máximo más bajo, de 3 MPa. En contraste, en los tratamientos Mejorado y Completo, los valores máximos de resistencia mecánica registrados fueron inferiores, alcanzando valores de 2,47 MPa (Figura 4B). Las diferencias observadas entre zonas de manejo podrían explicarse por el mayor contenido de arena en el sector de loma, lo que hace al suelo más susceptible a la compactación y, por ende, con mayores niveles de resistencia mecánica. Cabe destacar que estos suelos presentan fracciones de arenas muy fina de comportamiento limoso, lo cual incrementa su susceptibilidad a la compactación. Además, en este ambiente es razonable suponer que el mayor rendimiento de los cultivos en los tratamientos fertilizados promovió una mayor producción de biomasa aérea y radicular. Este incremento en el aporte de materia orgánica y la formación de poros generados por las raíces habría contribuido a mitigar los efectos de la compactación del suelo.

>. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio, que involucra el efecto acumulado de ocho campañas agrícolas consecutivas, demuestran que la aplicación sostenida de estrategias de fertilización diferenciadas puede mejorar significativamente la productividad de los cultivos, con incrementos de hasta un 20% en el rendimiento cuando se ajusta la fertilización a las necesidades de los cultivos y a la oferta de nutrientes del suelo.

Parte de este aumento en la productividad podría explicarse por una disminución de la resistencia mecánica del suelo, lo que favorece un mayor crecimiento y exploración radicular, y en consecuencia, una mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes.

Con respecto a la microbiota del suelo, se observaron diferencias en la comunidad fúngica entre las distintas zonas de manejo, mientras que no se encontraron variaciones significativas en la comunidad bacteriana. En los ambientes de menor productividad se registró una mayor presencia de hongos fitopatógenos, mientras que los tratamientos con mejor manejo nutricional, como el Completo, mostraron una mayor diversidad de géneros beneficiosos, asociados al ciclado de nutrientes y a la salud del suelo.

En síntesis, la implementación de estrategias de fertilización más eficientes no sólo mejora la productividad a lo largo del tiempo, sino que también contribuye a optimizar las propiedades físicas y biológicas del suelo, generando un círculo virtuoso que favorece la sustentabilidad del sistema productivo.

>. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren hacer un agradecimiento a los propietarios y el personal del establecimiento agropecuario “La Coca” por su excelente predisposición para realizar este estudio en especial al Ing. Agr. Tomas Nolting. Además, agradecen a Fertilizar AC y a la Universidad Nacional de Río Cuarto por impulsar esta investigación.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F. H. (2016). Los desafíos de la agricultura.
- Rollán, A. A. D. C., & Bachmeier, O. A. (2015). Efecto de la siembra directa continua sobre el comportamiento físico-funcional de los suelos franco limosos de la región semiárida central de la provincia de Córdoba (Argentina). *Terra Latinoamericana*, 33(4), 275-284.
- Cisneros, J. O. S. É., Cholaky, C. A. R. M. E. N., Gutiérrez, A. C., González, J., Reynero, M., Diez, A., ... & Degioanni, A. (2012). Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo. Ed. UniRío, Córdoba, 290.
- Espósito, G. P. (2013). Analisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial-MEME.
- Esposito, G., Balboa, G., Cerliani, C., Balboa, R., & Castillo, C. (2015). RENDIMIENTO POTENCIAL DE MAÍZ. *La publicación que se presenta titulado El cultivo de maíz en la provincia de San Luis es un actualizado trabajo de información para la toma de decisiones relacionado con el cultivo. El índice nos señala un recorrido de datos, información y resultados de ensayos demostrativos localizados realizado por un grupo interdisciplinario público-privado.*, 32.
- García, F. O., & Sanjuan, M.F. (2013). La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Como estamos?. *Informaciones Agronómicas de Hispoamérica*. 9: 2-7.
- García, F. O., & Díaz-Zorita, M. (2015). La fertilidad de los suelos y el uso de nutrientes en la producción agrícola extensiva de Argentina. *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina (183-198)*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: FECIC.
- Gudelj, V. J., Chiacchiera, S., Gudelj, O. E., Conde, M. B., Lorenzon, C. A., Seravalle, R. D., ... & Mustafa, J. M. Descompactación del suelo en lotes con manchones de crecimiento restringido de los cultivos. MAGYP. (noviembre 2021). Fertilidad y nutrición de suelos. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe-fertilidad-nutricion-suelos-200mt-magyp.pdf>
- Quiroga, A. R., Oderiz, A. J., Uhaldegaray, M., Alvarez, C., Scherger, E. D., Fernández, R., & Frasier, I. (2017). Influencia del uso de suelos sobre indicadores físicos de compactación. *Semiárida*, 26(2). [https://doi.org/10.19137/semiarida.2016\(02\).19-26](https://doi.org/10.19137/semiarida.2016(02).19-26)
- Salvagiotti, F., Prystupa, P., Ferraris, G., Couretot, L., Magnano, L., Dignani, D., & BGutiérrez-Boemoem, F. H. G. (2017). N: P: S stoichiometry in grains and physiological attributes associated with grain yield in maize as affected by phosphorus and sulfur nutrition. *Field Crops Research*, 203, 128-138.
- Sokol, N. W., Slessarev, E., Marschmann, G. L., Nicolas, A., Blazewicz, S. J., Brodie, E. L., ... & Pett-Ridge, J. (2022). Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. *Nature Reviews Microbiology*, 20(7), 415-430.
- Ritchie, S. W., and Hanway, J. J. (1982). “How a corn plant develops” in Special Report. (Iowa: Iowa State University of Science and Technology). 48.
- Thakur, M. P., & Geisen, S. (2019). Trophic regulations of the soil microbiome. *Trends in microbiology*, 27(9), 771-780.
- Viglizzo, E. F., Lértora, F., Pordomingo, A. J., Bernardos, J. N., Roberto, Z. E., & Del Valle, H. (2001). Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, ecosystems & environment*, 83(1-2), 65-81

Evaluación económica del uso de vicia previa a maíz tardío en la región pampeana

► ► **Cafaro La Menza F^{1,2*}, Salvagiotti F^{2,4}, Maltese N⁵, Barraco M⁶,
Eclesia P⁷, Barbieri PA^{1,2,3}, de Sá Pereyra E⁵, Gudelj V⁴, Urcola H³,
Ducos I¹⁰, Guazzelli S.¹¹, Reussi Calvo N¹, Crespo C^{1,2}, Sainz Rozas HR^{1,2,3},
& Carciochi WD^{1,2*}**

¹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina

³EEA INTA Balcarce, Balcarce, Buenos Aires, Argentina

⁴EEA INTA Oliveros, Oliveros, Santa Fe, Argentina

⁵EEA INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay

⁶EEA INTA General Villegas, General Villegas, Buenos Aires, Argentina

⁷EEA INTA Paraná, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina

⁸EEA INTA Marcos Juárez, Marcos Juárez, Córdoba, Argentina

⁹EEA INTA Cesáreo Naredo, Coronel Suárez, Buenos Aires, Argentina

¹⁰Criadero El Cencerro, Coronel Suarez, Buenos Aires, Argentina

¹¹AAPRESID Regional Tandilía, Tandil, Buenos Aires, Argentina

✉ francisco.cafa@gmail.com / waltercarciochi@hotmail.com

>. INTRODUCCIÓN

Argentina es uno de los principales productores y exportadores de maíz (*Zea mays* L.) a nivel mundial. A pesar de los avances en las estrategias de manejo, el nitrógeno (N) continúa siendo el principal nutriente deficitario y un factor clave que limita la productividad del cultivo (Correndo et al., 2021). El bajo aporte de N mediante fertilizantes sintéticos, junto con la limitada provisión del suelo, no alcanza para satisfacer la demanda del cultivo, lo que genera balances negativos del nutriente y resalta la necesidad de estrategias de manejo que optimicen su uso (Novelli et al., 2023).

La adopción de cultivos de servicio ha crecido significativamente en los últimos años. Si bien la vicia (*Vicia villosa* Roth.) no es el cultivo de servicio más ampliamente sembrado, sus características la hacen una herramienta complementaria en secuencias de cultivos que incluyen maíz como cultivo de renta. Entre sus rasgos benéficos, se encuentra la capacidad de fijar biológicamente el N del aire, acumulándolo en su biomasa e incorporándolo así al sistema. Además, contribuye a reciclar el N del sistema y a reducir las pérdidas por lixiviación (Gudelj et al., 2010).

En la región pampeana argentina, se ha determinado que la fijación biológica de N de la vicia representa hasta un 60% del N acumulado en su biomasa (Enrico et al., 2020), con una acumulación de hasta 300 kg N ha⁻¹ (Cafaro La Menza y Carciochi, 2023). Esto se ha traducido en respuestas promedio en el rendimiento de maíz de 2,1 t ha⁻¹ (Cafaro La Menza et al., 2025), con variaciones de 1,0 a 2,8 t ha⁻¹ en ambientes de alto y bajo rendimiento, respectivamente (Carciochi et al., 2023).

Recientemente se ha documentado que en estos sistemas que incluyen cultivos de servicio, cuando el contenido de N en el suelo (0-60 cm) al momento de la siembra del maíz supera los 175 kg ha^{-1} , no es esperable respuesta en rendimiento del maíz a la fertilización con N (Salvagiotti et al., 2025). Del mismo modo, umbrales de materia seca de vicia superiores a $5,2 \text{ t ha}^{-1}$ o acumulaciones de más de 134 kg N ha^{-1} pueden ser suficientes para cubrir las necesidades del maíz sin fertilización adicional (Salvagiotti et al., 2025). Sin embargo, la adopción de la vicia en sistemas agrícolas comerciales depende, en gran medida, de su viabilidad económica en comparación con estrategias convencionales de fertilización nitrogenada.

Para evaluar la viabilidad económica, un primer enfoque es considerar el valor de reemplazo del fertilizante (VRF). Este valor representa la cantidad de fertilizante nitrogenado que un productor debe aplicar para que el maíz posterior a un barbecho invernal alcance el rendimiento del maíz posterior a vicia y sin fertilización nitrogenada (**punto 1 de la Figura 1**). Así, la comparación económica se establece entre el costo del fertilizante sintético aplicado en un maíz posterior a un barbecho (VRF + costo de la labor de fertilización) versus el costo de implantación de la vicia (siembra, semilla e inoculante).

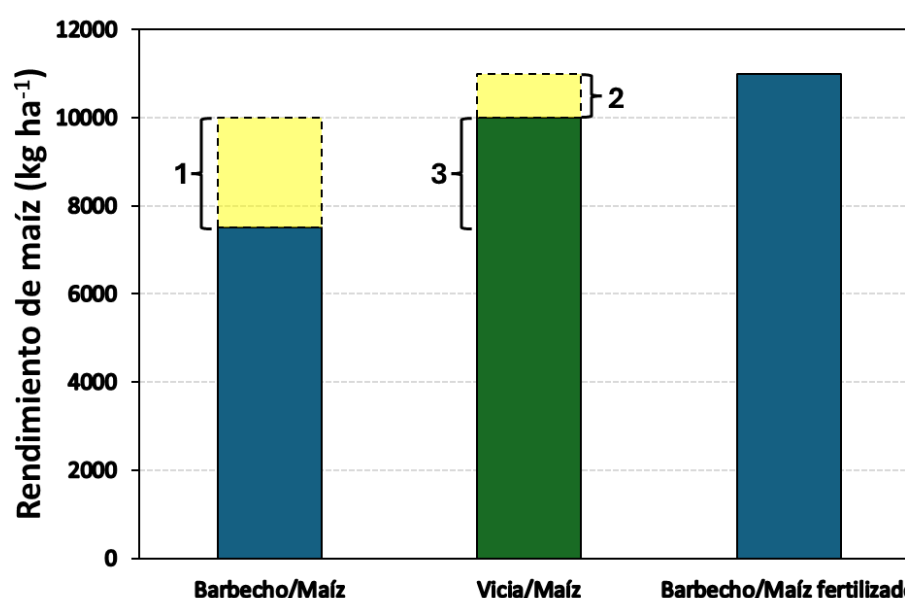


Figura 1. Ejemplificación de rendimiento en grano de maíz en las secuencias barbecho/maíz (BM), vicia/maíz (VM) y barbecho/maíz fertilizado con N (BM+N). El punto 1 indica el rendimiento adicional que debe generarse en BM para igualar al VM; el punto 2 indica el rendimiento adicional que debe generarse en VM para igualar al BM+N (máximo rendimiento); el punto 3 indica el rendimiento adicional generado por VM comparado con BM (situaciones sin fertilización nitrogenada).

Sin embargo, el N aportado por la vicia no siempre es suficiente para maximizar el rendimiento del maíz en todos los ambientes (Cafaro La Menza et al., 2025; Carciochi et al., 2023). En estos casos, se calcula la cantidad adicional de fertilizante necesaria para que el maíz que sigue a la vicia alcance su máximo rendimiento (**punto 2 de la Figura 1**). Esta última comparación económica considera el costo del cultivo de vicia (siembra, semilla e inoculante) más el costo de la fertilización necesaria para maximizar el rendimiento (fertilizante + labor de fertilización) versus el costo del fertilizante aplicado en un maíz posterior a un barbecho para alcanzar su máximo rendimiento (fertilizante requerido + labor de fertilización).

Un segundo enfoque es asumir que el productor no va a fertilizar su maíz tardío. Así, se estima el incremento de rendimiento debido a la vicia (**punto 3 de la Figura 1**) y se determina si el ingreso económico generado por la producción adicional de granos de maíz justifica los costos asociados a

implantar la vicia. De esta manera, se calcula la mínima respuesta en rendimiento a la vicia necesaria para cubrir sus costos de producción, considerando que cualquier incremento adicional de rendimiento representará una ganancia neta para el productor.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la viabilidad económica del uso de vicia como cultivo de servicio previo al maíz tardío en la región pampeana, comparando su impacto en la provisión de N, el rendimiento del cultivo y los costos de producción frente a estrategias de manejo de la fertilización nitrogenada.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Se elaboró una base de datos a partir de un total de 66 experimentos realizados entre 2005 y 2022 en diferentes ambientes de la región pampeana argentina, abarcando distintos tipos de suelo y condiciones ambientales (**Figura 2**).

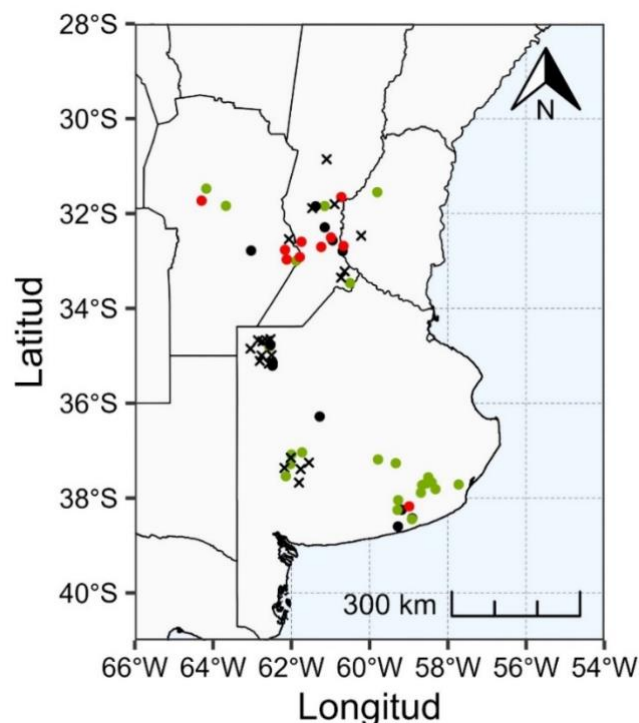


Figura 2. Ubicación de los experimentos en la región pampeana argentina. Los símbolos indican la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada: cruces para sitios sin respuesta (n=19) y círculos para sitios con respuesta (n=47). El color representa la respuesta a la inclusión de vicia: negro para ausencia de respuesta (n=14), rojo para respuesta negativa (n=10) y verde para respuesta positiva (n=23).

En cada experimento se evaluaron cuatro tratamientos que combinaban la inclusión o no de vicia antes del maíz y la fertilización con N o no en el maíz: vicia/maíz (**VM**), barbecho/maíz (**BM**), vicia/maíz + fertilización con N (**VM_{+N}**) y barbecho/maíz + fertilización con N (**BM_{+N}**). En todos los ensayos se aseguró un adecuado suministro del resto de los nutrientes para evitar limitantes. La fertilización nitrogenada se realizó con urea (46-0-0) al voleo en superficie (fuente de N más utilizada en la región), entre siembra y V₆, en dosis de entre 90 a 200 kg N ha⁻¹, garantizando que los tratamientos fertilizados no presentaran deficiencia de N. Se calculó la respuesta a N (**Ec. 1**), a vicia (**Ec. 2; punto 3 de la Figura 1**), y el requerimiento de fertilizar con N luego de vicia para maximizar el rendimiento (**Ec. 3; punto 2 de la Figura 1**).

Respuesta a N = $Rto.BM_{+N} - Rto.BM$

Ec. 1

Respuesta a vicia = $Rto.VM - Rto.BM$

Ec. 2

Requerimiento de N con vicia = $Rto.BM_{+N} - Rto.VM$

Ec. 3

Se evaluó la significancia estadística de cada respuesta (**Ec. 1 y 2**) y requerimiento de N con vicia (**Ec. 3**), mediante análisis de la varianza para cada sitio de estudio, comparando el rendimiento de los tratamientos involucrados en los cálculos de cada respuesta, utilizando un nivel de significancia del 10%. La normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas se verificaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente ($p > 0.10$) (R Core Team, 2022).

En términos económicos, se recolectaron datos históricos de los precios de la urea, inoculante, costos de siembra de vicia y costos de fertilización de los últimos 20 años (Márgenes Agropecuarios, 2024). Para el precio del maíz, se tomaron los datos de los precios pizarra reportados en los últimos 20 años de cada mercado nacional (Agrofy News, s.f.). Por último, se consideró el precio de la semilla de vicia villosa certificada variedad Ascasubi INTA de los últimos 9 años (Criadero El Cencerro, comunicación personal, marzo de 2025). Para el costo del cultivo de vicia se consideró una densidad de siembra de 20 kg semilla ha^{-1} (densidad objetivo 50 pl m^{-2}) con un precio promedio de 2,10 US\$ kg^{-1} , el costo de siembra se estimó a partir del valor que representa el percentil 50 de los años analizados (41,0 US\$ ha^{-1}) y se consideró un costo de inoculante de 3,7 US\$ ha^{-1} , siendo la suma de estos valores 86,7 US\$ ha^{-1} . El costo de la fertilización también se estimó a partir del valor que representa el percentil 50 de los años analizados (11,5 US\$ ha^{-1}) y se consideraron los valores máximo (985 US\$ t^{-1}), mínimo (330 US\$ t^{-1}) y promedio (496 US\$ t^{-1}), del precio de la urea, para realizar las comparaciones en diferentes escenarios económicos. Para calcular la mínima respuesta en rendimiento que pagó los costos de la vicia se tomaron los precios pizarra mínimo (71 US\$ t^{-1}), máximo (255 US\$ t^{-1}) y promedio (155 US\$ t^{-1}) del valor del maíz y se lo comparó con el valor del costo de implantar la vicia.

Para cada enfoque, se asumió un manejo de base de un cultivo de maíz, es decir, no se estableció un manejo específico para cada sistema productivo. De esta manera, la variación en el margen bruto responde exclusivamente a las variables analizadas y no a diferencias en la cantidad, tipo o costo de insumos asociados a un manejo particular. Esto permite que cualquier manejo de base se adapte a las variaciones analizadas a continuación, asegurando que los resultados sean aplicables a distintas situaciones productivas dentro de la región pampeana.

Para evaluar la viabilidad económica del uso de vicia siguiendo el primer enfoque planteado (i.e., calcular el VRF: cantidad de fertilizante nitrogenado que un productor debe aplicar para que el BM alcance el rendimiento del VM), se determinó el porcentaje de sitios con respuesta positiva a la vicia (**Ec. 2**) dentro de los experimentos que mostraron respuesta significativa a N (**Ec. 1**). A partir de estos datos, se calculó el VRF (**Ec. 4; punto 1 de la Figura 1**).

$$VRF (kg \text{ urea } ha^{-1}) = (Rto.VM - Rto.BM) * 20 \text{ kg N } t^{-1} / 0,46 / 0,55$$

Ec. 4

Se consideró un requerimiento en planta de 20 kg de N por tonelada de grano producido (Bender et al., 2013; Setiyono et al., 2010), un factor de conversión de N a urea (que contiene 46% de N), y una eficiencia de recuperación de N del fertilizante de 55% (Ladha et al., 2005). Posteriormente se calculó y comparó el margen bruto de ambos escenarios: costo del VRF más la aplicación de urea versus costo de implantar la vicia (siembra, semilla e inoculante). Para el cálculo del margen bruto se consideró como base el manejo del BM para ambos escenarios, es decir, las variaciones producidas se dieron por el VRF vs el costo de implantar la vicia y no por la cantidad de aplicaciones, insumos de fitosanitarios o precios de los mismos.

Se determinó el porcentaje de sitios donde el uso de vicia (tratamiento VM) no fue suficiente para alcanzar el rendimiento del BM_{+N} (rendimiento máximo) (**Ec. 3**). A partir de la diferencia de rendimiento entre estos tratamientos, se calculó la cantidad de N que debió aplicarse sobre el VM para alcanzar el máximo rendimiento (BM_{+N}), siguiendo un procedimiento similar al indicado en la **Ec. 4**. De la misma manera que fue indicado en la Ec. 1, se calculó la respuesta promedio a N y la cantidad de N requerido para alcanzar el máximo rendimiento. Luego se calcularon y compararon los márgenes brutos de ambas situaciones: costo de la urea (considerando el requerimiento medio de esos sitios) más su aplicación para maximizar la respuesta a N del BM versus el costo de implantar la vicia más la urea (porcentaje de la dosis promedio de N que no cubrió la vicia) y aplicación adicional requerida para maximizar el rendimiento.

Para el segundo enfoque planteado (i.e., no fertilizar el maíz tardío) se calculó la respuesta a vicia (**Ec. 2**) y se comparó el margen bruto de utilizar vicia (ingreso económico generado por la producción adicional de granos de maíz descontados los costos asociados a implantar la vicia) versus no utilizarla. Nuevamente, se tomó de base el manejo del escenario BM y la variación en el margen bruto se produjo por la diferencia en el rendimiento del maíz entre BM y VM, menos el costo del cultivo de vicia.

Para complementar los cálculos económicos se realizaron análisis de sensibilidad. En el primer enfoque, se evaluó el impacto de la variación en el costo de la urea (mínimo, máximo y promedio) y en el VRF (mínimo, percentiles 25, 50 y 75, y máximo). Para las situaciones en las cuales VM rindió menos que BM_{+N} , se calculó el porcentaje del requerimiento de N en BM que fue cubierto por la vicia (%VRF) y se incluyó esta variable al análisis de sensibilidad (mínimo, percentiles 25, 50 y 75, y máximo %VRF). En el segundo enfoque, se realizó un análisis de sensibilidad considerando diferentes escenarios de respuesta al uso de vicia (mínimo, percentiles 25, 50 y 75, y máximo) y variaciones en el precio del maíz (mínimo, máximo y promedio); y se estimó la mínima respuesta en rendimiento requerida para cubrir los costos del cultivo de vicia en función del precio del maíz.

>. RESULTADOS

Los rendimientos de maíz sin fertilizar con N en los tratamientos provenientes del barbecho oscilaron entre 4,0 y 15,3 t ha⁻¹, mientras que los mismos con fertilización nitrogenada, variaron entre 5,0 y 16,5 t ha⁻¹. En los tratamientos con vicia previa al maíz sin fertilizar con N, los rendimientos fluctuaron entre 2,8 y 14,0 t ha⁻¹, alcanzando valores de 3,4 a 15,1 t ha⁻¹ cuando se fertilizaron con N. La materia seca acumulada de vicia al momento de la terminación varió entre 0,9 y 11,1 t ha⁻¹, mientras que el N acumulado en la biomasa osciló entre 25 y 292 kg N ha⁻¹.

De los 66 experimentos, el 71% (n=47) presentó respuesta a la fertilización nitrogenada (en promedio 2,1 t ha⁻¹). Dentro de estos sitios, el 49% (n=23) mostró respuesta positiva a la inclusión de vicia, con un incremento promedio en el rendimiento de 2,2 t ha⁻¹. El 29% (n=14) de los sitios no presentó diferencias estadísticas en el rendimiento entre incluir o no vicia previa al maíz, mientras que en el 21% (n=10) restante la inclusión de vicia resultó en una disminución del rendimiento. En los sitios con respuesta positiva a vicia, no alcanzó el máximo rendimiento del ambiente en el 22% (n=5) de los sitios.

Desde el enfoque económico, el VRF varió entre 44 y 456 kg urea ha⁻¹, con el 50% de los datos alrededor del percentil 50 entre 105 y 210 kg urea ha⁻¹ (promedio de 170 kg urea ha⁻¹) (**Figura 3**). Cuando el precio de la urea fue el más bajo de los años analizados (escenario más favorable a la fertilización sintética), el margen bruto del maíz resultó a favor de la vicia (i.e., positivo) cuando el VRF fue de al menos 228 kg urea ha⁻¹. En contraste, cuando el precio de la urea fue máximo (escenario más favorable a la vicia), el beneficio económico al incluir vicia se obtuvo con un VRF de 76 kg urea ha⁻¹ o superior. Cuando se

empleó el valor histórico promedio de la urea, se observó que con VRF superiores a 150 kg urea ha⁻¹ fue económicamente conveniente implantar vicia.

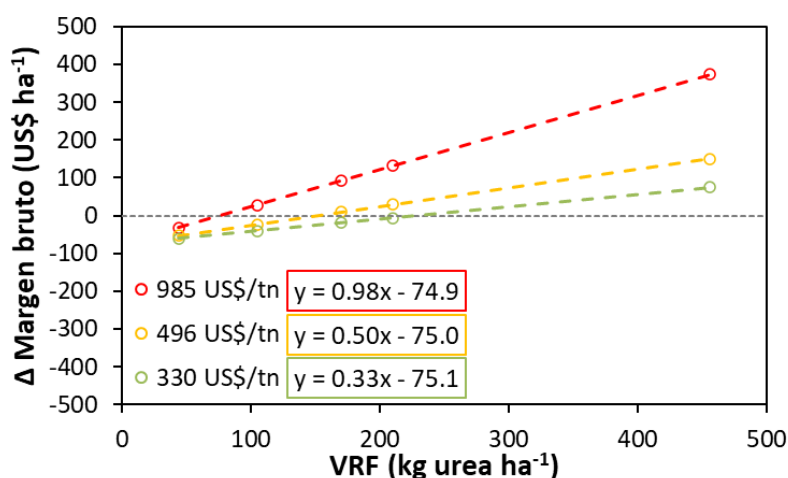


Figura 3. Relación entre la diferencia de margen bruto de utilizar vicia o fertilizar con N el maíz para lograr el mismo rendimiento que con vicia (Δ Margen bruto) y el valor de reemplazo del fertilizante de la vicia (VRF), para los precios históricos (2005-2024) mínimo (verde), máximo (rojo) y promedio (amarillo) de la urea granulada. $\Delta MB = [\text{costo urea (VRF)} + \text{labor fertilización}] - [\text{semilla vicia} + \text{inoculante} + \text{siembra}]$

En los sitios donde VM no maximizó el rendimiento, la vicia reemplazó entre 24% y 72% de la dosis de fertilización requerida, con el 50% de los datos alrededor del percentil 50, entre 37% y 49% (promedio de 43%) (**Figura 4**). En estos casos, la implantación de vicia más la fertilización no fue rentable cuando el precio de la urea fue mínimo. Sin embargo, cuando el precio del fertilizante fue máximo, la práctica resultó económicamente viable a partir de 28% del VRF. Considerando el precio promedio de la urea, la conveniencia de incluir vicia y fertilizar para maximizar el rendimiento se observó cuando la vicia cubrió 58% o más del VRF.

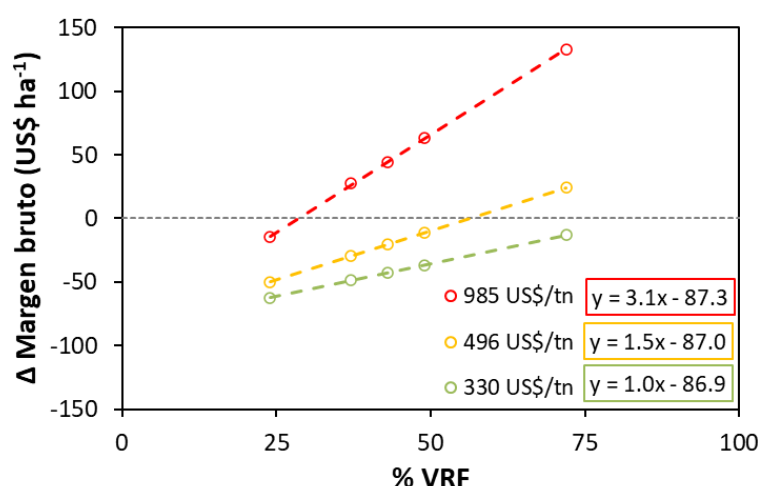


Figura 4. Relación entre la diferencia de margen bruto de utilizar vicia y fertilizar con N o solo fertilizar con N el maíz para lograr el máximo rendimiento (Δ Margen bruto) y el porcentaje del valor de reemplazo del fertilizante (VRF) cubierto por la vicia, para los precios históricos (2005-2024) mínimo (verde), máximo (rojo) y promedio (amarillo) de la urea granulada. $\Delta MB = [\text{costo urea (máximo rendimiento.)} + \text{labor fertilización}] - [\text{semilla vicia} + \text{inoculante} + \text{siembra} + \text{costo urea (\%VRF)} + \text{labor fertilización}]$

Bajo el segundo enfoque económico, en el cual se asumió que el productor no fertiliza con N su maíz tardío, el análisis mostró que la inclusión de vicia generó un beneficio económico positivo siempre que la respuesta en rendimiento superó 0,3, 0,6 y 1,2 t ha⁻¹, para precio pizarra del maíz máximo, promedio y mínimo, respectivamente (**Figura 5**). Para el set de datos analizados en este trabajo, se observó que en un 90 y 83% de las situaciones la respuesta en rendimiento a vicia superó los 0,6 y 1,2 t ha⁻¹, respectivamente.

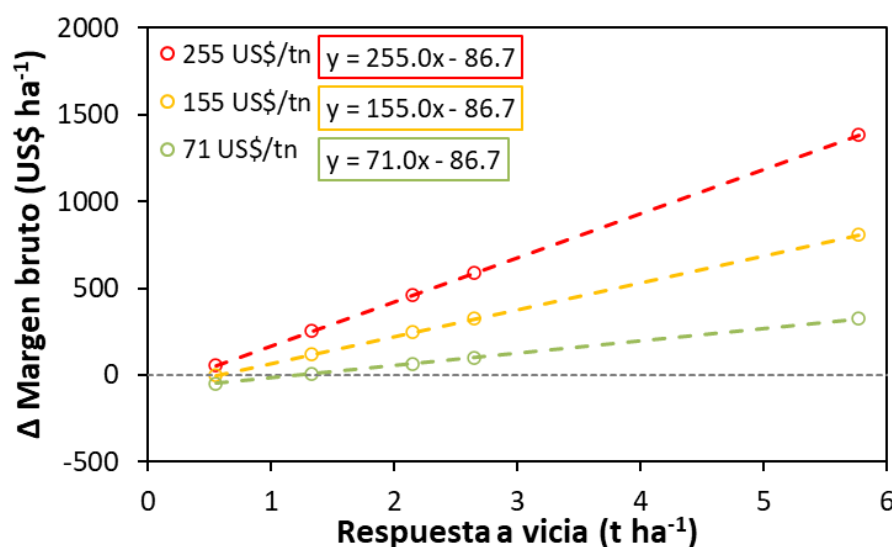


Figura 5. Relación entre la diferencia de margen bruto de utilizar vicia o no (Δ Margen bruto) y la respuesta en rendimiento del maíz a la vicia, para los precios históricos (2005-2024) mínimo (verde), máximo (rojo) y promedio (amarillo) del maíz. Δ MB = ingreso por respuesta a vicia (precio maíz * rendimiento extra) – [semilla vicia + inoculante + siembra]

>. DISCUSIÓN

Los resultados indican dependencia del maíz tardío al aporte de N, ya sea a través de fertilización sintética o de la inclusión de vicia. Si bien la fertilización incrementó el rendimiento en la mayoría de los casos (71%), la vicia también mostró su potencial como fuente de N, aunque con una respuesta variable según el ambiente. En algunos sitios, su contribución al rendimiento fue significativa, mientras que en otros no se observaron diferencias o incluso se registraron disminuciones. Este efecto negativo podría estar vinculado al consumo de agua previo al cultivo de maíz y al balance hídrico atmosférico (Cafaro La Menza et al., 2025), lo que sugiere que la inclusión de vicia debe ser cuidadosamente evaluada en sistemas o años donde el costo hídrico no sea un factor más limitante que la disponibilidad de N. Por otro lado, en los casos de respuesta positiva, la acumulación de suficiente biomasa se presenta como un requisito clave para maximizar los beneficios de la vicia, en línea con lo sugerido por Salvagiotti et al. (2025). Para ello, un adecuado manejo de la fecha de siembra y terminación es fundamental, ya que no solo influye en la producción de materia seca, sino también en la sincronización entre la liberación de N de la vicia y la demanda del maíz.

Para las condiciones en las cuales la vicia mostró efectos positivos sobre el rendimiento de maíz, el análisis del VRF evidenció que ésta puede aportar una fracción sustancial del N requerido por el cultivo de renta, aunque su eficiencia varía según el contexto productivo (**Figura 3**). Sin embargo, el N aportado por la biomasa de vicia no siempre cubre por completo la demanda del cultivo (Cafaro La Menza et al., 2025; Carciochi et al., 2023). En escenarios de bajos precios de la urea, la fertilización sintética resultó una

opción más rentable que la inclusión de vicia y aun cuando cubrió el 72% del requerimiento, no fue rentable para reducir la dosis de N. En contraste, con precios elevados del fertilizante, la vicia se volvió una estrategia económicamente favorable incluso cuando ésta sólo cubrió un 28% del requerimiento de N, permitiendo reducir la dosis de fertilización sin comprometer la rentabilidad (**Figura 4**). Además, en situaciones donde la vicia no compite con la fertilización, es decir, cuando la decisión es no fertilizar el maíz tardío, la vicia se presentó como una estrategia económicamente viable siempre que su efecto sobre el rendimiento fue suficiente para compensar los costos de implantación (i.e., mayores a $0,6 \text{ t ha}^{-1}$) (**Figura 5**). Estos resultados resaltan la necesidad de un enfoque flexible en el manejo de cultivos de servicio, adaptando su implementación a las condiciones económicas y productivas de cada campaña.

En este estudio se realizó un enfoque directo en el N, sin embargo, existen otros factores que también juegan un papel clave en el desempeño del sistema. Por ejemplo, se han reportado incrementos de rendimiento en maíz después de vicia por encima de un maíz después de un barbecho, incluso cuando se aplicaron dosis de N por encima de los requerimientos del cultivo (Carciochi et al., 2023). Esta respuesta no asociada al N también se observó en el 65% de los experimentos analizados en este estudio que presentaron un efecto positivo de la vicia. Estos beneficios adicionales podrían atribuirse a mejoras en la infiltración del agua, el reciclaje de otros nutrientes diferentes al N (Cafaro La Menza y Carciochi, 2023), la supresión de malezas (Daryanto et al., 2018) y al incremento de algunas fracciones gruesas del carbono orgánico en el suelo (Alvarez et al., 2017). Más aún, se han observado aumentos en la productividad del cultivo invernal posterior al maíz en secuencias que incluyeron vicia (Biaassoni et al., 2024). Todos estos factores resultan fundamentales para el diseño de sistemas agrícolas sustentables a mediano y largo plazo, aunque su cuantificación económica resulta más compleja y excede la aproximación de este estudio.

El análisis realizado en este estudio, consideró la variación del margen bruto asumiendo un manejo y carga de insumos homogéneo tanto para barbecho químico como para vicia, por lo que las diferencias observadas estuvieron determinadas por el costo de la fertilización (VRF según el valor de la urea + labor de aplicación) y el costo de implantar la vicia (semilla + inoculante + siembra). Sin embargo, un aspecto clave a considerar es que la inclusión de vicia puede reducir la necesidad de aplicaciones de fitosanitarios (e.g. herbicidas) en comparación con el barbecho químico, lo que otorgaría una ventaja adicional en términos de costos, manejo y riesgos toxicológicos. Por otro lado, en situaciones donde la biomasa de la vicia es elevada, puede ser necesario complementar el secado con un rolado para asegurar una siembra homogénea del maíz, lo que disminuiría el beneficio económico de incluir vicia en algunos casos. Por último, es importante aclarar que los precios utilizados en este análisis corresponden a un promedio de la región pampeana argentina y que los costos reales pueden variar entre productores debido a factores como fletes, canjes u otros gastos no contemplados en este estudio. En este sentido, la información presentada aquí debe ser utilizada como una herramienta de referencia, que cada productor o asesor deberá ajustar y adaptar a su propio contexto económico y productivo para la toma de decisiones.

>. CONCLUSIÓN

Este trabajo evaluó la viabilidad económica de la vicia como cultivo de servicio previo a maíz tardío en experimentos realizados en la región pampeana argentina y donde la respuesta en rendimiento del maíz a vicia fue positiva. Se determinó que la vicia puede reemplazar entre 44 y 456 kg de urea ha^{-1} . Sin embargo, no siempre fue suficiente para cubrir las necesidades de N del maíz. En estos casos (8% de los experimentos), la vicia reemplazó entre el 24% y el 72% de la dosis de N requerida para maximizar el rendimiento del maíz. Adicionalmente, bajo un contexto de precios promedio para maíz, si la decisión es no fertilizar con N al maíz tardío, se observó que la inclusión de vicia es económicamente conveniente solo cuando la respuesta en rendimiento en grano del maíz es de al menos $0,6 \text{ t ha}^{-1}$. Este estudio proporciona información útil y sencilla como una herramienta para que los productores y/o asesores

evalúen la conveniencia económica de utilizar vicia y/o fertilizar su maíz tardío, considerando diferentes escenarios de costos de fertilizantes y precios del maíz. No obstante, la inclusión de vicia previo al maíz tardío no debe considerarse como la única solución a la nutrición nitrogenada del cultivo de renta, sino como una práctica complementaria, ya que su integración en un adecuado contexto económico, climático y productivo, puede contribuir a mejorar la eficiencia de uso del N y la renta del cultivo de maíz.

>. REFERENCIAS

Agrofy News. s.f.. *Series históricas de precios pizarra de granos*. Consultado en marzo de 2025, de <https://news.agrofy.com.ar/granos/series-historicas-pizarra>

Alvarez, R.; Steinbach, H. S. and De Paepe, J. L. 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil Tillage Res.* 170, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.005>

Bender, R. R.; Haegerle, J. W.; Ruffo, M. L. & Below, F. E. 2013. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. *Agronomy Journal*, 105(1), 161–170. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0352>

Biassoni, M. M.; Agosti, M. B.; Kehoe, E.; Enrico, J. M.; Gutiérrez Boem, F. H. & Salvagiotti, F. 2024. N Stress Alleviation in Crops—A System Approach Analysing Residual N From Winter Crops in a Late-Maize-Wheat Sequence. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 210(5), e12761. <https://doi.org/10.1111/jac.12761>

Cafaro La Menza, F. and Carciochi, W.D. 2023. Catch crops in the Argentinean Pampas: a synthesis-analysis on nutrient characteristics and their implications for a sustainable agriculture. *Front. Agron.* 5:1244057. <https://doi:10.3389/fagro.2023.1244057>

Cafaro La Menza, F.; Salvagiotti, F.; Maltese, N. E.; Ecclesia, R. P.; Barraco, M.; Echarte, L.; Barbieri, P. A. & Carciochi, W. D. 2025. New insights to understand the influence of hairy vetch on maize yield and its response to nitrogen application. *European Journal of Agronomy*, 162, 127434. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127434>

Carciochi, W.D., Cafaro La Menza, F., Crespo, C., Dominguez, G., Rodríguez, M.P., Reussi Calvo, N.I., Wyngaard, N., Sainz Rozas, H.R., Studdert, G. & Barbieri, P.A. 2023. Analysis of factors controlling maize yield response to hairy vetch and to nitrogen fertilization after hairy vetch. *Field Crops Research*, 303, 109138. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109138>

Correndo, A.A., Rotundo, J.L., Tremblay, N., Archontoulis, S., Coulter, J.A., RuizDiaz, D., Franzen, D., Franzluebbers, A.J., Nafziger, E., Schwalbert, R., Steinke, K., Williams, J., Messina, C.D., Ciampitti, I.A., 2021b. Assessing the uncertainty of maize yield without nitrogen fertilization. *Field Crops Res.* 260, 107985. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107985>

Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P. A., and Zhao, W. 2018. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. *Earth-Science Rev.* 185, 357–373. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.06.013

Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., Salvagiotti, F., 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. *Eur. J. Agron.* 115 (February). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126016>

Gudelj V.; Vallone P.; Galarza C.; Gudelj O. y Masiero B. 2010. Efecto de la utilización de vicia como cobertura y de la fertilización nitrogenada sobre el cultivo de maíz. IX Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo. 17 al 19 de noviembre de 2010, Rosario, Santa Fe, Argentina.

Ladha, J. K., Pathak, H., J. Krupnik, T., Six, J., & Van Kessel, C. 2005. Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. In *Advances in Agronomy* (Vol. 87, pp. 85–156). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)

Márgenes Agropecuarios. 2024. Reseña estadística 2024. Consultado en <https://www.margenes.com/archives/revista/resena-estadistica-2024>

Novelli, L. E., Caviglia, O. P., Jobbágy, E. G., & Sadras, V. O. 2023. Diversified crop sequences to reduce soil nitrogen mining in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 341, 108208. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108208>

R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. <https://www.r-project.org/>

Salvagiotti, F., Caviglia, O., Bacigaluppo, S., Barraco, M., Boero, L., Biassoni, M., Enrico, J., Kehoe, E., Ecclesia, R.P., Madias, A., Maltese, N., Melchori, R., Novelli, L., Prieto, G., Ross, F., Ruiz, A., & Carciochi, W.D. 2025. Response to nitrogen fertilization of late-sown maize upon different winter previous crops. *European Journal of Agronomy*, 166, 127566. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127566>

Setiyono, T. D., Walters, D. T., Cassman, K. G., Witt, C., & Dobermann, A. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research*, 118(2), 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.006>

Respuesta del maní a la fertilización: efectos sobre el rendimiento y la absorción de boro y zinc

► ► Bustos AN¹, Martínez MJ¹, Haro R, Méndez Facundo¹ & Alvarez C¹

¹INTA EEA Manfredi

✉ bustos.natalia@inta.gob.ar

RESUMEN EXTENDIDO

Argentina se posiciona como el segundo exportador mundial de maní (*Arachis hypogaea* L.) y en el año 2024 alcanzó su récord histórico en ingreso de divisas provenientes del complejo manicero. El rendimiento y la calidad del grano dependen en gran medida de una nutrición equilibrada, siendo el boro (B) y el zinc (Zn) micronutrientes esenciales, pero frecuentemente deficientes en los suelos de la región manisera de Córdoba, la principal productora nacional. Estudios recientes destacan el impacto positivo de la fertilización con estos elementos, sin embargo, la información local sobre su efecto en maní, especialmente en cultivares (cv) comerciales contrastantes, es escasa. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la fertilización con B y Zn sobre el rendimiento en grano de maní y la absorción de estos nutrientes en dos cv contrastantes. Para ello se llevó a cabo un experimento a campo en un suelo Haplustol éntico de la EEA INTA Manfredi (Arg.) en la campaña 2020-2021. Las concentraciones de B y Zn en el suelo a 0-20 fueron 0,49 mg kg⁻¹ de B-acetato de amonio y 1,0 mg kg⁻¹ de Zn-DTPA. Los ensayos se replicaron en dos Cv: ciclo largo (CL) Granoleico y ciclo corto (CC) ASEM 400 INTA. Se evaluaron 8 tratamientos de fertilización con agregado individual o combinado de B y Zn en dos dosis, utilizando un diseño en bloques completos aleatorizados con 3 repeticiones. Los tratamientos fueron: B₁ y B₂ con aplicación de B al suelo con dosis de 0,6 y 1,2 kg B ha⁻¹; Zn₁ y Zn₂ con aplicación de Zn foliar: 0,7 y 1,4 kg Zn ha⁻¹; y los tratamientos combinados fueron: B₁Zn₁: 0,6 kg B ha⁻¹ + 0,7 kg Zn ha⁻¹; B₁Zn₂: 0,6 kg B ha⁻¹ + 1,4 kg Zn ha⁻¹; B₂Zn₁: 1,2 kg B ha⁻¹ + 0,7 kg Zn ha⁻¹ y B₂Zn₂: 1,2 kg B ha⁻¹ + 1,4 kg Zn ha⁻¹ y un testigo Control. Se analizó la concentración total de B y Zn en biomasa aérea (hojas y tallos), vainas y granos en R₃, R₅ y R₈. Se determinó rendimiento en grano y se expresó a 0% de humedad. La fertilización con B y Zn incrementó el rendimiento en grano de maní en un 39% y un 35% en el cv CL y el CC, respectivamente. En el cv CL, los tratamientos con B₁Zn₂ y B₂Zn₂ rindieron 5 y 5,2 Mg ha⁻¹, mientras que la media del Control fue de 3,7 Mg ha⁻¹, y el resto de los tratamientos tuvieron rendimientos intermedios. En el cv CC, los tratamientos B₂Zn₁ y B₁Zn₁ rindieron 4,6 y 4,4 Mg ha⁻¹, mientras que el Control, Zn₂ y B₁ rindieron en promedio 3,4 Mg ha⁻¹ y no se diferenciaron entre sí. En general la aplicación conjunta de B y Zn presenta los mayores beneficios para el desarrollo de la planta lo que impacta en su producción. En el cv CC, el B en dosis baja o alta, tuvo

efecto positivo, acompañado por la menor dosis de Zn, mientras que el tratamiento con dosis mayor de Zn tuvo un rendimiento inferior al Control. El maní es un cultivo sensible a la toxicidad con Zn, y en este caso la susceptibilidad fue mayor en el cv CC. En cambio, no fue así en el CL, donde la duración de su ciclo pudo haber permitido una mejor absorción y traslocación del Zn. En el tratamiento Control, la absorción total de nutrientes en R₈ fue de 1132 y 1008 g ha⁻¹ de B, y de 343 y 477 g ha⁻¹ de Zn, para el cv CL y cv CC, respectivamente. La fertilización afectó la absorción en el cv CL, no así en el cv CC. En el cv CL, el tratamiento fertilizado incrementó la absorción de B en la parte aérea en un 8 % y de Zn en las vainas en un 32 %. En el estadio R₈, el B absorbido en promedio en el cv CL fue de 788, 276 y 124 g ha⁻¹ en parte aérea, vaina y grano; mientras que en cv CC fue de 680, 286 y 87 g B ha⁻¹, respectivamente. El Zn absorbido en promedio en el cv CL fue de 122, 63 y 161 g Zn ha⁻¹ en parte aérea, vaina y grano, respectivamente y en el cv CC fue de 272, 102, 115 g Zn ha⁻¹, respectivamente. En el estadio R₈, la partición de B en los cv evaluados fue del 65 % en la biomasa aérea, 25 % en la vaina y 8 % en el grano; mientras que, para Zn, la distribución fue del 46 %, 9 % y 14 %, respectivamente. La fertilización conjunta con B y Zn mejoró el rendimiento en grano en ambos cultivares evaluados, demostrando el rol clave de estos micronutrientes en la productividad del maní. Estos hallazgos resaltan necesidad de explorar más ambientes y ajustar las estrategias de fertilización del cultivo, reforzando la importancia del manejo específico por sitio para optimizar el rendimiento y la calidad del grano del maní

Evaluación de metodologías para la delineación de zonas de manejo de fósforo

► ► **Bonelli C.I. y Pagani A.**

Clarion, 9 de Julio, Bs. As.

✉ apagani@precisionclarion.com

>. INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y consecuentemente para la productividad de los sistemas agrícolas. Los suelos de Argentina presentan una importante variabilidad en los niveles de P entre regiones determinada por la génesis propia de los mismos, como por la influencia antrópica que genera ingresos y egresos del nutriente en el agroecosistema (Vázquez, M. E., 2002). Los ingresos al sistema pueden darse mediante la fertilización complementaria como por los residuos orgánicos que se descomponen y aportan a la materia orgánica del suelo. La cosecha representa el principal egreso del nutriente del sistema, por lo que el historial agrícola es uno de los principales determinantes de los niveles de P del suelo (Pagani et al., 2025). La historia agrícola cobra importancia en primer lugar por la extracción del P y luego por el manejo tradicional realizado por los productores en los que se adoptó una metodología de producción de tipo extractiva, lo cual ha llevado al lento empobrecimiento de suelos, llegando a situaciones en donde los niveles actuales son severamente limitantes para la producción (Sainz Rozas et al., 2019).

La agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para gestionar la variabilidad espacial y temporal asociada a todos los aspectos de la producción agrícola con el fin de incrementar la eficiencia en el uso de los insumos, preservando la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999). Uno de los enfoques propuestos que utilizan a la agricultura de precisión como herramienta para el manejo sitio-específico es el que se basa en la delimitación de zonas de manejo (ZM). Una ZM se define como una subregión dentro de un lote que expresa una combinación homogénea de los factores limitantes de rendimiento para los cuales es apropiada una dosis única de un insumo específico (Doerge, 1999).

Existen diferentes criterios para la delineación de ZM como el tipo de suelo (Pautasso et al., 2010), la topografía (Franzen et al., 2002 relevamientos de conductividad eléctrica aparente (Lund et al., 1999), el muestro de suelo en grilla (Wollenhaupt et al., 1994), el uso de mapas de rendimiento de cultivos anteriores (Ferguson et al., 2003) e imágenes espectrales asociadas a la productividad vegetal (Basso, 2012), entre otros. La topografía puede influir marcadamente sobre los rendimientos (Kravchenko y Bullock, 2000; Franzen et al., 2002). En este sentido, los modelos digitales de elevación (DEM) permiten caracterizar la variabilidad altimétrica de un lote y calcular derivados topográficos integradores, útiles para entender patrones espaciales de productividad, como la pendiente y el área de acumulación de agua (Kaspar et al., 2003; Ruffo et al., 2006; Espósito, 2013; Balboa, 2014). La conductividad eléctrica aparente (CEa), que es la medición in situ de la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica (Doerge, 1999;

Lund et al., 1999), está influenciada por una combinación de propiedades fisicoquímicas del suelo como la textura, la MO, la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de sales (Sudduth et al., 1995). Estas propiedades inciden sobre la infiltración y el almacenaje de agua (Jamison et al., 1968), que frecuentemente se relacionan con la variación del rendimiento de los cultivos (Kitchen et al., 1999). Simón et al. (2013) validaron la relación entre la CEa y algunas propiedades del suelo como arcillas, arenas y materia orgánica en suelos del sur de Córdoba; validando la herramienta como confiable para estimar la variabilidad espacial del suelo. El empleo del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI, Rouse et al., 1973) obtenido mediante el procesamiento de imágenes espectrales de origen satelital ha ganado popularidad en los últimos años como criterio simple y económico para delinear ZM. Si bien estas herramientas han sido sugeridas como valiosas para determinar la variabilidad intra-lote de muchas características, su utilidad para entender la variabilidad espacial de la fertilidad fosforada no ha sido debidamente explorada en Argentina.

Numerosos estudios internacionales han sugerido que la variabilidad espacial de la disponibilidad de P de un lote no siempre está relacionada a variaciones en el tipo de suelo, por lo que han sugerido a los muestreos de suelo en grilla como superiores en relación con cualquier tipo de muestreo dirigido o en zona (Franzen y Peck, 1993; Wollenhaupt et al., 1994; Mallarino y Witty, 2004). Si bien este tipo de muestreos presenta ventajas desde el punto de vista de la confiabilidad y precisión, su mayor costo y laboriosidad demanda contar con información para decidir en qué condiciones su implementación es necesaria. En un estudio reciente, Pagani y Rompani, 2022 simulaban la rentabilidad de la fertilización variable con P en base a un muestreo de suelo en grilla en 346 lotes agrícolas en Argentina y concluyeron que las mayores ventajas económicas en maíz, soja y trigo respecto al manejo de P con dosis uniforme se obtenían en los lotes con mayor variabilidad espacial en la fertilidad fosforada, pero especialmente, cuando la disponibilidad de P promedio del lote se encontraba entre 10 y 20 mg kg⁻¹.

No existen trabajos nacionales que comparen diferentes enfoques de zonificación para describir la variabilidad espacial de la fertilidad fosforada en un número de lotes lo suficientemente grande como para abarcar diferentes regiones del área agrícola argentina. Esta información sería de gran utilidad para poder adaptar el esquema de muestreo de suelo más apropiado en cada situación y así ganar escala en la adopción de tecnologías de fertilización fosforada con dosis variable.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 13 lotes de producción situados en las provincias de Salta, Santiago del Estero, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos, La Pampa y Buenos Aires (Figura 1). Estos lotes se encontraban bajo una rotación agrícola que incluía maíz, soja, trigo, girasol y poroto, y representan adecuadamente la diversidad edáfica de la Región Pampeana y NOA (Tabla 1).

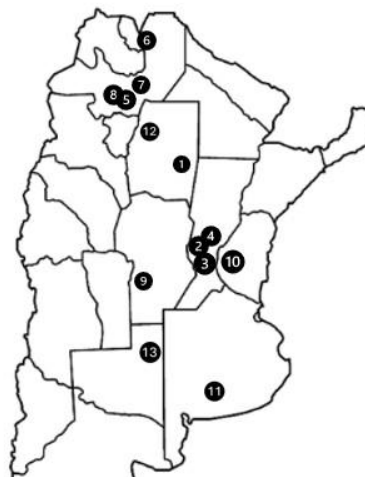


Figura 1: Mapa de Argentina mostrando la ubicación de los lotes relevados.

Tabla 1: Localidades y clasificación taxonómica de los suelos principales de cada sitio.

Sitio	Provincia	Localidad	Subgrupo de suelo
1	Santiago del Estero	Quimilí	Argiustol típico
2	Santa Fe	Cañada Rosquín 2	Argiudol acuico
3	Santa Fe	Cañada Rosquín 3	Argiudol acuico
4	Santa Fe	Cañada Rosquín 1	Argiudol acuico
5	Salta	Rosario de la Frontera 2	Argiustol típico
6	Salta	Orán	Udifluvente mólico
7	Salta	Metán	Hapludol entico
8	Salta	Rosario de la Frontera 1	Argiustol típico
9	Córdoba	Río Cuarto	Hapludol éntico
10	Entre Ríos	Gualeduay	Argiudol vértico
11	Buenos Aires	Tres Arroyos	Argiudol típico
12	Santiago del Estero	Pozo Hondo	Argiustol típico
13	La Pampa	General Pico	Haplustol éntico

En los 13 lotes seleccionados durante 2020 y 2022 se realizó un relevamiento de caracterización ambiental previo a la siembra de los cultivos que se basó en cuatro fuentes de información:

- 1) Muestreo de suelo en grilla,
- 2) Relevamiento CEa del suelo,
- 3) Relevamiento de elevación del terreno,
- 4) Combinación de mapas de NDVI de cultivos anteriores.

El relevamiento de CEa del suelo a 90 cm de profundidad se realizó en transectas distanciadas aproximadamente 25 m utilizando el sensor Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, Kansas, USA). Además, se llevó a cabo un relevamiento de altimetría mediante un sistema de posicionamiento global (GPS) de doble frecuencia con precisión dinámica en tiempo real (RTK, Trimble 5700, California, USA) que otorga precisión subcentimétrica (Figura 2). La medición de la CEa y elevación para todos los lotes se realizó en el período de barbecho y cuando el suelo se encontraba con contenidos de humedad cercanos a capacidad de campo (McCutcheon et al., 2006).

Debido a que no se contaba con mapas de rendimiento de cultivos anteriores de buena calidad en todos los sitios, se seleccionaron imágenes satelitales (Sentinel 2, Land Viewer, 2017) de al menos tres campañas anteriores con el objetivo de determinar los patrones espaciales de productividad de los lotes. Las fechas de las imágenes se establecieron considerando las etapas críticas de determinación de rendimiento de los cultivos de grano (Andrade et al., 1995), momento en el que se puede evidenciar con mayor precisión el potencial grado de variabilidad espacial de un lote de producción. A cada imagen se le calculó el NVDI $[(IRC-R) / (IRC+R)]$, donde: IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano (longitud de onda de 760-900 nm) y R es la reflectividad en el rojo (longitud de onda de 630-690 nm)] y luego se promediaron todas las imágenes fin de obtener un indicador de la productividad y variabilidad espacial de los sitios experimentales.

Se colectaron muestras de suelo siguiendo un esquema de muestreo en grillas alineadas con una densidad de 1 muestra (compuesta por 10 submuestras a 20 cm de profundidad) cada 1.6 has (Figura 2). Las muestras de suelo fueron secadas, molidas, tamizadas y analizadas para P según la metodología de Bray-1 (Frank et al., 1998).

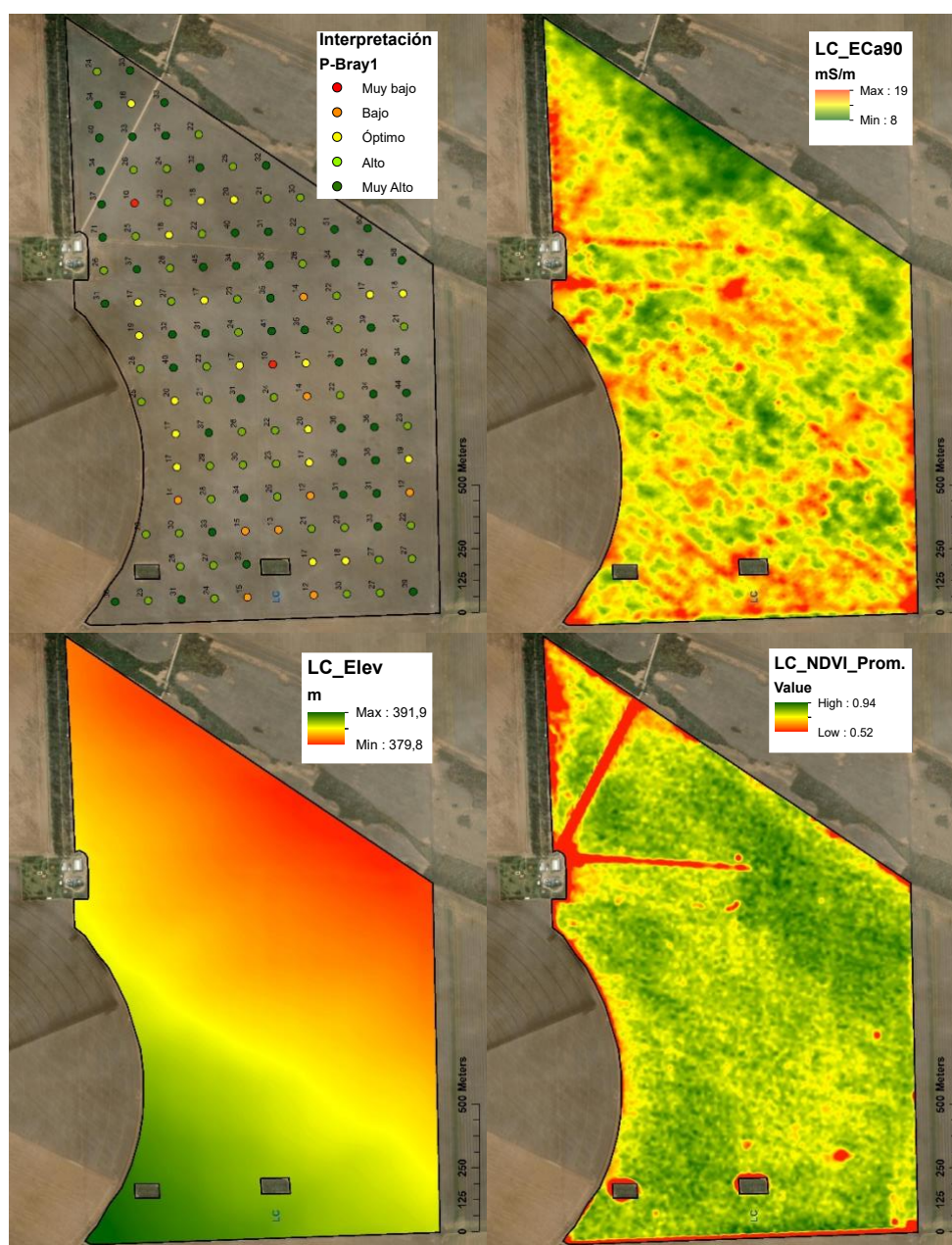


Figura 2: Mapa de fósforo (P) Bray-1 muestreado en grilla cada 1,6 has, mapa interpolado de conductividad eléctrica aparente (CEa90) y elevación (Elev.) del terreno y mapa del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de tres cultivos anteriores para el Sitio 9, Río Cuarto, Córdoba.

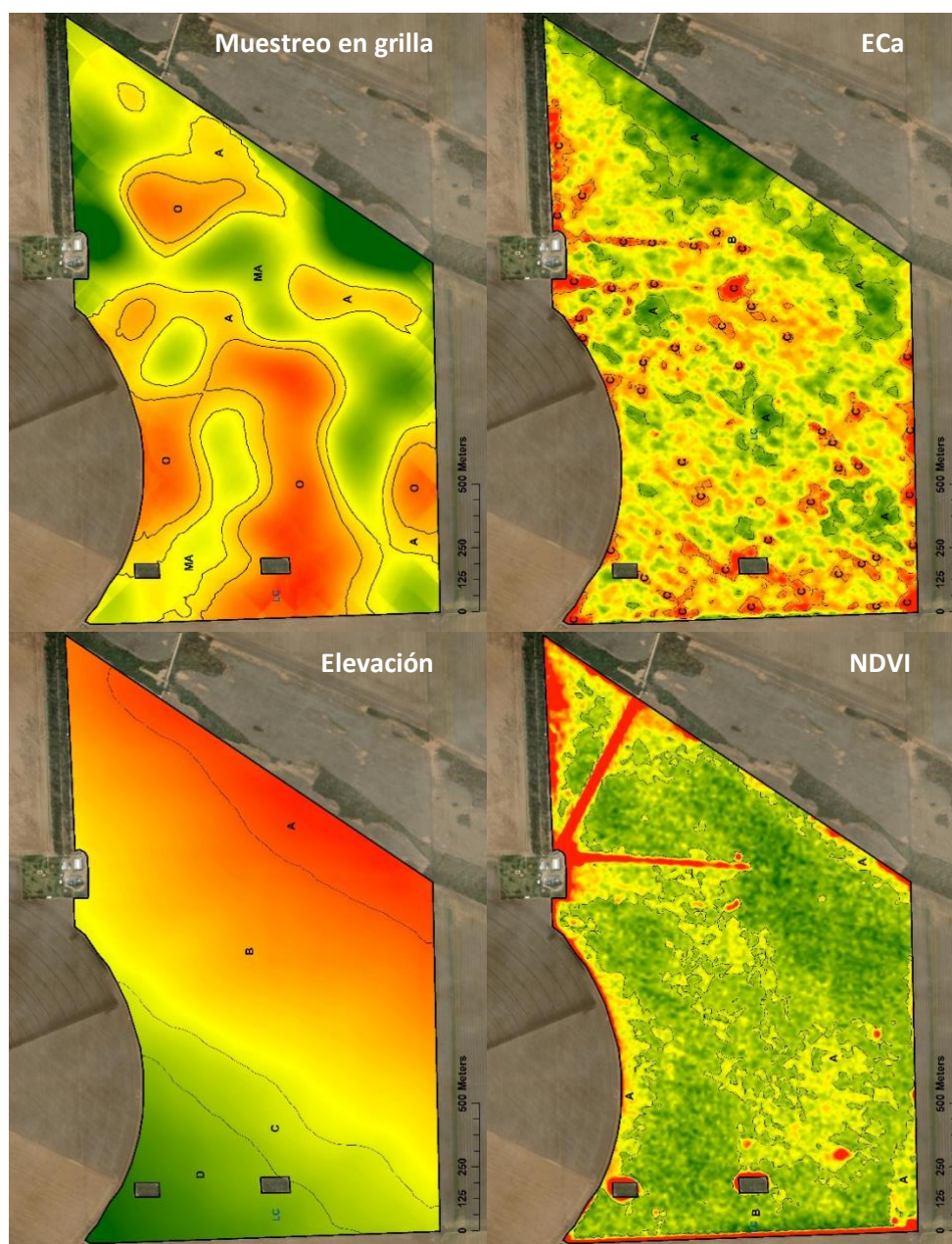


Figura 3: Zonas de manejo de fósforo (P) Bray-1 basadas en la interpolación del muestreo de suelo en grilla, el relevamiento topográfico (Elevación) y de conductividad eléctrica aparente (CEa) y un mapa promedio del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) de tres cultivos anteriores para el Sitio 9 en Río Cuarto, Córdoba. Las abreviaciones MB, B, O, A y MA, se refieren a las categorías de interpretación de P muy bajo, bajo, optimo, alto y muy alto, respectivamente. Las letras A, B, C y D se utilizan arbitrariamente para separar las zonas de manejo delineadas mediante la elevación, la ECa y el NDVI.

Los valores de CEa, elevación, NDVI promedio y los puntos de suelo proveniente del muestreo en grilla fueron interpolados usando ArcGIS 10.6 (ESRI, 2018, Redlands, CA, USA) mediante Kriging ordinario (Goovaerts, 1997) en una grilla regular de 5 x 5 m. Con la información proveniente del relevamiento se delinearon de dos a seis zonas de manejo (dependiendo del nivel de variabilidad) estableciendo cuatro

criterios de muestreo de suelo: en base a las zonas de elevación, ECa y NDVI, simulando un esquema de muestreo dirigido en zona y finalmente en base a las zonas delineadas en función de la interpolación del muestreo de suelo en grillas (Figura 3).

Las consideraciones particulares tenidas en cuenta para delimitación de ZM fueron las siguientes:

- Se estableció un máximo de seis ZM por lote y un mínimo de dos, dependiendo del nivel de variabilidad de los cuatro criterios de zonificación evaluados.
- Para todos los criterios se buscó que las zonas comprendieran al menos dos puntos de muestreo dentro de su zona, es decir que si una zona no cumplía este requerimiento se combinaba con la adyacente.
- Cuando las zonas delineadas fueron muy pequeñas (inferiores a 0,5 has) o muy angostas y difíciles de contemplar en la práctica con un sistema de fertilización variable, se las anexó a la zona adyacente.
- Para el caso de los resultados del muestreo de suelo se determinaron cinco zonas de disponibilidad de P siguiendo las clases de interpretación sugeridas por Sawyer et al. (2002). Estas clases establecen las categorías “muy bajo”, “bajo”, “óptimo”, “alto” y “muy alto” a los rangos < 7, 7-14, 15-20, 21-30 y > 30 mg kg⁻¹ P-Bray1, respectivamente. Cabe destacar que no todos los lotes contaban con una variabilidad de P suficiente para contemplar las cinco categorías de interpretación.

Para cada lote y zona delineada en base a los cuatro criterios de zonificación evaluados se calculó el promedio y el desvío estándar de los puntos de P provenientes del muestreo de suelo en grilla. Para cada sitio se seleccionó el o los criterios de zonificación que permitió o permitieron maximizar las diferencias de P entre zonas de un lote y minimizar la variabilidad de P dentro de las mismas. Para lograr este objetivo, se calcularon intervalos de confianza (90%) para cada uno de los promedios de P de cada zona perteneciente a los cuatro criterios de zonificación evaluados y se categorizó el criterio como “eficaz” para capturar la variabilidad espacial de P a nivel intra-lote si al menos el 50% de los intervalos de confianza no superponía sus límites. Se le asignó un número uno a aquellos criterios que lograron cumplir este requerimiento (eficaces) y un cero a los que no lo cumplieron. De esta manera se generó un ranking de eficacia de los criterios de zonificación evaluados. Una forma similar para evaluar la robustez de un criterio de delineación de zonas dentro de un lote fue anteriormente sugerida por Mallarino y Wittry (2004). Si bien esta metodología de evaluación de criterios de zonificación presenta algunas limitaciones y cierto grado de subjetividad, fue seleccionada sobre otros métodos por considerarla de una buena relación entre complejidad, flexibilidad y confiabilidad.

>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los sitios relevados presentaron niveles contrastantes de variabilidad espacial en sus propiedades edáficas y topográficas, en la productividad agrícola (datos no mostrados) y en la disponibilidad de P (Tabla 2). Los Sitios 7 y 11, presentaron los niveles más bajos de P (en la categoría de interpretación baja y muy baja según Sawyer et al. (2002), aunque con niveles de variabilidad intra-lote intermedios para el Sitio 11 (CV 33%) pero muy altos para el Sitio 7 (CV 89%). Los Sitios 1, 6, 8 y 12 presentan valores muy altos de P, pero con niveles de variabilidad intermedios (Tabla 2) a excepción del Sitio 1 donde se observó una marcada homogeneidad espacial (CV 17%). En el resto de los sitios se observaron valores de P en general cercanos al rango óptimo para la mayoría de los cultivos (Sawyer et al., 2002), pero con niveles variables de heterogeneidad espacial. Algo interesante para resaltar es que se observó una relación lineal negativa ($p < 0.05$) entre el CV y el valor promedio de P del lote ($R^2 = 0.4$, datos no mostrados), sugiriendo que la variabilidad espacial de P (considerada en términos relativos) tendió a aumentar a medida que disminuyó el nivel promedio de fertilidad fosforada del lote.

Esta heterogeneidad edáfica, topografía, productiva y en los niveles de P en el suelo entre y dentro de lotes representa adecuadamente la situación actual de la fertilidad fosforada del área agrícola argentina, por lo que el análisis realizado se considera satisfactoriamente representativo a nivel nacional. Sin embargo, es importante destacar que una proporción importante de los lotes relevados provienen de la zona norte del país con niveles de P más altos que los de la región pampeana.

Tabla 2: Estadísticas descriptivas de variabilidad espacial de la disponibilidad de fósforo (P-Bray1) para los 13 sitios relevados.

Sitio	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvío Standard	CV*
	----- mg kg ⁻¹ -----					%
1	54	56	9	65	9	17
2	17	13	6	71	13	76
3	25	24	16	51	8	32
4	26	25	14	44	7	27
5	18	18	2	44	10	55
6	61	59	24	99	17	28
7	9	8	3	78	8	89
8	38	36	11	76	18	47
9	28	27	10	71	10	36
10	15	11	3	47	10	67
11	6	5	2	15	2	33
12	46	50	18	79	12	26
13	26	24	13	60	9	35

*CV, Coeficiente de variación

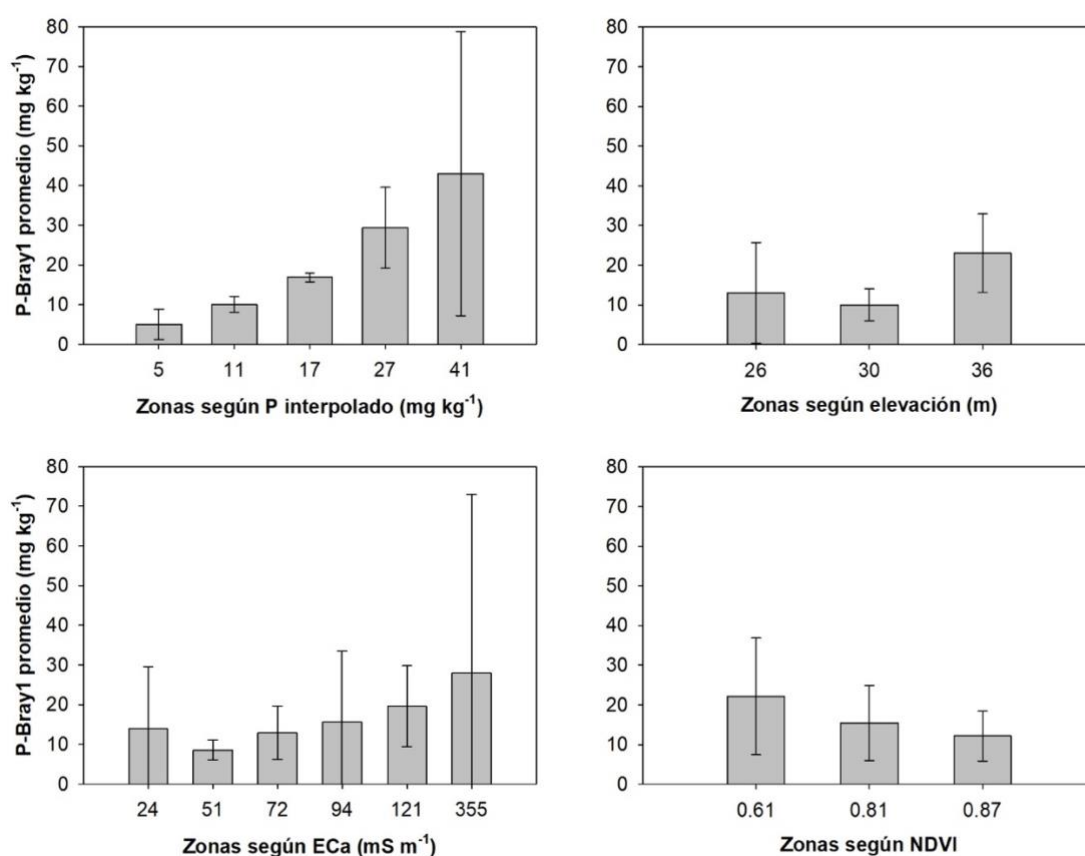


Figura 4. Fósforo disponible (P-Bray1) promedio e intervalos de confianza del 90% (barras verticales) para zonas dentro del lote delineadas en función de a) la interpolación del muestreo de suelo en grilla, b) la elevación del terreno, c) la conductividad eléctrica aparente a 90 cm (E_a90) y d) el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) de al menos tres cultivos anteriores para el Sitio 10 en Gualeguay, Entre Ríos.

En todos los sitios, la zonificación realizada a partir de la interpolación del muestreo de suelo en grilla fue efectiva para separar áreas contrastantes en la disponibilidad promedio de P dentro del lote y relativamente homogéneas dentro de sí (Tablas 3 y 4). En la Figura 4 se muestra un ejemplo de los cuatro criterios de zonificación para el Sitio 10. El número de zonas delineadas mediante este criterio varió de dos (Sitios 1, 6, 11 y 12) a cinco (Sitios 2 y 10), dependiendo del rango de disponibilidad de P presente. Los Sitios 1, 3, 4, 6, 9 y 12 presentaron valores de P dentro o por encima del rango de disponibilidad considerado como óptimo para la mayoría de los cultivos (15-20 ppm Bray-1, Sawyer et al., 2002, Sucunza et al., 2018), mientras que el resto de los sitios mostraron un nivel de variabilidad interesante desde el punto de vista agronómico y, por lo tanto, gran potencial para el manejo sitio-específico de la fertilización fosforada. Esto representa que en dichos sitios mediante la fertilización con dosis variable podrían potencialmente obtenerse, ahorros de fertilizante en las zonas dentro de los lotes con P alto y muy alto, e incrementos adicionales de rendimiento en las zonas de P muy bajas, respecto a un planteo de fertilización uniforme que no contemple dicha variabilidad. Otros trabajos nacionales e internacionales también han informado ventajas del muestreo de suelo denso para describir con precisión la distribución espacial de P a nivel intra-lote (Gutiérrez Böem y Marazas, 2004; Bermúdez y Mallarino, 2007). En este sentido, algunos trabajos (Franzen y Peck, 1995; Schepers et al., 2000) han mostrado el riesgo que se corre en realizar mapas erróneos de P cuando se tiende a disminuir la densidad de muestreo.

Una de las técnicas más antiguas de muestreo de suelos en zonas es siguiendo el mapa de tipo de suelo en regiones donde se cuente con esta información en una escala aceptable para determinar la variabilidad edáfica a nivel intra-lote (Carr et al., 1991). Sin embargo, varios estudios han concluido que el nivel de detalle de los mejores mapas de suelos existentes en la actualidad es insuficiente para ser utilizado como único criterio de delineación de ZM de P (Mallarino y Wittry, 2004). Por lo tanto, se ha propuesto a la CEa del suelo a través de sensores remotos como el EM38 (Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canadá) o de contacto como el Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, Kansas, EEUU) como una herramienta estable en términos relativos que sirve para encontrar diferentes patrones de variabilidad en el suelo (Fraisie et al., 2001). Esta técnica está ganando mucha popularidad en varios países, incluida la Argentina, para delinear ZM para P y otras variables (Johnson, 2003; Peralta et al., 2012).

En este trabajo, la ECa fue considerada un criterio eficaz para la zonificación de P sólo en los Sitios 3, 5, 7 y 8 (Tablas 3 y 4). Estos sitios coinciden en presentar extensa variabilidad en la ECa, producto de considerables variaciones texturales a nivel intra-lote. Este resultado podría explicarse por un lado por la mayor acumulación de P en los suelos a medida que disminuye la ECa y aumenta la proporción de partículas gruesas, reduciendo la productividad de los cultivos y la exportación de P del sistema (Sitio 3 y particularmente, Sitio 7). Por otro lado, es frecuente observar el mismo efecto cuando los valores de ECa son muy elevados, asociados a altos contenidos de arcilla y o menor profundidad efectiva del suelo (Sudduth et al., 1995), lo que probablemente también determine menores niveles de exportación de P con los granos y por lo tanto mayores niveles en el suelo (Sitio 5). Conway et al. (2017), trabajando en suelos alfisoles de Missouri, EEUU, destacaron la importancia de contemplar la profundidad efectiva del suelo (profundidad del horizonte arcilloso) mediante la ECa obtenida con un sensor remoto para potencialmente mejorar el manejo sitio-específico de P y potasio. Simón et al. (2013) informaron que el contenido de P mostró diferencias significativas entre las distintas clases de CEa delimitadas, donde las clases bajas presentaban mayores valores de P asociadas a suelos más livianos y probable menor productividad y por ende menor exportación del nutriente. Sin embargo, en otros sitios con rangos considerables en la ECa, no se observaron claras evidencias de que este criterio de zonificación sea efectivo para delinear zonas de disponibilidad de P, sugiriendo que existen otros factores más importantes que la textura, la profundidad efectiva del suelo y/o el contenido de sales para traccionar los patrones de variabilidad en la fertilidad fosforada del lote. Si bien en los Sitios 6 y 10 no se clasificó esta variable como “eficaz” para la delineación de zonas de P debido a la superposición de las zonas generadas (Tabla 3), pueden observarse patrones de P creciente a medida que aumentó la ECa de las zonas dentro de los Sitios 6 y 10, sugiriendo que existió un componente de la variabilidad de P explicada por la ECa.

El empleo de mapas de rendimiento de cultivos anteriores es otra técnica muy difundida para delinear ZM de P. Para la implementación efectiva de esta metodología, se requieren varios años de mapas de rendimiento del mismo lote para poder determinar en forma certera los patrones de variabilidad espacial. En un estudio de Boydell y McBratney (2002) se concluyó que, para lograr una zona con un patrón de rendimiento estable, se necesitan al menos cinco años de mapas de rendimiento. El uso de varios mapas de rendimiento permite, además de la delineación de ZM para el muestreo de suelos, el cálculo de la extracción de P, luego de realizado el análisis de la concentración de P en grano. Esta información es de gran utilidad para decidir las dosis de P en cada zona de manejo a fin de mantener niveles óptimos de P en el suelo.

Cuando no se dispone de mapas de rendimiento o no son de buena calidad, las herramientas de teledetección satelital como el NDVI, aportan información útil sobre el nivel de productividad de un lote, aunque no miden directamente la misma. En los Sitios 5, 7 y 9, la zonificación realizada a partir de imágenes NDVI de cultivos anteriores permitió separar áreas de P relativamente contrastantes y medianamente homogéneas dentro de sí (Tablas 3 y 4). Si bien es esperable observar menores niveles de P en el suelo en zonas dentro del lote con mayor capacidad productiva (mayor NDVI) y exportación de P, también es lógico encontrar una gran dispersión de valores de P dentro de cada zona de productividad porque el rendimiento de los cultivos no es la única causa que explica la variabilidad de P a nivel intra-lote. Además, la sensibilidad del NDVI como herramienta de caracterización productiva de un lote varía ampliamente debido a múltiples factores como el cultivo, el momento de la captura de la imagen, las condiciones atmosféricas y características intrínsecas de la campaña, entre otros (Rouse et al., 1973; Girón y Pagani, 2018).

En los Sitios 4, 5, 6 y 10, la elevación del terreno fue útil para separar satisfactoriamente áreas dentro del lote con P contrastante (Tablas 3 y 4). Estos sitios de las provincias de Salta y Entre Ríos presentaron diferencias máximas de elevación superiores a 9 m y en ambos se observó una relación positiva entre la disponibilidad de P de la zona y su elevación promedio, lo que podría explicarse por un gradiente productivo también asociado a la topografía. En ambas provincias es común observar menor productividad vegetal y por lo tanto exportación de nutrientes, en las zonas más elevadas del paisaje, normalmente sujetas a condiciones hídricas menos favorables. Al igual que lo observado para la ECa, otros sitios también presentaron diferencias topográficas considerables (Sitios 9 y 12 y, en mayor medida, Sitio 7) pero no se observó relación entre la elevación del terreno y la disponibilidad de P, sugiriendo que otras variables hayan tenido mayor peso relativo para explicar la fertilidad fosforada del lote. Un gran número de trabajos han sugerido que la topografía y las imágenes satelitales de suelo o cultivos pueden ser parte de la información utilizada para identificar zonas de muestreo, ya que tienden a reflejar diferentes propiedades del suelo y pueden complementar el uso de cartas de suelo (Franzen et al., 1998; Varvel et al., 1999; Kravchencko y Bullock, 2000; Schepers et al., 2000; Franzen y Nanna, 2002).

Mallarino et al. (2005) concluyeron que la metodología de muestreo de 1 muestra cada 2 has fracasó en mostrar con éxito la variabilidad de los lotes estudiados y que si bien es muy difícil establecer una única metodología ideal de muestreo que abarque todas las regiones productivas, tipos de suelos y casos; el muestreo en grillas mientras más intensivo se realice, mejor refleja la variabilidad del lote. Los autores, remarcan la importancia de analizar los costos de la práctica y los retornos económicos obtenidos. En EEUU el tema fue debidamente estudiado con la salvedad que las dosis uniformes en dicho país suelen ser en promedio mucho mayores a las utilizadas en Argentina y, por ende, los análisis de fertilización variable no suelen traer aumentos en el rendimiento sino ahorro y mayor eficiencia en el uso de los fertilizantes (Wittry y Mallarino, 2004).

Tabla 3. Intervalos de confianza (IC, 90%) para los promedios de fósforo (P) en el suelo de cada zona delineada según los cuatro criterios evaluados.

Criterio de zonificación									
Sitio	Zona	Grillas		Elevación		ECa*		NDVI**	
		IC inferior	IC superior	IC inferior	IC superior	IC inferior	IC superior	IC inferior	IC superior
----- mg kg ⁻¹ -----									
1	A	9.5	18.5	53.2	60.1	49.1	54.4	50.0	56.1
	B	54.0	56.0	52.8	59.7	53.6	56.8	52.0	56.8
	C			52.6	55.4	50.3	56.4	54.0	56.3
2	A	5.7	6.8	14.3	20.1	11.8	19.6	10.9	30.6
	B	7.1	13.8	12.3	22.6	11.9	27.2	7.0	31.1
	C	17.4	26.0			13.6	27.7	12.6	17.6
	D	25.9	28.1			9.4	14.8	19.2	34.9
		42.1	57.4			13.2	16.3		
3	A	17.1	18.9	23.1	31.8	23.9	34.2	8.9	40.1
	B	23.5	25.6	20.3	26.8	21.5	27.1	14.0	44.5
	C	32.3	50.2			17.1	21.5	18.3	25.7
	D							20.3	26.0
	E							21.5	31.5
4	A	16.4	20.3	25.6	38.4	3.1	38.9	22.4	49.6
	B	24.1	26.8	19.7	25.8			23.2	28.8
	C	31.2	42.8	20.0	27.0	16.8	31.5	18.5	24.0
						22.6	32.3		
						22.8	31.9		
5	A	4.8	5.7	16.7	19.9	10.8	15.2	13.9	17.5
	B	8.7	9.7	12.5	16.2	7.4	10.4	17.3	21.6
	C	17.7	20.0	16.3	24.3	16.0	20.7	15.7	18.7
		28.6	30.6	16.8	22.5	21.3	24.0		
		36.9	41.4	22.5	28.3	14.3	22.7		
6	A	47.1	52.1	47.1	55.7	53.4	64.9	56.0	63.7
	B	72.6	80.0	60.2	70.3	55.3	64.6	54.6	66.4
				57.8	72.1	50.4	60.2		
						59.4	79.5		
						85.5	94.5		
7	A	5.3	6.5	7.1	15.3	7.4	33.0	8,3	13.5
	B	8.6	10.0	7.8	9.5	8.5	10.1	6.6	7.9
		0.8	42.5	6.0	8.7	6.5	8.3		
						6.2	7.9		
						4.7	5.8		

8	A	-8.1	41.1	29.0	39.8	23.4	30.3	32.5	40.4
	B	13.1	16.7	30.0	42.7	30.3	46.8	23.9	33.2
		21.7	28.0	38.9	48.6	40.4	53.2		
		42.3	48.9			49.2	60.8		
						49.7	64.7		
9	A	15.3	18.4	26.6	34.1	23.0	30.5	28.3	34.6
	B	25.6	27.9	25.6	30.4	24.8	28.5	24.7	27.7
		37.1	44.5	24.2	29.0	26.9	32.9		
				21.0	27.6				
10	A	16.3	17.4	6.5	19.2	6.2	21.8	14.8	29.5
	B	25.1	60.9	8.2	12.2	7.3	9.8	10.7	20.2
	C	3.1	6.9	15.8	25.7	9.5	16.2	9.0	15.3
		9.0	11.0			6.7	24.6		
		24.2	34.4			14.5	24.7		
11	A	3.8	5.8	5.1	8.2	-3.2	10.2	4.8	6.9
	B	9.7	11.0	4.6	5.7	4.8	7.2	4.8	6.2
	C					4.3	5.3		
						4.9	9.9		
12	A	19.6	22.9	41.4	48.8	44.0	48.3	42.4	51.9
	B	46.8	50.4	46.5	52.1	42.5	60.8	34.8	57.9
	C			38.7	47.9			38.5	47.5
13	A	15.6	18.4	23.1	28.2	23.8	33.7	20.4	64.9
	B	21.9	24.6	22.7	29.4	21.7	27.3	20.3	24.8
	C	32.4	40.4			20.3	28.7	22.9	29.6
	D					19.3	40.0	22.6	28.1
	E					19.5	26.5		

* ECa, Conductividad eléctrica aparente

**NDVI, Índice de vegetación diferencial normalizado.

Tabla 4. Frecuencia de lotes donde la variabilidad de fósforo (P) entre las zonas delineadas según cada criterio de zonificación fue estadísticamente ($P < 0.1$) mayor a dicha variabilidad dentro de cada zona.

Sitio	Número de lotes			
	Criterio de zonificación			
	Grillas	Elevación	ECa*	NDVI*
1	1			
2	1			
3	1		1	
4	1	1		
5	1	1	1	1
6	1	1		
7	1		1	1
8	1		1	
9	1			1
10	1	1		
11	1			
12	1			
13	1			
Suma	13	4	4	3
%	100	31	31	23

* ECa, Conductividad eléctrica aparente

**NDVI, Índice de vegetación diferencial normalizado.

La mayoría de los estudios que han comparado diferentes esquemas de muestreo para P concluyen en que el muestreo en grilla presenta ventajas sobre el muestreo en zona para caracterizar la variabilidad de P en el suelo y la respuesta por parte de los cultivos a la fertilización fosforada (Sawchik y Mallarino, 2007). Sin embargo, Mallarino (2006) sugiere que esta podría no justificarse el 100% de los casos, principalmente en lotes con muy bajos (menos de 17 ppm) o altos (más de 35 ppm) niveles de P. En estas condiciones, la fertilización con una dosis alta y uniforme en el primer caso o la recomendación de no fertilizar en el segundo caso serían, naturalmente, las acciones recomendadas que no requieren del nivel de detalle de los muestreos densos.

>. CONCLUSIONES

Los resultados de esta simulación muestran que la delineación de ZM de P en base al muestreo de suelo en grilla fue el criterio más eficaz para capturar la variabilidad espacial de P a nivel intra-lote en los sitios evaluados. Esta metodología permitió delinear zonas de P que fueron más contrastantes entre sí y más homogéneas dentro de sí, en relación con los demás criterios de zonificación. La ECa, la elevación y el NDVI fueron criterios satisfactorios como herramienta de zonificación de P sólo en una baja proporción de los casos (entre 23 y 31%), particularmente en aquellos lotes con mayor variabilidad topográfica y textural, que normalmente están sujetos a una marcada heterogeneidad en la productividad de los cultivos, lo que genera un balance de P contrastante en lotes históricamente manejados con fertilización uniforme. En Argentina, será necesario implementar estas prácticas de muestreo de suelo intensivo en una mayor cantidad de zonas agroecológicas con distinta génesis de suelos e historial agrícola. Un estudio de este tipo, separando cada zona agroecológica, permitirá un mejor entendimiento de los patrones de distribución espacial de la fertilidad fosforada a nivel intra-lote para poder, eventualmente, recomendar menores densidades de muestreo cuando sea posible con la seguridad de no comprometer la precisión y eficacia en las prácticas de fertilización sitio-específica.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H. (1995): Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41:1-12.
- Balboa, G.R. (2014). Comparación agronómica de dos criterios de dosificación de nitrógeno en maíz en la llanura bien drenada del Centro y Sur de la Provincia de Córdoba. Tesis. Universidad Nacional de Río Cuarto. p 12-68.
- Basso, B., Fiorentino, C., Cammarano, D., Cafiero, G. y Dardanelli, J. (2012). Analysis of rainfall distribution on spatial and temporal patterns of wheat yield in Mediterranean environment. *Eur. J. Agron* 41 (2012) 52– 65.
- Bermúdez, M. y Mallarino A.P. (2007). Impacts of variable-rate phosphorus fertilization based on dense grid soil sampling on soil-test phosphorus and grain yield of corn and soybean. *Agron. J.* 99:822–832.
- Boydell, B., y McBratney A.B. (2002). Identifying potential within-field management zones from cotton yield estimates. *Precision Agric.* 3:9–23.
- Carr, P.M., Carlson G.R., Jacobsen J.S., Nielsen G.A. y Slogles E.O. (1991). Farming soils, not fields: A strategy for increasing fertilizer profitability. *J. Prod. Agric.* 4:57–61.
- Conway, L.S., Yost M.A., Kitchen N.R., y Sudduth K.A. (2017). Using topsoil thickness to improve site-specific phosphorus and potassium management on claypan soil. *Agron. J.* 109(5): 2291-2301.
- Doerge, T.A. (1999). Management Zone Concepts. S.I: Potash & Phosphate Institute. Site-Specific Management Guidelines 2, 4 p.
- Espósito, P.G. (2013). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto especial (MEME). Tesis. Universidad Nacional de Córdoba. p 13-87.
- Fraisse, C.W., Sudduth K.A. y Kitchen N.R. (2001). Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans. of the ASAE.* 44:155-166.
- Ferguson, R.B., Lark, R.M. y Slater, G.P. (2003). Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 937-947.
- Frank, K., Beegle D. y Denning J. (1998). Phosphorus. p. 21–29. En J.L. Brown (ed.) Recommended chemical soil test procedures for the North Central region. North Central Regional Publ. 221 (rev.). Publ. SB 1001.
- Franzen, D.W., Cihacek L.J., Hofman V.L. y Swenson L.J. (1998). Topography-based sampling compared to grid sampling in the Northern Great Plains. *J. Prod. Agric.* 11:364-370.
- Franzen, D.W. y Nanna T.N. (2002). Management zone delineation methods. En P.C. Robert, R.H. Rust, and W.E. Larson (ed.). In P.C. Robert, R.H. Rust, and W.E. Larson (ed.). Proc. Sixth Int. Conf. on Precision Agriculture. Minneapolis, MN. July 14-17, 2002. CD ROM. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Franzen, D.W. y Peck, T.R. (1993) Hoefft (ed.) Soil sampling for variable rate fertilization. Proc. Illinois Fert. Conf. Springfield, IL, 25–27 Jan 1993. Urbana-Champaign, IL, Univ. of Illinois, 81–91.
- Franzen, D.W. y T.R. Peck. (1995). Field soil sampling density for variable rate fertilization. *J. Prod. Agric.* 8:568-574.

Girón, P. y Pagani A. (2018). Evaluación del NDVI para delinear zonas de manejo de nitrógeno para el cultivo de maíz. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 15-18 mayo, San Miguel de Tucumán, Tucumán. Asociación Argentina de la Ciencia del suelo. pp 154-160.

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press.

Gutiérrez Boem, F.H, y P.A. Marasas. 2004. Pequeñas zonas con altas concentraciones de fósforo causan grandes errores en la determinación de fósforo disponible a nivel de lote. En: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos, Junio 2004.

Jamison, V.C., Smith, D.D. y Thornton, J.F. (1968). Soil and water research on claypan soil. USDA-ARS Technical Bulletin 1379, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Johnson, C.K., Mortensen D.A., Wienhold B.J., Shanahan J.F. y Doran J.W. (2003). Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. Agron. J. 95:303–315.

Kaspar, T.C., Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Karlen, D.L., James, D.E., Meek, D.W., Pulido, D. y Butler, H. (2003). Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. Precis. Agric. 4:87-101.

Kitchen, N.R., Sudduth, y K.A., Drummond, S.T. (1999). Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for clay pan soils. J. Prod. Agric. 12:607–617.

Kravchenko, A.N. y Bullock D.G. (2000). Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agron. J. 92:75-83.

Lund, D.L., Colin, P.E., Christy, D. y Drummond, P.E. (1999). Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. En: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E.(Ed). Precision Agriculture. Madison: ASA-CSSA-SSSA. pp. 1089-1100.

Mallarino, A.P. y Wittry D. (2004). Efficacy of Grid and Zone Soil Sampling Approaches for Site-Specific Assessment of Phosphorus, Potassium, pH, and Organic Matter. Precision Agriculture. 5: 131-144.

Mallarino, A.P. (2006). "Variable-rate application for phosphorus and potassium: Impacts on yield and nutrient management. Integrated Crop Management Conference, Iowa State University 219, 2006. Rescatado de www.iastate.edu

Mallarino, A.P., Beegle D.B. y Joern B.C. (2005). "Soil Sampling Methods for Phosphorus-Spatial Concerns". A SERA-17 Position Paper. Rescatado de: <https://sera17.wordpress.ncsu.edu/publications>

McCutcheon, M.C., Farahani, H.J., Stednick, J.D., Buchleiter, G.W. y Green, T.R. (2006). Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity and Texture Relationships in a Dryland Field. Biosyst Eng. 94:19-32.

Pagani, A. y Rompani J. (2022). Rentabilidad estimada del manejo variable de fósforo basado en un muestreo de suelo en grilla. Segundo Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión (CLAP 2022). Manfredi, Córdoba.

Pagani, A., Gutiérrez Boem F.H. y Estelrich C. (2025). Evaluación física y económica de la fertilización con fósforo en experimentos de largo plazo. Simposio Fertilidad 2025. Rosario, Santa Fe. 7 y 8 de mayo de 2025.

Pautasso, J.M., Albarenque, S., Schulz, G., Kemerer, A., Bedendo, D. y Melchiori, R. (2010). Delimitación de zonas de manejo mediante variables de suelo y validación para maíz. EN: INTA, EEA Manfredi. 9º Curso internacional de Agricultura de precisión, 4º Expo de

maquinarias precisas, 2º Gira tecnológica de precisión. Manfredi: Ediciones INTA. pp. 207-214.

Peralta, N.R., Costa J.J., Balzarini M. y Angelini H. (2012). Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93: 1-14.

Pierce, F.J., y Nowak P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67:1–85.

Rouse, Jr J.W., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*: 309–317 p.

Ruffo, M. L., Bollero, G. A., Bullock, D. S. y Bullock, D. G. (2006). Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agriculture*, 7(5): 327–342.

Sainz Rozas, H.R; M. Eyherabide; G. Larrea; N. Martínez Cuesta; H. Angelini; N. Reussi Calvo, and N. Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Simposio de Fertilidad FERTILIZAR. Rosario, 8 y 9 de mayo de 2019.

Sawchik, J., y Mallarino A.P. (2007). Evaluation of zone soil sampling approaches for phosphorus and potassium based on corn and soybean response to fertilization. *Agron. J.* 99:1564–1578.

Sawyer, J.E., Mallarino A.P., Killorn R., y Barnhart S. K. (2002). General guide for crop nutrient recommendation in Iowa. Publ. Pm-1688 (Rev.). Iowa State Univ. Ext., Ames.

Schepers, J.S., Schlemmer M.R. y Ferguson R.B. (2000). Site-specific considerations for managing phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29:125-130.

Simón, M., Peralta N. y Costa J. L. (2013). “Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades de suelo y nutrientes”. *Ciencia del Suelo* volumen 31, número 1. Rescatado de www.scielo.org.ar

Sucunza F., Gutiérrez Böem F., García F., Boxler M. y 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.

Sudduth K.A., Kitchen, N.R., Hughes, D.F. y Drummond, S.T. (1995). Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. In: Robert, P.C.et al. (Eds.), *Proc. Int. Conf. on Site- Specific Management for Agricultural Systems*, 2nd, Minneapolis, MN. 27–30 March 1994. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

Varvel, G.E., Schlemmer M.R. y Schepers J.S. (1999). Relationship between spectral data from an aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. *Precision Agric.* 1:291-300.

Vázquez M. E. (2002). Balance y Fertilidad Fosforada en suelos productivos de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N.º 16. Rescatado de <https://fertilizar.org.ar>.

Wittry, D. y Mallarino A. (2004). Comparison of Uniform-and Variable-Rate Phosphorus Fertilization for Corn-Soybean Rotation. *Agron. J.* 96:26-33.

Wollenhaupt, N.C., Wolkowski R.P. y Clayton M.K. (1994). Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *J. Prod. Agric.* 7:441–448.

Residualidad de la fertilización azufrada en el doble cultivo trigo/soja: ¿rastreo o suelo?

► ► **Biassoni M.M.^{1,2}, Gutiérrez Boem, F.H.^{3,4} & Salvagiotti, F.^{1,3}**

¹ Grupo Manejo de Cultivos, Suelo y Agua, EEA INTA Oliveros; ² Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, ³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; ⁴ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Buenos Aires.

✉ biassoni.micaela@inta.gob.ar

RESUMEN EXPANDIDO

Se han observado efectos residuales de la fertilización con azufre (S) en trigo sobre la soja de segunda en la región pampeana. Sin embargo, no se conoce con certeza si la respuesta de la soja de segunda se debe al S proveniente de la degradación de los residuos del rastreo de trigo o del S que se acumula en el suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la residualidad de la fertilización azufrada en una rotación trigo/soja de segunda sobre: i) la respuesta en el rendimiento de los cultivos y ii) la absorción de S. Se llevaron a cabo dos experimentos de fertilización con S en un doble cultivo trigo/ soja en la EEA INTA Oliveros, Santa Fe, Argentina, sobre un suelo Argiudol típico, serie Maciel. El experimento 1 (E1) se realizó en la campaña 2019/20 y el experimento 2 (E2) en la campaña 2020/21. El diseño experimental consistió en bloques completos al azar, con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron: T1) testigo sin fertilización con S en trigo ni en soja; T2) trigo sin fertilizar y soja sembrada sobre rastreo de trigo previamente fertilizado; T3) trigo fertilizado con S y soja sembrada sobre rastreo no fertilizado; y T4) ambos cultivos fertilizados con S. La dosis aplicada fue de 100 kg ha⁻¹ de yeso agrícola. Al momento de la cosecha del trigo, se intercambiaron los residuos de T2 y T3 (rastreo fertilizado vs. sin fertilizar) para luego sembrar la soja de segunda. Para evaluar el efecto residual del rastreo en la soja, se comparó T1 vs. T2; y para estimar el efecto del S residual en el suelo, T1 vs. T3. En E1, el rendimiento promedio del trigo fue de 3718 kg ha⁻¹ en los tratamientos sin S (T1 y T2), mientras que los tratamientos fertilizados (T3 y T4) mostraron una respuesta promedio del 19% (p<0,05), con respecto a los tratamientos sin fertilizar. En soja de segunda, el rendimiento promedio de T1 fue de 2751 kg ha⁻¹, con incrementos del 7% en T2 y del 22% en T3 y T4 (p<0,05), esto significó un efecto residual del rastreo de 198 kg ha⁻¹ y un efecto del S residual en el suelo de 571 kg ha⁻¹. En E2, no se observaron diferencias significativas en el rendimiento del trigo ni de la soja (p>0,05), con promedios de 1835 y 2437 kg ha⁻¹, respectivamente. Respecto a la absorción de S de los tejidos (S biodisponible), en E1 se observaron diferencias significativas entre tratamientos tanto en trigo como en soja (p<0,05). El trigo absorbió 10, 9, 12 y 13 kg S ha⁻¹ en T1, T2, T3 y T4, respectivamente; mientras que en soja, T1 y T2 absorbieron en promedio 10 kg S ha⁻¹, con incrementos del 25% y 44% en T3 y T4, respectivamente. Esto significó un efecto del S residual en el suelo de 1,8 kg S ha⁻¹ (T3 vs. T1) no observándose efecto significativo del efecto rastreo. En E2, no se registraron diferencias significativas, con absorciones promedio de 4 y 11 kg S ha⁻¹ para trigo y soja, respectivamente. Los resultados sugieren que el efecto residual del S en mayor medida se debería al S residual disponible en el suelo y en menor grado del aporte de la degradación del rastreo aéreo del cultivo antecesor junto al aporte de las raíces. Es necesario profundizar en el estudio de los distintos pools de S del suelo que podrían estar involucrados en este efecto residual.

Cultivos de cobertura mezclas: ¿La proporción de especies modifica la respuesta a la fertilización nitrogenada en el maíz posterior?

► ► **Araujo, J.G.^{1,2,*}, Bacigaluppo, S.¹, Limas, M.C.³, Giuli, F.³, Zabala, O.J.³, Barberis, I.M.^{2,3} & Salvaggiotti, F.^{1,2}**

¹ Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Oliveros (INTA); ² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); ³ Facultad de Ciencias Agrarias, UNR.

✉ araujo.jose@inta.gob.ar

RESUMEN

El uso de cultivos de cobertura (CC) tiene como finalidad brindar beneficios ecosistémicos, los cuales están asociados a caracteres funcionales y son proporcionales a la biomasa producida por el cultivo. Se ha sugerido que las mezclas de CC producen mayor biomasa respecto a los CC puros, por lo que podrían presentar un mayor efecto sobre el balance de agua y nitrógeno (N), y mejorar así la productividad del cultivo de maíz sucesor. Durante la campaña 2024/25 se llevó a cabo un experimento en la EEA INTA Oliveros con el objetivo de evaluar qué proporciones de especies optimizan la producción de biomasa aérea y su efecto en el contenido de agua útil y en la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz posterior. Se utilizaron tres especies: vicia (V), centeno (C) y nabo forrajero (NF), las cuales se sembraron como cultivos puros y en combinaciones dobles y triples con las siguientes proporciones: 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 33:33:33 y 60:20:20; y un barbecho sin CC. Se utilizó un diseño en parcelas divididas con tres repeticiones en bloques completos aleatorizados. Se cuantificó la biomasa aérea al momento del secado, el agua útil (AU) a la siembra del maíz y la respuesta del maíz a la fertilización con N. La producción de biomasa de los CC varió entre 2369 y 5083 kg ha⁻¹, registrándose los mayores valores en las mezclas V+C, y valores intermedios en las demás combinaciones evaluadas. A la siembra del maíz, el AU varió entre 69 y 142 mm en tratamientos con CC, en comparación con 186 mm en el barbecho. Los rendimientos del maíz fluctuaron entre 2658 y 8267 kg ha⁻¹, siguiendo la tendencia barbecho > nabo > mezclas > vicia > centeno. La respuesta al N difirió entre CC, siendo mayor en centeno, nabo y mezclas con proporción de vicia ≤50%, mientras que en el barbecho fue de baja magnitud.

Palabras clave: **cultivos de cobertura, nitrógeno, maíz.**

>. INTRODUCCIÓN

La inclusión de cultivos de cobertura (CC) en los sistemas productivos tiene como finalidad lograr una mayor cobertura del suelo en el tiempo y, a su vez, brindar múltiples servicios ecosistémicos (Restovich *et al.*, 2019). Algunos de estos beneficios son proporcionales a la producción de biomasa del cultivo, tales como la retención de nitrógeno (N) (Chatterjee y Clay, 2016), el secuestro de carbono del suelo (Novelli *et al.*, 2017) y la supresión de malezas (Buratovich y Acciaresi, 2019). En otros casos, además, los beneficios están asociados a caracteres funcionales, como la fijación biológica de N (Enrico *et al.*, 2020). Elhakeem *et al.* (2021) observaron que la producción de biomasa y el contenido de N en los tejidos fueron mayor en las mezclas de CC en comparación con CC puros, lo que modificaría la dinámica del N posteriormente. En las secuencias que incluyen CC y maíz de primera como cultivo posterior, los beneficios de utilizar CC multi-especie ha sido poco abordado en la región Pampeana. La adecuada elección de las especies, según sus caracteres funcionales, y la correcta proporción en las mezclas son aspectos clave a considerar para mejorar el balance de agua y N en el cultivo de maíz siguiente (Elhakeem *et al.*, 2023; Garba *et al.*, 2023). El objetivo del presente trabajo fue evaluar cuáles son las proporciones de especies que optimizan la producción de biomasa aérea y su efecto en el contenido de agua útil (AU), así como en la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz posterior.

>. MATERIALES Y MÉTODOS

Tratamientos y diseño experimental

El estudio se realizó durante la campaña 2024/25 en la EEA INTA Oliveros, Santa Fe (33°33'S; 60°52'O), sobre un suelo Argiudol típico, serie Maciel (INTA, 1985). El diseño experimental fue en parcelas divididas con tres repeticiones en bloques completamente aleatorizados, asignando el factor cultivos de cobertura en la parcela principal y las dosis de N en maíz en las subparcelas.

Se utilizaron tres especies como cultivos de cobertura: vicia (V), centeno (C) y nabo forrajero (NF), con un diseño de mezclas simplex lattice (SLMD) con 16 proporciones posibles. Las proporciones en la serie de reemplazo fueron: 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 33:33:33 y 60:20:20. Las proporciones de siembra se realizaron en base a una densidad óptima (en plantas m⁻²) correspondiente a cada cultivo puro, previamente evaluadas (Araujo *et al.*, 2024). Se incluyó un tratamiento de barbecho como control. Las dosis de N utilizadas en maíz fueron: 0, 60, 120 y 180 kg ha⁻¹ en forma de urea protegida.

Se registraron las precipitaciones diarias ocurridas durante el ciclo de los CC y el maíz.

Manejo de los cultivos

Los CC se sembraron el 2 de mayo sobre un rastrojo de maíz, en líneas distanciadas a 21 cm, con 82 kg ha⁻¹ de superfosfato simple. Los CC no se fertilizaron con N. La duración del ciclo fue de 112 días desde emergencia y secados químicamente. El cultivo de maíz (DK 72-72TRE) se sembró el 16 de octubre, con una densidad de 7,6 semillas m⁻². Las dosis de N fueron aplicadas manualmente en el estadio V2 del cultivo.

Biomasa aérea en los CC

Se determinó la biomasa aérea total acumulada en cada mezcla de CC al momento del secado. Se recolectaron dos submuestras de 0,50 m² por unidad experimental mediante cortes al ras del suelo. Las muestras fueron secadas en estufa a 60°C hasta peso constante.

Agua útil (AU)

A la siembra de los CC y el maíz se determinó el AU gravimétricamente hasta los 2 m de profundidad en las mezclas de CC con proporciones: 100%, 50:50% y 33:33:33%.

Rendimiento de maíz

Se cosecharon los dos surcos centrales de cada unidad experimental con cosechadora experimental. El rendimiento (kg ha^{-1}) fue corregido a 14,5% de humedad.

Análisis estadístico

Se utilizó un método SLMD para determinar el efecto de las interacciones de las diferentes especies sobre la producción de biomasa aérea total. Las proporciones de los componentes se representaron como fracciones de la combinación con un valor total de 1. El modelo matemático y el gráfico de contorno ternario se realizó con el paquete “mixexp” (R versión 4.4.3). Para evaluar el efecto de los CC y la dosis de N en el rendimiento de maíz, se utilizó modelos lineales mixtos (MLM, paquete “lme4”). Los datos se analizaron mediante ANOVA y cuando la interacción entre los factores fue significativa, se evaluó la respuesta a la dosis de N utilizando regresión cuadrática: $y = a + bx + cx^2$.

>. RESULTADOS

En el inicio de la campaña 2024/25, en la EEA Oliveros, se registraron precipitaciones por encima del promedio histórico en los meses de marzo y abril, que contribuyó a la recarga del perfil previo a la siembra de los CC (Figura 1). El ciclo de los CC (mayo-agosto) se caracterizó por bajas precipitaciones (47 mm), que fueron 69% inferiores respecto de los registros históricos para el mismo periodo. A pesar de esto, el establecimiento y crecimiento de los CC fue normal debido a que se inició con un perfil con buen contenido hídrico (254 mm). Las precipitaciones acumuladas durante el periodo secado CC – siembra maíz fue de 34 mm y durante el ciclo del maíz fue de 511 mm. Las precipitaciones mostraron un marcado déficit en el periodo alrededor de R1, afectando el momento de definición del número de granos.

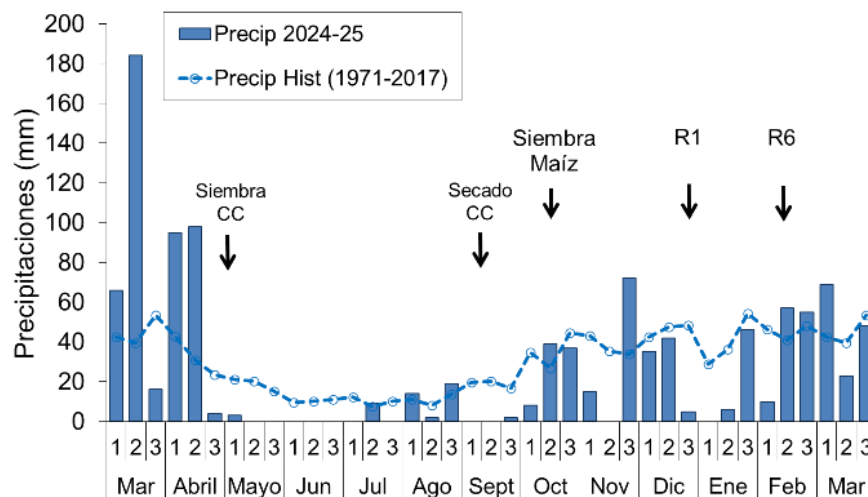


Figura 1: Precipitaciones decádicas en la campaña 2024/25 (barras) y promedio histórico (línea punteada).

La biomasa de los CC varió entre 2369 y 5083 kg ha^{-1} . La biomasa producida en los CC puros fue de 2897, 4301 y 2369 kg ha^{-1} para vicia, centeno y nabo respectivamente. La biomasa producida en las mezclas V+C y V+NF fue, en general, igual o superior a la obtenida con cualquiera de los CC puros, variando entre 27 y 75% más que el CC puro de menor producción y entre 0 y 18% más que el CC puro de mayor producción. Las mezclas C+NF y V+C+NF presentaron producciones de biomasa 26 a 76% más que el nabo puro y entre 5 a 32% más que la vicia pura, sin embargo, fueron inferiores al centeno puro (-3 a -29%).

Los mayores valores de biomasa producida se obtuvieron con mezclas V+C, con proporciones de C $\geq 50\%$, alcanzando valores entre 4909 y 5083 kg ha⁻¹ (Figura 2).

El AU a la siembra del maíz varió entre 69 y 142 mm en tratamientos con CC, lo que representó una disminución entre 24 a 63% del AU respecto al barbecho, debido a que las precipitaciones ocurridas luego del secado (34 mm) no fueron suficientes para recargar el perfil. El barbecho presentó un 62% de la capacidad máxima de almacenamiento de AU (300 mm), mientras que los CC presentaron valores inferiores al 50% (Figura 3).

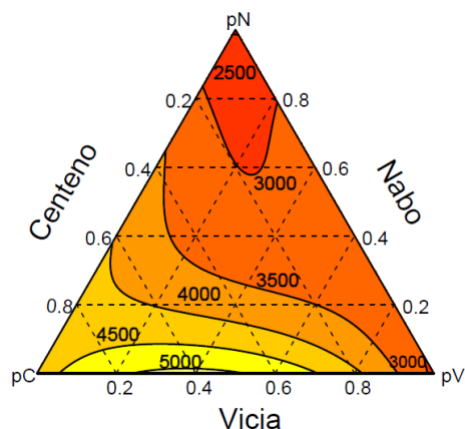


Figura 2: Biomasa aérea total en mezclas de CC. Las isolíneas unen diferentes proporciones de mezclas con igual biomasa total (kg ha⁻¹).

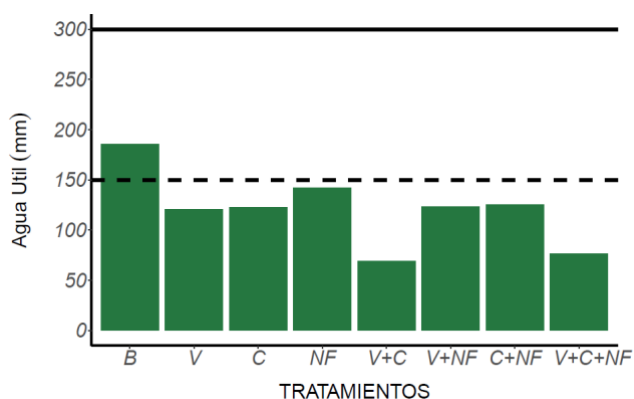


Figura 3: Agua útil a la siembra del maíz hasta los 2 m de profundidad para los tratamientos barbecho (B), vicia (V), centeno (C), nabo (NF), mezclas dobles 50:50 y la mezcla triple 33:33:33%. La línea llena representa la máxima capacidad de almacenamiento de agua útil y la línea punteada el 50%.

El rendimiento de maíz sobre CC varió entre 3190 y 4868 kg ha⁻¹, mientras que luego del barbecho rindió en promedio 7520 kg ha⁻¹. Debido a que hubo interacción significativa entre los factores evaluados, se ajustaron curvas de respuesta a N para cada mezcla de CC y el barbecho (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros de la ecuación cuadrática de la relación entre rendimiento y dosis de N para los tratamientos con CC puros y mezcla evaluados. Vicia (V), centeno (C) y nabo forrajero (NF).

CC Mezcla	Proporción	Parámetros			
		a	b	c	r ²
Puros	Barbecho	7073	10.4	-0.02	0.63
	Vicia	3340	16.8	-0.08	0.45
	Centeno	2553	30.9	-0.12	0.73
	Nabo	4124	41.6	-0.23	0.86
V+C	V25/75C	3093	30.6	-0.11	0.83
	V50/50C	2723	25.6	-0.12	0.49
	V75/25C	-	-	-	-
V+NF	V25/75NF	3753	13.4	-0.04	0.76
	V50/50NF	-	-	-	-
	V75/25NF	-	-	-	-
C+NF	C25/75NF	3425	30.6	-0.14	0.48
	C50/50NF	3623	17.4	-0.09	0.34
	C75/25NF	2684	44.2	-0.24	0.96
V+C+NF	V33/C33/NF33	2833	22.6	-0.09	0.46
	V60/C20/NF20	-	-	-	-
	V20/C60/NF20	2711	27.7	-0.11	0.86
	V20/C20/NF60	3922	23.7	-0.09	0.82

En los CC puros, el rendimiento en los testigos con dosis 0 kg N ha⁻¹ varió entre 2658 y 4097 kg ha⁻¹. Se observó que la respuesta al N siguió la tendencia: centeno > nabo > vicia, con valores máximos de respuesta de 79, 39 y 31%, respectivamente para una dosis de N de 120 kg ha⁻¹. En el barbecho, el tratamiento que no recibió N rindió 7024 kg ha⁻¹, con una respuesta máxima de 18% con 180 kg N ha⁻¹. En las mezclas V+C se observó respuesta cuando la vicia estuvo en proporción ≤50%. El rendimiento en las mezclas sin N varió entre 2877 y 3015 kg ha⁻¹. A medida que se incrementó la proporción vicia (de 25 a 50%), los valores de respuesta máxima al N tendieron a disminuir desde valores de 62 a 55%, para una dosis de 120 kg ha⁻¹ (Figura 4).

En las mezclas V+NF se observó respuesta únicamente en la proporción V25/NF75. El tratamiento con dosis 0 kg de N ha⁻¹ rindió 3817 kg ha⁻¹, con una respuesta máxima de 29% con 120 kg de N ha⁻¹.

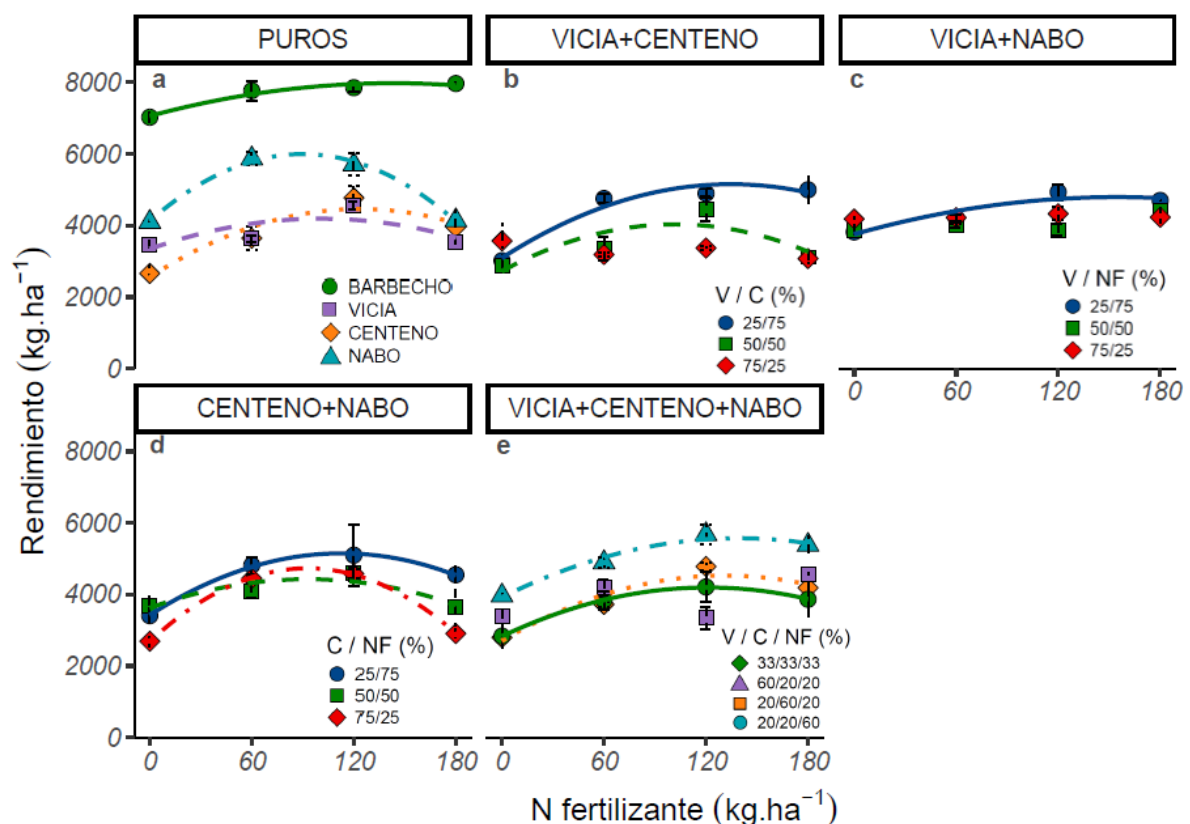


Figura 4: Rendimiento en grano de maíz (kg ha⁻¹) en función de las dosis de N para los CC puros y barbecho (a), y mezclas: vicia + centeno (b), vicia + nabo (c), centeno + nabo (d) y vicia + centeno + nabo (e). Las líneas indican el ajuste de una función cuadrática en aquellas proporciones donde hubo efecto significativo del N (p<0,05).

En las mezclas C+NF se observó respuesta positiva en el rendimiento. El rendimiento en las mezclas con 0 kg N ha⁻¹ varió entre 2693 y 3700 kg ha⁻¹, con respuestas máximas entre 24 y 70% según las proporciones de la mezcla y con dosis de N de 120 kg ha⁻¹.

En las mezclas triples V+C+NF hubo respuesta en las distintas proporciones, con excepción de la mezcla con mayor proporción de vicia. El rendimiento en los testigos con 0 kg N ha⁻¹ varió entre 2800 y 3969 kg ha⁻¹, con máximas respuestas entre 43 y 71% según las proporciones de la mezcla y con 120 kg de N ha⁻¹.

>. CONCLUSIONES

Las mezclas de cultivos de cobertura tendieron a presentar producciones de biomasa similares o ligeramente superiores respecto a los cultivos puros. Las escasas precipitaciones ocurridas entre el secado y la siembra del maíz, así como aquellas durante el periodo crítico, afectaron el crecimiento del cultivo posterior a los cultivos de cobertura, con rendimientos inferiores en comparación al cultivo de maíz que siguió a un barbecho. Sin embargo, se observó respuesta al agregado de N, la cual fue de mayor magnitud en los cultivos puros de centeno y nabo, y en las mezclas que incluyeron vicia en proporción $\leq 50\%$.

>. BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, J.G., Bacigaluppo, S., Sanmarti, N., García, A., y Salvagiotti, F. 2024. Densidad óptima de siembra en centeno, vicia y rábano forrajero como cultivos de cobertura. XXIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Catamarca, Argentina.
- Buratovich, M. V., y Acciaresi, H.A. 2019. Manejando malezas con cultivos de cobertura: una alternativa tecnológica para disminuir el uso de herbicidas. Revista de Tecnología Agropecuaria 10(39):51-55.
- Chatterjee, A., y Clay, D.E. 2016. Cover crops impacts on nitrogen scavenging, nitrous oxide emissions, nitrogen fertilizer replacement, erosion, and soil health. Soil Fertil. Manag. Agroecosyst. 2016, 76–88.
- Elhakeem, A., Bastiaans, L., Houben, S., Couwenberg, T., Makowski, D. y van der Werf, W. 2021. Do cover crop mixtures give higher and more stable yields than pure stands? Field Crops Research 270, 108217.
- Elhakeem, A., Porre, R.J., Hoffland, E., Van Dam, J.C., Drost, S.M., y De Deyn, G.B. 2023. Radish-based cover crop mixtures mitigate leaching and increase availability of nitrogen to the cash crop. Field Crops Research 292, 108803.
- Enrico, J.M., Piccinetti, C.F., Barraco, M.R., Agosti, M.B., Ecclesia, R.P., y Salvagiotti, F. 2020. Biological nitrogen fixation in field pea and vetch: Response to inoculation and residual effect on maize in the Pampean region. European Journal of Agronomy 115, 126016.
- Garba, I.I., y Williams, A. 2023. Integrating diverse cover crops for fallow replacement in a subtropical dryland: implications on subsequent cash crop yield, grain quality, and gross margins. Agronomy 13, 271.
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; 1985. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3360- 7 y 8 –Totoras y Serodino.
- Novelli, L.E., Caviglia, O.P., y Piñeiro, G., 2017. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. Soil and Tillage Research 165, 128-136.
- Restovich, S.B., Andriulo, A.E., Armas-Herrera, C.M., Beribe, M.J., y Portela, S.I., 2019. Combining cover crops and low nitrogen fertilization improves soil supporting functions. Plant and Soil 442, 401-417.

Volatilización y retorno económico de las principales fuentes nitrogenadas para maíz en el NOA

► ► **Acreche M^{1,*}, Pagani, A², Reynoso S.³, Bonelli C⁴,
Santamaria E⁴ & Schneider Teixeira, A³**

¹ EEA Salta INTA-CONICET, ² CLARION, ³ Y-TEC, ⁴ YPF Agro

✉ acreche.martinnta.gob.ar

RESUMEN EXPANDIDO

El nitrógeno (N) es un nutriente que limita la producción de los cultivos, por lo que su adición a través de la fertilización es una práctica habitual en los sistemas productivos del núcleo pampeano. Sin embargo, su utilización es de diversa adopción en regiones extrapampeanas. Entre los procesos asociados a la fertilización nitrogenada que pueden generar ineficiencias y contaminación ambiental se encuentra la volatilización como amoníaco. De acuerdo con la formulación del fertilizante y a las condiciones ambientales, las pérdidas por volatilización pueden variar significativamente. En el NOA, la fertilización nitrogenada en maíz generalmente se realiza al voleo alrededor del estadio de seis hojas expandidas (V6), coincidiendo este período con la ocurrencia de alta temperatura y humedad variable del suelo, factores que pueden favorecer la volatilización. Por ello, los objetivos de este trabajo fueron determinar, en condiciones de campo del NOA, el impacto de tres formulaciones de N sobre (i) las pérdidas de N por volatilización, (ii) el rendimiento del cultivo de maíz, (iii) el retorno neto a la fertilización, (iv) la dinámica de absorción del N, y (v) las eficiencias agronómicas y de recuperación del N. En este resumen se reportan los resultados de i, ii, y iii.

Durante tres ciclos de cultivo consecutivos (2021/22, 2022/23 y 2023/24) se condujeron ensayos a campo en lotes de producción agrícola en cuatro localidades de la provincia de Salta (Cerrillos, Valle de Lerma; Rosario de la Frontera; General Mollinedo; Las Lajitas). En los 12 experimentos, los tratamientos consistieron en tres formulaciones de fertilizante nitrogenado, urea o (U), urea con inhibidor de ureasas NBPT (U-NBPT) y nitrato de amonio calcáreo (CAN), y cinco dosis de N (0, 50, 100, 150 y 250 kgN/ha). Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones y las parcelas consistieron en 8 surcos separados a 0,52 m y de 15 m de longitud. La volatilización de amoníaco se determinó para las tres fuentes en los tratamientos 0, 100 y 250 kgN/ha mediante el método de cámaras semiabiertas ventiladas y esponjas embebidas en ácido fosfórico. Las determinaciones de volatilización se realizaron hasta la ocurrencia de una lluvia mayor a 10 mm continuos. Se determinó el rendimiento en grano mediante cosecha manual y trilla estacionaria.

La dinámica de volatilización mostró que, en general, el pico de volatilización ocurrió alrededor de las 48 h desde la fertilización para U, mientras que el mismo disminuyó y se retrasó 24 a 48 h para U-NBPT. En el caso del CAN, la volatilización fue baja y constante a lo largo de todo el período evaluado. El porcentaje del nitrógeno aplicado como fertilizante que se volatilizó (promedio de los 12 sitios) fue mayor cuando se fertilizó con U (14%), intermedio con U-NBPT (7%), y menor con CAN (1%). La respuesta del rendimiento del maíz a las diferentes formulaciones y dosis de N fue variable entre ciclos de cultivo y sitios de experimentación. En Los sitios/años donde se observó respuesta significativa a la fertilización nitrogenada, la respuesta varió entre 730 y 3080 kg/ha, no existiendo diferencias marcadas entre formulaciones. Sin embargo, en estos sitios/años, la dosis óptima económica (DOE) promedio para para U y U-NBPT fue de 118 kgN/ha, la cual fue consistentemente mayor que para CAN (73 kgN/ha en promedio), resultando el retorno neto a la fertilización con N mayor para U y U-NBPT (265 US\$/ha en promedio) y menor para CAN (117 US\$/ha en promedio).



www.fertilizar.org.ar