



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAICES SEMBRADOS EN
FECHAS TEMPRANAS EN AMBIENTES CON NAPA DEL SUDESTE DE
CÓRDOBA**

ING. AGR. ALEJO RUIZ

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN MANEJO Y
CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES

DIRECTOR: DR. LUCAS BORRÁS
CO- DIRECTOR: DR. FERNANDO SALVAGIOTTI

2021

MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAICES SEMBRADOS EN FECHAS
TEMPRANAS EN AMBIENTES CON NAPA DEL SUDESTE DE CÓRDOBA

Alejo Ruiz

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en campos de productores socios de AAPRESID en los Departamentos Unión y Marcos Juárez, de la Provincia de Córdoba, durante el período comprendido entre septiembre de 2016 y agosto de 2018, bajo la dirección del Dr. Lucas Borrás y la co-dirección del Dr. Fernando Salvagiotti.

Nombre y firma del Maestrando

Alejo Ruiz

Nombre y firma del Director

Lucas Borrás

Nombre y firma del Co - Director

Fernando Salvagiotti

Defendida:de 20__.

AGRADECIMIENTOS

A Lucas B. por su dedicación a mi formación y haberme motivado a continuar en mi perfeccionamiento como investigador.

A Fernando S. por sus valiosos aportes e instancias de discusión del trabajo de tesis, como así también en otros aspectos de los sistemas agrícolas.

A Brenda G. por sus contribuciones y brindarme herramientas en el análisis estadístico.

A la Chacra Justiniano Posse de AAPRESID por abrirme sus puertas, ofrecerme el escenario para realizar el trabajo de tesis y apoyarme en lo laboral y humano: Javier O., Jorge M., Juan J., Emiliano L., Lisandro M., Ignacio J., Gabriel P., Alexis C., Carolina D., Ramón G., José G., Mauricio P., German P., Gustavo R., Francisco R., Pablo P., Juan G., Rubén T., José M., Fabricio E., Julio P., Daniel C., Guillermo H., Nicolás G., Arnolfo C., Alejandro R., y Federico P.

A la Fundación de Ciencias Agrarias UNR y la Escuela de Posgrado por el otorgamiento de la beca y brindar el ambiente de formación.

A mis compañeros de trabajo del programa Sistema Chacras por su confianza y apoyo: Rodolfo G., Tomás C., Andrés M., Cintia S., y Florencia A.

A AAPRESID por estos seis años de experiencia junto a productores.

Al GIMUCE por el apoyo e incentivo y permitirme utilizar sus instalaciones para procesar las muestras.

A INTA Marcos Juárez por realizar los análisis de suelo.

A Profertil por contribuir con el fertilizante.

Y finalmente, a los evaluadores de este trabajo de tesis por su tiempo y sugerencias: Beatriz B., Gabriel E., y Nahuel R.C.

DEDICATORIAS

A mi familia Juan, Tina, Pedro y Juli por su paciencia y estar cuando los necesito.

A Anto, mi compañera en la vida, por la energía y serenidad que me transmitís

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS

Trabajos en revistas internacionales derivados de la tesis:

Ruiz, A.; Salvagiotti, F.; Gambin, B.L.; Borrás, L. 2020. Maize nitrogen management in soils with influencing water tables within optimum depth. Crop Science, Vol 61, pgs. 1386-1399. <https://doi.org/10.1002/csc2.20379>.

Trabajos presentados en jornadas y congresos derivados de la tesis:

Ruiz, A. 2020. Maíz: con napa es otra cosa. XXVIII Congreso AAPRESID. Rosario, Santa Fe. (Presentación oral).

Ruiz, A.; Salvagiotti, F.; Borrás, L. 2019 Manejo de nitrógeno en maíz sembrado en fechas tempranas en el sureste de Córdoba. VII encuentro académico público-privado, Bayer e INTA Oliveros. Oliveros, Santa Fe. (Presentación oral).

Ruiz, A.; Salvagiotti, F.; Borrás, L. 2019. Fertilización con nitrógeno en maíz de siembra temprana en el sudeste de Córdoba. Simposio de Fertilidad 2019. Rosario, Santa Fe. (Presentación poster).

Ruiz, A.; Rubio, F.; Borrás, L. 2018. Estrategias ofensivas en maíz para maximizar la producción en el sudeste de Córdoba. XXVI Congreso AAPRESID. Córdoba, Córdoba. (Presentación oral).

ÍNDICE

Abreviaturas y Símbolos	8
Resumen	9
Abstract	11
Introducción	12
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos	14
Hipótesis a evaluar	14
Materiales y métodos	16
Características del área de estudio.....	16
Manejo de los cultivos y tratamientos de fertilización con nitrógeno.....	18
Determinaciones en el suelo y el cultivo	20
Análisis estadístico	21
Resultados	25
Variabilidad ambiental explorada	25
Respuesta a la dosis de nitrógeno en diferentes momentos entre sitios	26
Variables específicas del sitio que afectan la respuesta a la dosis de nitrógeno	29
Discusión	36
Conclusiones	40
Contraste de hipótesis	40
Perspectivas para futuras líneas de investigación.....	41
Bibliografía	42
Anexo	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio y distribución de las principales series de suelo.	16
Figura 2. Horizontes y textura de las principales series de suelo del área de estudio.	17
Figura 3. Temperatura máxima, media y mínima promedio mensual. Precipitaciones y evapotranspiración de referencia mensual.....	17
Figura 4. Distribución geográfica de los 15 experimentos.	18
Figura 5. Oferta total de agua en cada sitio.....	25
Figura 6. Rendimiento de los tratamientos 0 y 240 kg N ha ⁻¹	26
Figura 7. Diferencia de rendimiento entre momentos de fertilización (siembra menos V7) para las cinco dosis de N en cada sitio.	28
Figura 8. Rendimiento para la combinación de tratamientos dosis de N y momento de fertilización.....	28
Figura 9. Rendimientos ajustados obtenidos del modelo lineal mixto de intercepto y pendiente aleatoria con efecto del sitio (modelo A).....	29
Figura 10. Correlaciones entre los parámetros β_{0j} y β_{1j} con NN-aparente, contenido de N-NO ₃ del suelo a la siembra y cultivo antecesor.	31
Figura 11. Respuesta en rendimiento a la dosis de N observada en cada sitio y representación de los modelos finales considerando las componentes fijas.	34
Figura 12. Respuesta en rendimiento esperada a la dosis de N considerando diferentes variables explicativas a nivel de sitio.....	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las variables ambientales y de manejo de los 15 experimentos.....	19
Tabla 2. p-valor y contribución relativa de cada efecto a la varianza total del rendimiento. .	27
Tabla 3. Parámetros β_{0j} , β_{1j} , y β_{2j} de la ecuación 1 (modelo A).....	30
Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre los parámetros β_{0j} , β_{1j} , y β_{2j} , y las variables cuantitativas evaluadas como variables explicativas.....	31
Tabla 5. Resumen de las estadísticas de los modelos finales y los efectos fijos de las variables explicativas sobre el rendimiento y la respuesta en rendimiento a la dosis de N...	32
Tabla 6. Componentes de la varianza de los efectos aleatorios de los modelos explorados.	33

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- AIC: Criterio de información Akaike
ANOVA: Análisis de la variancia
AT: Oferta total de agua
AU: Agua útil
ca.: Aproximadamente
CEA: Conductividad eléctrica aparente
cm: Centímetro
CV: Coeficiente de variación
DOE: Dosis óptima económica
DPL: Densidad de plantas logradas
EE: Error estándar
ET0: Evapotranspiración de referencia
FS: Fecha de siembra
i.e.: Es decir
kg: Kilogramo
m: Metro
Mg: Mega gramo
mm: Milímetro
MO: Materia orgánica
N: Nitrógeno
N_{an}: Nitrógeno anaeróbico
NN-aparente: Nitrógeno nativo aparente
N-NO₃: Nitrógeno de nitratos
P: Fósforo
PP: Precipitaciones
ppm: Partes por millón
r: Coeficiente de correlación
R²: Coeficiente de determinación
R²_c: Coeficiente de determinación condicional
R²_m: Coeficiente de determinación marginal
REML: Máxima verosimilitud restringida
vs.: frente a

RESUMEN

Las dos limitantes a la producción de maíz (*Zea mays* L) a nivel mundial más importantes son la disponibilidad de agua y nitrógeno (N). Gran parte de la Región Pampeana Argentina se encuentra afectada por el ascenso de las napas freáticas, lo que contribuye a incrementar y estabilizar los rendimientos en maíz cuando las napas fluctúan dentro del rango de profundidad óptima. Sin embargo, no existen estudios que aborden el manejo de la fertilización con N en estos ambientes, lo que es relevante para la sustentabilidad de los sistemas productivos. Los objetivos de esta tesis fueron, (i) determinar la respuesta en rendimiento a las dosis de N, (ii) comparar el efecto del momento de fertilización con N sobre el rendimiento, (iii) cuantificar el efecto de variables ambientales y de manejo sobre la respuesta en rendimiento a la fertilización con N, y (iv) modelar la respuesta en rendimiento a la fertilización con N que permitan estimar la dosis óptima económica (DOE) en suelos con influencia de napa (menor a 3,5 m de profundidad). Se realizaron un total de 15 experimentos bajo condiciones de secano (combinaciones sitio x año) en maíces sembrados en fechas tempranas donde se evaluaron cinco dosis de N (0, 60, 120, 180 y 240 kg N ha⁻¹) en dos momentos diferentes (siembra y siete hojas completamente desplegadas [V7]) en un diseño factorial.

El cultivo contó con una oferta total de agua (agua útil del suelo, napa y precipitaciones) de 771 a 1.062 mm, según el sitio. El contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra varió entre 50 y 74 kg N ha⁻¹ y el NN-aparente (suministro de N nativo aparente del suelo), entre 82 y 158 kg N ha⁻¹. La respuesta en rendimiento a la dosis de N varió entre 2.300 a 6.900 kg ha⁻¹ (19 a 92% en términos relativos). El rendimiento obtenido con dosis 0 kg N ha⁻¹ varió entre 7.600 y 12.800 kg ha⁻¹, mientras que el rendimiento obtenido con dosis 240 kg N ha⁻¹, varió entre 13.700 y 16.900 kg ha⁻¹. Las diferencias en la respuesta a la dosis de N entre sitio se explicaron principalmente por la capacidad de los suelos para suministrar N ($r = -0,81$; $p < 0,01$) y no por los rendimientos máximos alcanzables. El momento de fertilización tuvo un reducido e inconsistente efecto en el rendimiento que varió entre sitios. El contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra, el cultivo antecesor y el NN-aparente fueron las variables que explicaron las respuestas diferenciales en rendimiento entre sitios. Se proponen tres modelos finales, uno con cada variable explicativa, con ajustes de entre 0,83 y 0,90 (R^2_c). Con una relación de precios grano:N de 10, la DOE varió entre 117 y 206 kg N ha⁻¹. Los resultados de esta tesis mostraron que la definición de la dosis de N fue más importante que el momento de fertilización para la decisión del manejo de la fertilización

nitrogenada en maíz sembrado en fechas tempranas en ambientes con napa en profundidades óptimas.

Palabras clave: análisis de suelo, dosis de nitrógeno, modelos lineales mixtos, momento de fertilización, nitrógeno nativo-aparente.

ABSTRACT

The central temperate Argentinean region is currently affected by rising water tables, allowing higher and more stable maize yields (*Zea mays* L) when they fluctuate within optimum depth. However, limited information was available for optimizing N management in these environments. Adequate fertilization programs is relevant for the sustainability of the production systems. Yield response to N rates was explored in soils with influencing groundwater (always less than 3.5 m depth), and different environment and management variables were examined to help explain differential yield responses across sites. A total of 15 rainfed experiments (site x year combinations) were conducted with five N rates (0 to 240 kg N ha⁻¹) tested at two different timings (sowing and V7) in a factorial design. A consistent yield response to N rate was evident, increasing yields from 2300 to 6900 kg ha⁻¹ across sites. Yields at maximum N levels ranged from 13700 to 16900 kg ha⁻¹. Fertilization timing had a minor and inconsistent effect on yield across sites. At a maize grain:fertilizer N price ratio of 10, the economically optimal N rate ranged from 117 and 206 kg N ha⁻¹. Soil N-NO₃ at sowing, previous crop, and apparent-INS (apparent-indigenous N supply) helped explain differential yield responses across sites, and response models for obtaining economic optimum rates considering the influence of these variables are provided. These results highlight the relevance of N rate, rather than timing, as a critical crop management decision in environments with high water availability and yield.

Keywords: nitrogen rate, fertilization timing, soil test, apparent-indigenous N supply, linear mixed-effects models

INTRODUCCIÓN

La producción mundial de alimentos se enfrenta al desafío de satisfacer la demanda de una población en continuo crecimiento que exige una mayor productividad de la agricultura, con un menor impacto ambiental (Andrade et al., 2017). Para poder disminuir el impacto ambiental de la agricultura se deben reducir las brechas de rendimiento, mientras se incrementa la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes (Foley et al., 2011). Aumentar la eficiencia en el uso de los recursos implica una mejor comprensión de la dinámica de los nutrientes y los requerimientos de los cultivos, donde el desarrollo a campo y la adopción de prácticas agronómicas superadoras son fundamentales (Tilman et al., 2002). Para ello, en cualquier decisión de fertilización se deben considerar las interacciones entre el manejo de la nutrición y el medio ambiente (Morris et al., 2018), y optimizar el manejo de los nutrientes es fundamental para la sustentabilidad de los sistemas productivos. En 2019, Argentina fue el cuarto mayor productor mundial de maíz (*Zea mays* L) y el segundo mayor exportador (USDA-FAS, 2020). Al igual que en la mayoría de los sistemas de producción de maíz en secano, en Argentina las dos limitantes a la producción más importantes son la disponibilidad de agua y nitrógeno (N; Aramburu Merlos et al., 2015).

Si bien a nivel mundial la principal limitante a la producción de maíz es la disponibilidad de agua, en muchas zonas de la Región Pampeana Argentina la producción de este cultivo se realiza en ambientes con influencia de napas freáticas (Alsina et al., 2020). Se considera que una napa comienza a tener influencia en los cultivos agrícolas cuando se encuentra a menos de 4 m de profundidad (Nosetto et al., 2009). La Región Pampeana es considerada una hiperllanura, caracterizada por un gradiente topográfico regional muy bajo (<0,1%), donde los movimientos verticales del agua prevalecen sobre los horizontales (Jobbágy et al., 2008). Durante los últimos 30 a 40 años los cultivos anuales reemplazaron a los pastizales, reduciendo la evapotranspiración anual, provocando la recarga de los acuíferos y el ascenso de los niveles freáticos (Nosetto et al., 2012). Este ascenso afectó la disponibilidad total de agua para los cultivos, aportando en algunos casos más de 300 mm de agua (i.e, la mitad de requerimientos de agua del maíz; Portela et al., 2009). Una mayor disponibilidad de agua cuando el nivel freático fluctúa dentro de los rangos óptimos (1,4 a 2,45 m de profundidad; Nosetto et al., 2009) contribuye a lograr elevados y más estables rendimientos (Rizzo et al., 2018; Archontoulis et al., 2020). Los aumentos en rendimiento por presencia de napa se observan en maíces sembrados en fechas tempranas, pero no así en tardías, donde puede llegar a ocasionar pérdidas (Gambin et al., 2016; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). Sin embargo, estudios locales también

mostraron que napas poco profundas pueden tener efectos negativos en los rendimientos de maíz sembrado en fechas tempranas frente a altos niveles de precipitaciones (PP; Vitantonio-Mazzini et al., 2020), especialmente cuando las napas se encuentran a menos de 1,4 m de profundidad de la superficie del suelo, lo que puede causar muerte de raíces y plantas, salinización de suelos y pérdidas de N (Nosetto et al., 2009, 2012).

El maíz frecuentemente se fertiliza con N debido a que los requerimientos que tiene el cultivo por lo general no son cubiertos por los aportes de N del suelo. La respuesta en rendimiento a la dosis de N del cultivo de maíz depende del rendimiento alcanzable y de la capacidad intrínseca del suelo para entregar N (Salvagiotti et al., 2011). Generalmente esta respuesta en rendimiento es curvilínea, siguiendo la ley de incrementos decrecientes, y puede modelarse con funciones de respuesta cuadrática, exponencial, logística, lineal-plateau o cuadrática-plateau, entre otras (Cerrato y Blackmer, 1990; Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011; Correndo, 2018). En Argentina, las recomendaciones de fertilización con N comúnmente se basan en la disponibilidad de N del suelo. Como indicador generalmente se utiliza el contenido de N-NO₃ del suelo previo a la siembra, en los primeros 60 cm de profundidad (Magdoff et al., 1984; Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011). Sin embargo, esta medición solo representa una fracción del suministro de N edáfico y no considera la contribución de la mineralización de la materia orgánica (MO) del suelo durante el ciclo del cultivo. Otras metodologías incluyen la medición de la disponibilidad de N-NO₃ en el suelo en V3-V4 (tres o cuatro hojas completamente desplegadas; Abendroth et al., 2011) (Magdoff et al., 1984; Salvagiotti et al., 2001; Pagani et al., 2008; Orcellet et al., 2017) o el uso de N anaeróbico (N_{an}; Sainz Rozas et al., 2008; Orcellet et al., 2017). Estudios más recientes en Argentina proporcionan modelos más complejos, que incluyen el genotipo, variables ambientales y de manejo del cultivos para ayudar a explicar la respuesta en rendimiento a la dosis de N (Gambin et al., 2016; Correndo, 2018; Coyos et al., 2018; Puntel et al., 2019). Sin embargo, existe un vacío de información sobre la respuesta en rendimiento del maíz a la dosis de N en ambientes con influencia de napas freáticas que fluctúan dentro de la banda óptima, donde comúnmente se esperan rendimientos superiores a la media.

El momento en que se realiza la fertilización con N puede afectar la eficiencia de uso de este nutriente, especialmente en condiciones con elevada disponibilidad de agua. Durante las primeras etapas vegetativas del maíz las necesidades de N son bajas, aumentando a partir de V6 y maximizándose entre V12 y floración (Russelle et al., 1983; Ciampitti y Vyn, 2012). La óptima sincronización entre la disponibilidad de N y la demanda de los cultivos reduce las pérdidas de N y aumenta la eficiencia de uso de este nutriente

(Chen et al., 2006). Se especula que el momento de la fertilización con N puede ser particularmente relevante en ambientes con mayor riesgo de pérdida de N, como puede suceder en suelos con influencia de napa freática y probabilidades de anegamiento, donde la aplicación de N a la siembra puede tener bajas eficiencias y conducir a la contaminación ambiental (Sainz Rozas et al., 2001). No obstante, se sabe que en algunos ambientes los retrasos en la fertilización con N pueden generar deficiencias de N al comienzo del ciclo del cultivo, afectando el rendimiento alcanzable (Binder et al., 2000; Walsh et al., 2012). Investigaciones previas en Argentina sobre el momento de fertilización con N en maíz se realizaron en ambientes sin influencia de napa freática (Sainz Rozas et al., 2001, 2004; Bonelli et al., 2018). La presente tesis plantea evaluar varios de estos factores y así desarrollar criterios para el manejo de la fertilización con N que puedan ser utilizados por productores y técnicos asesores para la producción de maíz en ambientes con napa.

Objetivo general

- Ajustar el manejo de la fertilización nitrogenada en maíz sembrado en fechas tempranas en ambientes con napa en profundidades óptimas.

Objetivos específicos

- I. Determinar la respuesta en rendimiento a la fertilización con N en maíces tempranos en ambientes con napas en profundidades óptimas.
- II. Comparar el efecto del momento (siembra y V7) de la fertilización con N sobre el rendimiento.
- III. Cuantificar el efecto de variables ambientales y de manejo sobre la respuesta en rendimiento a la fertilización con N.
- IV. Generar modelos de respuesta en rendimiento a la fertilización con N que permitan estimar dosis óptimas económicas de N.

Hipótesis a evaluar

- I. La respuesta en rendimiento a la fertilización con N en maíces tempranos en ambientes con influencia de napa en profundidades óptimas será mayor que en estudios previos sin influencia de napa.
- II. La respuesta en rendimiento a la fertilización con N será mayor en aplicaciones en V7 que en aplicaciones a la siembra.

- III. El N_{an} , el contenido de $N-NO_3$ en el suelo en V4 y la profundidad de la napa freática a la siembra son indicadores consistentes para estimar la respuesta en rendimiento a la dosis de N.
- IV. La dosis óptima económica de N será mayor que la dosis media utilizada por los productores en ambientes similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del área de estudio

El área de estudio comprendió el sudeste de la provincia de Córdoba (Figura 1). Específicamente el centro del departamento Unión y parte del departamento Marcos Juárez. Esta área se encuentra al oeste la Pampa Ondulada, siendo la subregión con mayor tasa de ascenso freático de toda la Región Pampeana (Alsina et al., 2020). Respecto a los suelos, las series predominantes son Ballesteros, Ordóñez, Monte Buey, La Bélgica y Laborde (IDECOR, 2021), todos franco limosos, de aptitud agrícola, clase Ilc (leve limitante climática; Klingebiel y Montgomery, 1961). La serie Monte Buey es un Argiudol típico con una capacidad de almacenaje de agua útil hasta los 2 m de 306 mm, siendo la única que tiene un horizonte B2t (Figura 2; INTA, 1978). Las series Ordóñez y la Bélgica son Hapludoles típicos con capacidades de almacenaje de agua útil hasta los 2 m de 300 y 289 mm respectivamente. Por último, las series Ballesteros y Laborde son Haplustoles údicos con capacidades de almacenaje de agua útil hasta los 2 m de 298 y 278 mm respectivamente.

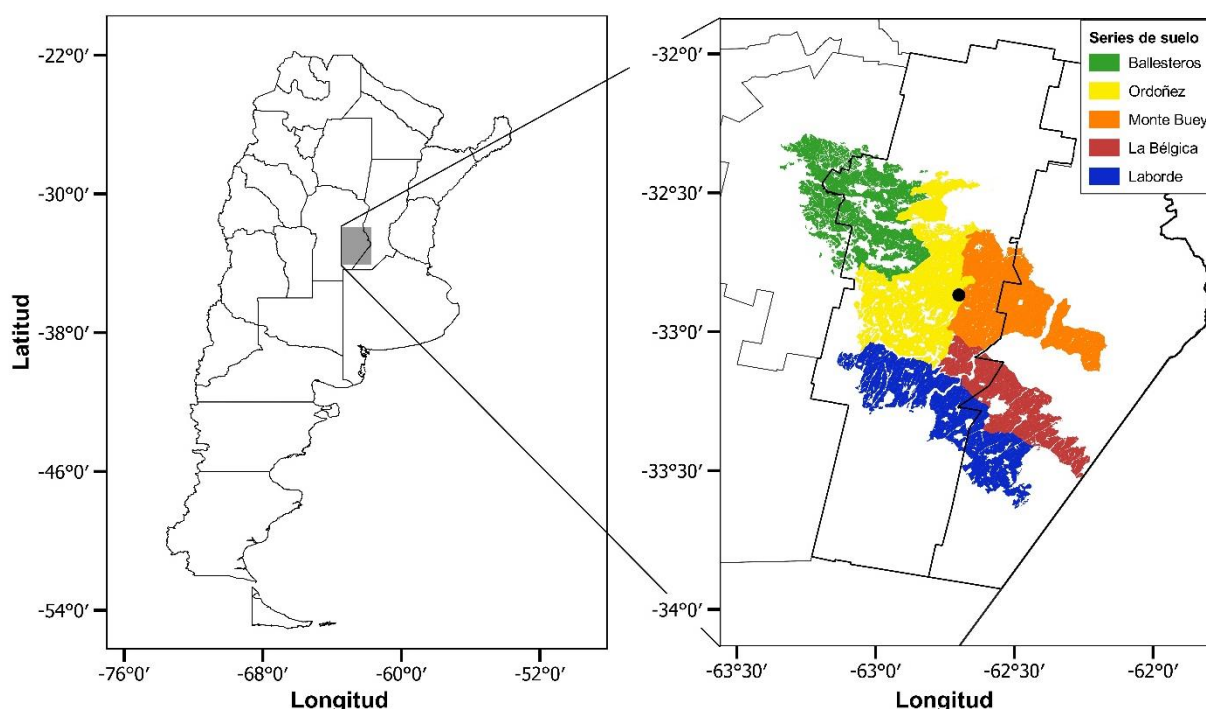


Figura 1. Área de estudio y distribución de las principales series de suelo. El área de estudio comprende el centro de los departamentos Unión y Marcos Juárez (izquierda y derecha, respectivamente) en la provincia de Córdoba, Argentina. El punto representa la ubicación de la localidad Justiniano Posse. Elaborado a partir de las cartas de suelo digitalizadas de la provincia de Córdoba (IDECOR, 2021).

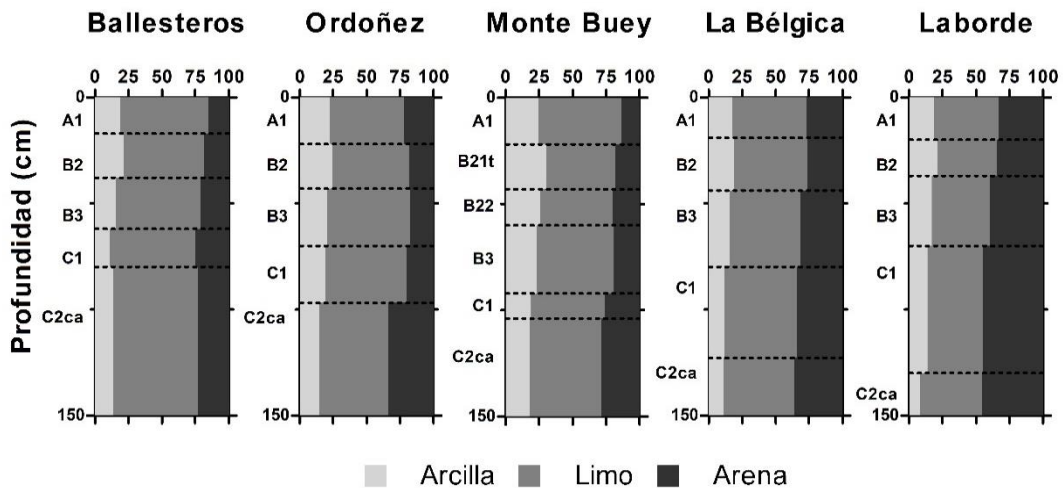


Figura 2. Horizontes y textura de las principales series de suelo del área de estudio. Elaborado a partir de carta de suelos INTA, 1978.

El clima en el área de estudio es templado, sub-húmedo, con un marcado descenso de las PP en los meses invernales. La temperatura media anual es de 18 °C con las mayores temperaturas en enero (máximas promedio de 30,6 °C) y las menores en julio (mínimas promedio de 4,4 °C; Figura 3A). La ocurrencia de heladas agronómicas con una probabilidad mayor al 20% comienza el 28 de abril y finaliza el 29 de septiembre, siendo el período libre de heladas de 211 días. Las PP anuales promedio son 911 mm, mientras que la evapotranspiración de referencia (ET₀) anual promedio, 1117 mm (serie histórica 1996-2016; Figura 3B). Dentro de los últimos 20 años, el año más seco fue el 2008, donde las PP acumuladas fueron 672 mm, y el más húmedo el 2014, con 1104 mm. El balance hídrico por lo general presenta excesos durante el otoño y primavera y déficits en invierno y verano.

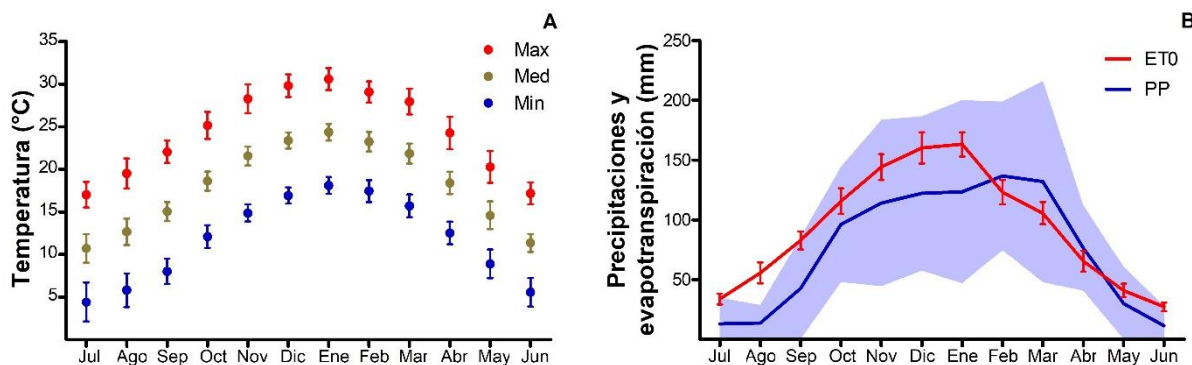


Figura 3. Temperatura máxima, media y mínima promedio mensual (A). Precipitaciones y evapotranspiración de referencia mensual (B). En la figura A los puntos indican la media y los bigotes indican ± 1 desvío estándar. En la figura B las líneas indican el total mensual promedio y los bigotes y área celeste indican ± 1 desvío estándar. Elaborado a partir de serie climática que abarca el período 1996 a 2016 de la localidad de Marcos Juárez (temperaturas y ET₀) y Justiniano Posse (PP).

Manejo de los cultivos y tratamientos de fertilización con nitrógeno

Durante las campañas 2016/2017 y 2017/2018 (denominadas año 1 y 2, respectivamente) se realizaron quince experimentos en lotes de producción, dentro de un área de 3.000 km² en el sudeste de la provincia de Córdoba (Figura 4). Con frecuencia los ambientes de esta región tienen influencia de napa freática (menos de 4 m de profundidad; Nosetto et al., 2012; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). Siete experimentos se realizaron en el año 1 y ocho en el año 2. La ubicación de cada experimento varió entre años, por lo tanto, cada combinación experimento x año fue considerada como un experimento independiente, denominado sitio. Las características de cada sitio se encuentran detalladas en la Tabla 1, nombrados en función del productor responsable del lote y la campaña. Todos los sitios fueron manejados por productores miembros de la Chacra Justiniano Posse agrupados dentro de AAPRESID (Asociación Argentina de Productores en Siembra). Los suelos en los que se realizaron los experimentos son Hapludoles típicos, Haplustoles údicos y Argiudoles típicos (Soil Survey Staff, 2014), clase IIc, de aptitud agrícola comúnmente utilizados para la producción de maíz.

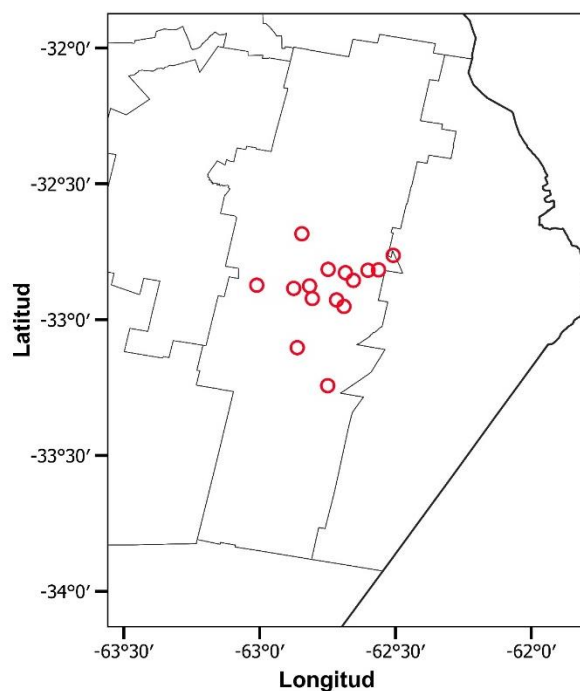


Figura 4. Distribución geográfica de los 15 experimentos.

Tabla 1. Descripción de las variables ambientales y de manejo de los 15 experimentos. Se incluye el nombre del sitio, unidad taxonómica de suelo, fecha de siembra (FS), híbrido, densidad de plantas lograda (DPL), cultivo antecesor, contenido de agua útil en el suelo a la siembra hasta los 2 m (AU), precipitación desde la siembra hasta madurez fisiológica (PP), profundidad de la napa freática (siembra - madurez fisiológica), oferta total de agua (AT), materia orgánica (MO) del suelo, N-NO₃ desde la superficie hasta 60 cm de profundidad a la siembra (N-1), N anaeróbico (N_{an}), fósforo (P), conductividad eléctrica aparente (CEA), pH, N-NO₃ desde la superficie hasta 60 cm en V4 (N-2), N-NO₃ desde la superficie hasta 30 cm de profundidad en V4 (N-3) y N nativo aparente (NN-aparente). En el nombre del sitio, el número refiere al año de experimentación. Para la profundidad de la napa freática, el rango indicó su nivel a la siembra y a madurez fisiológica, respectivamente.

Sitio	Unidad taxonómica	FS	Híbrido	DPL	Cultivo antecesor	AU	PP	Napa	AT	MO	N-1	N _{an}	P	CEA	pH	N-2	N-3	NN-aparente
				pl m ⁻²		mm	mm	m	mm	%	kg ha ⁻¹	ppm	ppm	mmhos cm ⁻¹		kg ha ⁻¹	ppm	kg ha ⁻¹
Pg_1	Hapludol típico	22 sep	DK7210	7,9	Trigo/soja	282	498	1,5 - 3,0	976	2,5	71	40	12	0,10	5,8	40	5	134
Oz_1	Argiudol típico	5 oct	DK7210	8,3	Trigo/soja	300	488	1,0 - 2,0	1046	2,6	53	48	13	0,09	6,0	63	10	101
Mza_1	Haplustol údico	9 oct	DK7210	7,2	Soja	272	459	0,7 - 2,0	1060	2,3	71	42	15	0,10	5,9	51	9	145
Pz_1	Argiudol típico	10 oct	DK7210	9,0	Soja	278	496	1,5 - 3,0	967	2,4	63	43	8	0,09	6,0	46	09	149
Th_1	Hapludol típico	9 oct	DK7210	8,0	Soja	279	496	2,0 - 3,0	955	2,4	71	39	13	0,11	6,0	77	12	140
As_1	Hapludol típico	23 oct	DK7210	7,7	Trigo/soja	300	490	1,0 - 2,0	1062	2,3	59	39	11	0,08	6,0	60	10	134
Ru_1	Hapludol típico	8 oct	ACA470	7,3	Trigo/soja	300	474	0,7 - 2,0	1027	2,4	59	40	11	0,10	5,9	50	7	82
Oz_2	Argiudol típico	16 sep	DK7320	7,9	Trigo/soja	306	407	1,0 - 2,5	974	2,7	64	50	13	0,10	5,5	55	9	100
As_2	Hapludol típico	17 sep	DK7210	8,7	Trigo/soja	298	325	1,0 - 2,5	941	2,7	65	64	17	0,13	5,7	91	14	158
Ro_2	Hapludol típico	19 sep	DK7310	8,1	Soja	300	407	1,5 - 3,0	958	2,7	60	50	11	0,10	5,5	62	11	109
Ru_2	Hapludol típico	20 sep	ACA473	7,8	Trigo/soja	272	427	2,0 - 3,5	849	2,4	55	41	12	0,10	5,9	53	9	117
Pg_2	Hapludol típico	20 sep	DK7210	8,1	Soja	300	407	1,0 - 2,5	960	2,7	74	45	25	0,09	5,3	69	12	155
Mzi_2	Haplustol údico	5 oct	DK7210	8,6	Trigo/soja	264	372	2,0 - 3,5	771	2,8	50	42	11	0,10	5,5	75	13	118
Co_2	Argiudol típico	9 oct	DK7210	7,3	Trigo/soja	306	349	1,0 - 2,5	940	2,7	64	53	35	0,12	5,6	86	17	107
Th_2	Hapludol típico	6 oct	DK7320	7,6	Trigo/soja	300	349	1,0 - 2,5	912	2,5	54	46	8	0,09	5,6	53	8	93

Todos los sitios fueron manejados en siembra directa y en condiciones de secano. El manejo de los sitios en cuanto a híbrido sembrado, densidad de plantas, espaciamento entre surcos, y fertilización con fósforo, azufre y zinc (Tabla S1), fue el que decidió utilizar el productor en el lote. Los cultivos fueron sembrados utilizando la maquinaria que disponía el productor y las malezas, plagas y enfermedades fueron controladas utilizando prácticas que comúnmente se realizan en la zona. En todos los sitios el espaciamento entre surcos fue de 0,52 m. La fecha de siembra varió entre el 16 de septiembre y 23 de octubre, y la densidad de plantas logradas entre 7,2 y 9,0 plantas m⁻². En la mayoría de los sitios el cultivo antecesor fue el doble cultivo trigo/soja (*Triticum aestivum* y *Glycine max*), con la excepción de cinco sitios (Pz_1, Th_1, Mz_1, Pg_2, y Ro_2) donde el antecesor fue soja.

Los tratamientos consistieron en cinco dosis de N (0, 60, 120, 180, y 240 kg N ha⁻¹) y dos momentos de fertilización (siembra y V7; Abendroth et al., 2011), totalizando 10 combinaciones de tratamientos. En todos los sitios se utilizó un diseño factorial completamente aleatorizado con tres repeticiones, a excepción de un sitio (Mzi_2) que solamente tuvo dos. Cada parcela fue de 53 m². El fertilizante fue voleado de forma manual y la fuente utilizada fue urea (46-0-0) tratada con n-butil tiofosfórico triamida (NBPT) para disminuir posibles pérdidas por volatilización.

Determinaciones en el suelo y el cultivo

Al momento de la siembra se tomaron muestras de suelo en cada sitio, desde la superficie hasta los 60 cm de profundidad a intervalos de 20 cm. En V4, dos muestreos adicionales se realizaron en las parcelas correspondientes a los tratamientos con dosis de cero N, una de la superficie hasta los 60 cm de profundidad a intervalos de 20 cm, similar a la realizada a la siembra, y una segunda desde la superficie hasta los 30 cm de profundidad. Una vez tomadas las muestras, las mismas fueron secadas en un ambiente seco y fresco hasta peso constante, molidas y tamizadas por una malla de 2 mm. A las muestras tomadas a la siembra desde la superficie hasta los 20 cm de profundidad se les determinó MO (Walkley y Black, 1934), N_{an} (7 días de incubación; Bremner y Keeney, 1965), fósforo extractable (Bray-I P; Bray y Kurtz, 1945), conductividad eléctrica aparente y pH. El contenido de N-NO₃ del suelo (kg ha⁻¹; Keeney y Nelson, 1982) se determinó en todos los estratos de las muestras tomadas a la siembra y en V4 de la superficie del suelo hasta los 60 cm y en la muestra tomada en V4 de la superficie hasta los 30 cm de profundidad. El contenido de N-NO₃ del suelo se calculó asumiendo una densidad aparente del suelo de 1,25 Mg m⁻³.

El contenido de agua en el suelo se determinó gravimétricamente al momento de la siembra en cada experimento hasta los 2 m de profundidad (Black, 1965) o hasta la profundidad donde se encontraba la napa, a intervalos de 20 cm. La profundidad de la napa freática se midió a la siembra y en madurez fisiológica utilizando freatómetros de 4 m de profundidad instalados en cada experimento. Los horizontes por debajo del nivel freático se los consideró saturados (cero porosidad de aireación). El contenido de agua en el suelo a la siembra hasta los 2 m de profundidad que se encontraba entre capacidad de campo y punto de marchitez se lo consideró como agua útil del suelo (AU), mientras que el agua entre saturación y capacidad de campo, como agua de la napa. Las constantes hídricas se estimaron a partir de los valores de textura obtenidos de las cartas de suelo (INTA, 1978) utilizando la ecuación de Saxton y Rawls (2006). En cada experimento se registraron las PP durante el ciclo del cultivo. Se estimó la oferta total de agua (AT) por sitio como la suma del agua útil del suelo y de la napa a la siembra hasta los 2 m de profundidad y las PP durante el ciclo del cultivo.

En madurez fisiológica se estimó el aporte de nitrógeno nativo aparente (NN-aparente) del suelo. Se determinó la biomasa aérea del cultivo a madurez fisiológica en las parcelas correspondientes a los tratamientos con dosis de cero N, colectando un metro cuadrado por repetición. Las plantas fueron secadas en una estufa con ventilación forzada a 65°C hasta lograr peso constante. Los granos y estructuras vegetativas fueron pesados y molidos por separado. Se determinó la concentración de N en ambos tipos de estructuras por micro-Kjeldahl (McKenzie y Wallace, 1953). El NN-aparente del suelo se estimó a partir del contenido total de N en la biomasa aérea a madurez fisiológica en los tratamientos con dosis de cero N, siguiendo la metodología descrita en Cassman et al. (1996).

A madurez de cosecha se determinó el rendimiento en grano en un área de 7,4 m² en el centro de cada parcela, y se expresó con un contenido de humedad de 140 g kg⁻¹.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados utilizando modelos lineales mixtos (paquete lme4, función lmer; Bates et al., 2015) en el programa estadístico R versión 3.3.0 (R Core Team, 2016). Se realizaron dos análisis independientes. Primero se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de explorar la varianza del rendimiento asociada a cada efecto (sitio, dosis de N, momento y sus interacciones), considerando a la dosis de N como una variable discreta. Se realizó la comparación de medias entre momentos de fertilización a través de los sitios y dosis de N utilizando el test LSD a un nivel de probabilidad de 0,05, recurriendo a la función *predictmeans* en R (Luo et al., 2020).

En el segundo análisis se utilizaron modelos lineales mixtos, incorporando variables ambientales y de manejo a nivel de sitio, con el objetivo de explicar la respuesta en rendimiento a la dosis de N para todo el conjunto de datos. En este segundo análisis, la exploración de datos y selección de modelo se hizo de forma similar a Gambin et al. (2016) o Coyos et al. (2018), siguiendo los pasos descritos en Zuur et al. (2009). Estos pasos involucran (i) exploración de datos, (ii) ajuste del modelo, y (iii) validación del modelo.

La exploración de datos sugirió una relación curvilínea entre el rendimiento y la dosis de N. Se ajustó un modelo cuadrático con la dosis de N como variable explicativa de efecto fijo para explorar las variaciones entre sitios en la respuesta en rendimiento a la dosis de N (modelo A). Los términos aleatorios consideran la variación en el intercepto (i.e., rendimiento en los tratamientos con dosis de cero N) entre los diferentes sitios, la interacción dosis de N x sitio con el objetivo de explorar la variación entre sitios en su respuesta en rendimiento a la dosis de N, y el momento de fertilización. El rendimiento en cada sitio y para cada dosis de N se modeló según la ecuación 1:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} N_i + \beta_{2j} N_i^2 + \sigma_{ij} \quad (\text{ecuación 1})$$

donde Y_{ij} es el rendimiento para la dosis de N i en el sitio j , β_{0j} es el rendimiento para el tratamiento con dosis de cero N en el sitio j (kg ha^{-1}), β_{1j} representa el efecto de la dosis de N en el nivel N_i en el sitio j (kg ha^{-1} grano por kg N ha^{-1}), β_{2j} representa la componente cuadrática de la dosis de N en el nivel N_i en el sitio j , y σ_{ij} engloba el término aleatorio correspondiente al efecto del momento de fertilización y el error. Se exploraron otras estructuras aleatorias (momento anidado dentro de sitio) que evidenciaron degeneraciones del modelo, asociadas a un aumento en el nivel de complejidad de la estructura aleatoria no soportada por los datos disponibles. Estas degeneraciones se pueden traducir en una pérdida significativa de potencia del modelo (Matuschek et al., 2017). Por esta razón, se decidió quedarse con la estructura aleatoria más simple soportada por los datos disponibles, resultando en modelos parsimoniosos. Se supuso que los términos aleatorios tienen una distribución normal, con media de cero y una varianza constante. El modelo se ajustó utilizando estimaciones REML (máxima verosimilitud restringida).

La inclusión de una variable explicativa en los modelos se determinó explorando la correlación entre cada variable con los parámetros que describieron las variaciones de rendimiento entre sitios (β_{0j}) y los coeficientes de la respuesta en rendimiento a la dosis de N obtenidos en la ecuación 1 (β_{1j} y β_{2j}). Las variables exploradas (Tabla 1) fueron unidad taxonómica de suelo (analizada como cualitativa con tres niveles: Hapludol típico, Haplustol

údic y Argjudol típico), FS (como días después del 1 de septiembre), DPL, cultivo antecesor (analizada como cualitativa con dos niveles, soja o trigo/soja), contenido de agua útil del suelo a la siembra (mm, 0-2 m de profundidad), PP desde la siembra hasta madurez fisiológica (mm), profundidad de la napa freática a la siembra (analizada como cualitativa con dos niveles, ≤ 1 m o > 1 m de profundidad), oferta total de agua (mm), MO del suelo (% , 0-20 cm de profundidad), N-NO₃ en el suelo a la siembra (kg ha⁻¹, 0-60 cm de profundidad), N_{an} (ppm, 0-20 cm de profundidad), fósforo extractable (ppm, 0-20 cm de profundidad), conductividad (mmhos cm⁻¹, 0-20 cm de profundidad), pH (0-20 cm de profundidad), N-NO₃ en el suelo en V4 a los 60 cm de profundidad (kg ha⁻¹, 0-60 cm de profundidad), N-NO₃ en el suelo en V4 a los 30 cm de profundidad (ppm, 0-30 cm de profundidad), y NN-aparente (kg ha⁻¹). Este análisis sugirió que las variables explicativas con mayores probabilidades de contribuir al modelo óptimo, e incluir en la componente fija, fueron tres: contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra a los 60 cm de profundidad, cultivo antecesor y NN-aparente. Estas variables se encuentran correlacionadas con los parámetros β_{0j} y β_{1j} . A pesar de que la correlación entre β_{0j} y NN-aparente es espuria, ya que ambos fueron estimados a partir del rendimiento en los tratamientos con dosis de cero N, la variable NN-aparente se usó con fines explicativos, como un indicador indirecto de la capacidad del suelo de aportar N. No se determinaron correlaciones racionales entre β_{2j} y las variables evaluadas.

En el ajuste del modelo se detectó multicolinealidad entre las variables explicativas. El contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra y el NN-aparente fue mayor cuando el cultivo antecesor fue soja que con el doble cultivo antecesor trigo/soja ($p < 0,05$). Además, se observó una correlación entre el contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra y el NN-aparente ($r = 0,62$; $p < 0,05$). En consecuencia, se propusieron tres modelos finales, uno para cada variable explicativa. Estos modelos consideraron el efecto individual de la dosis de N y las interacciones dosis de N x NN-aparente (modelo B), dosis de N x contenido de N-NO₃ en el suelo a la siembra (modelo C), y dosis de N x cultivo antecesor (modelo D). Para cada modelo final el rendimiento está dado por:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} N_i + \beta_{2j} N_i^2 + \sigma_{ij} \quad (\text{ecuación 2})$$

donde

$$\beta_{0j} \sim N \left(\mu_{\beta_{0j}}; \sigma_{\beta_0}^2 \right) \text{ y } \mu_{\beta_{0j}} = \alpha_0 + \alpha_n P_j \quad (\text{ecuación 3})$$

$$\beta_{1j} \sim N \left(\mu_{\beta_{1j}}; \sigma_{\beta_1}^2 \right) \text{ y } \mu_{\beta_{1j}} = \gamma_0 + \gamma_n P_j \quad (\text{ecuación 4})$$

$$\beta_{2j} \sim N \left(\mu_{\beta_{2j}}; \sigma_{\beta_2}^2 \right) \text{ y } \mu_{\beta_{2j}} = \delta_0 + \delta_n P_j \quad (\text{ecuación 5})$$

Nótese que la ecuación 2 es similar a la ecuación 1, con la diferencia que ahora β_{0j} , β_{1j} y β_{2j} dependen de variables explicativas a nivel de sitio, afectando los coeficientes estimados. La variable explicativa P va a depender de cada modelo en particular, siendo NN-aparente en el modelo B, N-NO₃ en el suelo a la siembra en el modelo C, y cultivo antecesor en el modelo D. A modo de ejemplo, para el modelo B, β_{0j} depende de un término fijo contante α_0 y del efecto fijo de NN-aparente (α_1 ; ecuación 3). β_{1j} depende de un término fijo contante γ_0 , y del efecto fijo de NN-aparente (γ_1 ; ecuación 4). De la misma forma, β_{2j} depende de un término fijo contante δ_0 , y del efecto fijo de NN-aparente (δ_1 ; ecuación 5).

En la validación del modelo se comprobaron la distribución gaussiana y los supuestos de homocedasticidad (Zuur et al., 2009) para los residuos estandarizados de los modelos utilizando análisis gráficos. No hubo covarianza entre los efectos aleatorios. Los modelos finales se presentaron utilizando REML y se compararon utilizando el criterio de información de Akaike (AIC). AIC es una herramienta apropiada para la comparación de modelos (Aho et al., 2014; Burnham y Anderson, 2002; Burnham et al., 2011). Los coeficientes de determinación (R^2) de los modelos ajustados se obtuvieron siguiendo la metodología descrita en Nakagawa y Schielzeth (2013) para modelos lineales mixtos generalizados, de manera similar a Gambin et al. (2016). El R^2 marginal (R^2_m) representa la varianza explicada por los efectos fijos, mientras que el R^2 condicional (R^2_c) representa la varianza explicada por el modelo completo (efectos fijos y aleatorios; Nakagawa y Schielzeth, 2013).

RESULTADOS

Variabilidad ambiental explorada

Las variables ambientales mostraron una amplia variación entre sitios (Tabla 1). El contenido de AU en el suelo a la siembra varió entre 264 y 306 mm. Todos los sitios contaban con influencia de napa freática, que se encontró entre 0,7 y 2,0 m a la siembra y entre 2,0 y 3,5 m en madurez fisiológica. Las PP desde la siembra hasta madurez fisiológica variaron entre 325 y 498 mm. El AT estimada varió entre 771 y 1062 mm (Figura 5). La MO del suelo varió entre 2,3 y 2,8% y el N_{an} entre 39 y 64 ppm. El contenido de $N-NO_3$ del suelo a la siembra (desde la superficie hasta 60 cm de profundidad) varió entre 50 y 74 $kg\ N\ ha^{-1}$, y en V4 en los tratamientos con dosis de cero N contenían entre 40 y 91 $kg\ N\ ha^{-1}$ desde la superficie hasta 60 cm de profundidad y entre 5 y 17 ppm de N desde la superficie hasta 30 cm de profundidad. El P del suelo varió entre 8 y 35 ppm. El NN-aparente varió entre 82 y 158 $kg\ N\ ha^{-1}$. En los tratamientos con dosis de cero N, la concentración de N en grano varió entre 0,81 y 0,95%, y el índice de cosecha de N entre 0,63 y 0,71 (datos no mostrados).

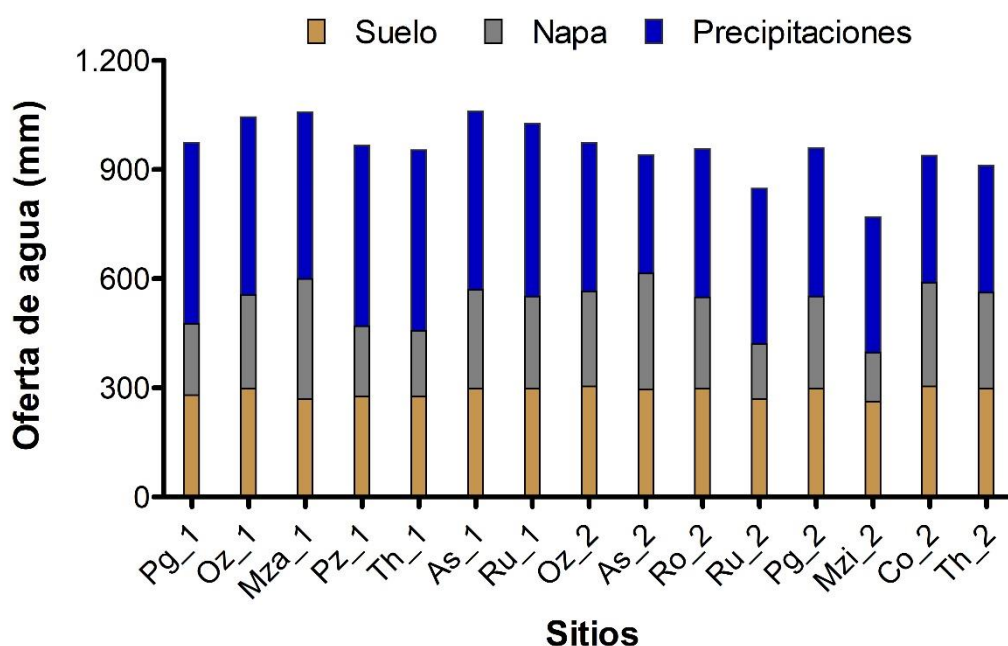


Figura 5. Oferta total de agua en cada sitio. Contenido de AU del suelo y de la napa a la siembra hasta los 2 m de profundidad (naranja y verde, respectivamente) y PP desde la siembra hasta madurez fisiológica por sitio (azul).

El NN-aparente no se correlacionó con el N_{an} ni la MO del suelo (Figura S1). Las únicas variables que se asociaron con el NN-aparente fueron el contenido de $N-NO_3$ del suelo a la siembra ($r = 0,62$; $p < 0,05$) y el cultivo antecesor ($p < 0,05$).

Respuesta a la dosis de nitrógeno en diferentes momentos entre sitios

El rendimiento con la dosis de cero N varió entre 7.600 y 12.800 kg ha⁻¹, mientras que el rendimiento con la dosis de N más elevada (i.e., 240 kg N ha⁻¹) varió entre 13.700 y 16.900 kg ha⁻¹ (Figura 6). Se observaron diferencias significativas en el rendimiento entre sitios ($p < 0,001$) y dosis de N ($p < 0,001$; Tabla 2). No obstante, también se evidenciaron interacciones significativas entre sitio x dosis de N, sitio x momento de fertilización y dosis de N x momento de fertilización. Estas interacciones mostraron que la respuesta en rendimiento a la dosis de N fue diferente entre sitios, y que el efecto del momento de fertilización difirió entre sitios y dosis de N. La dosis de N explicó el 57,6% de la variación total del rendimiento en grano, mientras que el sitio y la interacción sitio x dosis de N explicaron el 19,7 y 7,4% de la variación total, respectivamente. El momento de fertilización tuvo un efecto menor en la variación total del rendimiento, significativo a través de sus interacciones sitio x momento y dosis de N x momento, explicando el 3,7 y 0,9% de la variación total del rendimiento, respectivamente (Tabla 2).

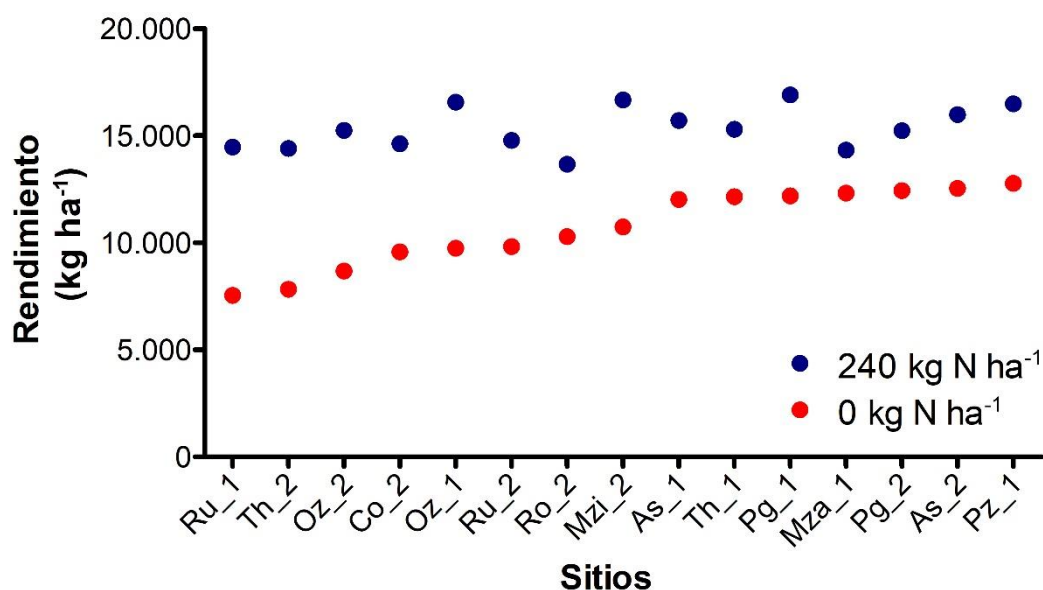


Figura 6. Rendimiento de los tratamientos 0 y 240 kg N ha⁻¹ en cada sitio. La dosis de 0 kg N ha⁻¹ se encuentra señalada en rojo y la dosis de 240 kg N ha⁻¹ en azul. Los sitios se encuentran ordenados en función del rendimiento en el tratamiento con dosis de 0 kg N ha⁻¹.

Tabla 2. p-valor y contribución relativa de cada efecto a la varianza total del rendimiento. Los tratamientos incluyeron cinco dosis de N aplicadas en dos momentos diferentes en 15 sitios.

Efecto de variación	Rendimiento	
	p-valor	Varianza %
Sitio	<0,001	19,7
Dosis de N	<0,001	57,6
Momento	0,628	<0,1
Sitio x Dosis de N	<0,001	7,4
Sitio x Momento	<0,001	3,7
Dosis de N x Momento	<0,001	0,9
Sitio x Dosis de N x Momento	0,494	0,2
Residual		10,4

Se observó una mayor variación del rendimiento entre sitios en los tratamientos con dosis de cero N que con las dosis de N más elevada (CV 17 vs. 6%). En promedio, el rendimiento en grano aumentó 4.544 kg ha⁻¹ al comparar la dosis de cero N con la de 240 kg N ha⁻¹ (ca. 42%), variando de 2.300 a 6.900 kg ha⁻¹ (19 a 92% en términos relativos) entre sitios. La respuesta en rendimiento se correlacionó significativamente con el rendimiento en el tratamiento con dosis de cero N ($r = -0,81$; $p < 0,01$) pero no con el rendimiento máximo observado en cada sitio. El rendimiento máximo observado en cada sitio tampoco se correlacionó con el rendimiento obtenido en el tratamiento con dosis de cero N.

Solo en cinco sitios el momento de la fertilización tuvo un efecto significativo en el rendimiento. En dos sitios el rendimiento fue en promedio 1.457 kg ha⁻¹ más elevado cuando se fertilizó a la siembra en comparación con V7, y en tres sitios el rendimiento fue en promedio 995 kg ha⁻¹ inferior a la siembra que en V7 (Figura 7). Curiosamente, no se observaron diferencias entre momentos de fertilización en los sitios que se obtuvieron rendimientos superiores a 11000 kg ha⁻¹ en los tratamientos con dosis de cero N (Figura 6).

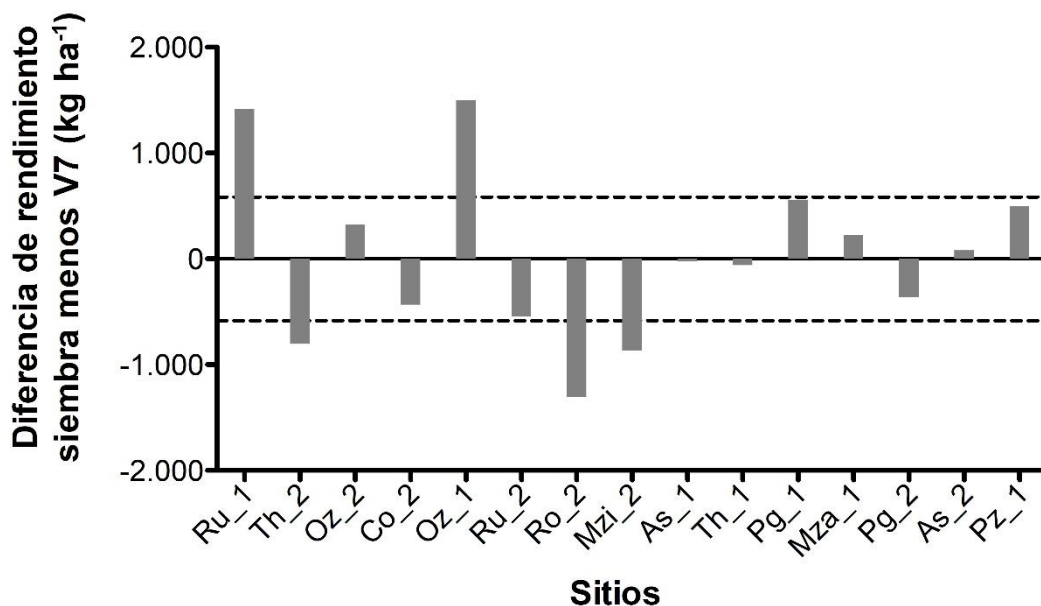


Figura 7. Diferencia de rendimiento entre momentos de fertilización (siembra menos V7) para las cinco dosis de N en cada sitio. La línea punteada representa la diferencia mínima significativa (LSD, $p < 0,05$). Los sitios se encuentran ordenados en función del rendimiento en el tratamiento con dosis de 0 kg N ha⁻¹.

Las diferencias entre momentos de fertilización fueron significativas con dosis de 60 y 240 kg N ha⁻¹ ($p < 0,05$). Con 60 kg N ha⁻¹, el rendimiento fue 494 kg ha⁻¹ mayor al fertilizar en V7 que a la siembra. En cambio, con 240 kg N ha⁻¹, el rendimiento fue 474 kg ha⁻¹ mayor cuando se fertilizó a la siembra que en V7 (Figura 8).

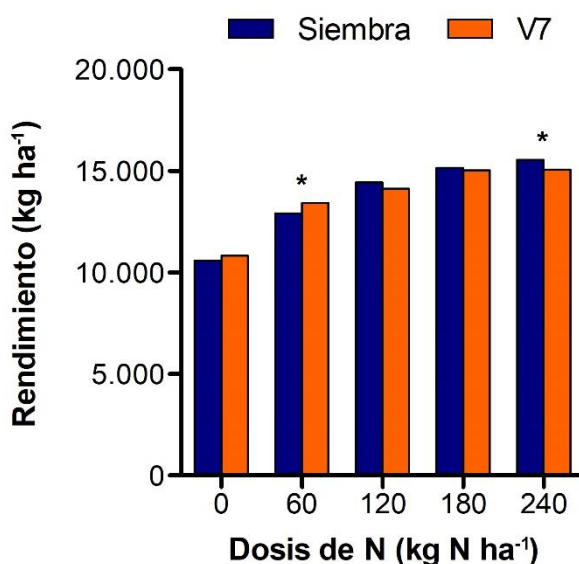


Figura 8. Rendimiento para la combinación de tratamientos dosis de N y momento de fertilización. La presencia del asterisco señala diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$) entre momentos de fertilización a una dosis de N específica.

Variables específicas del sitio que afectan la respuesta a la dosis de nitrógeno

El tercer y cuarto objetivo de la tesis fue cuantificar el efecto de variables ambientales y de manejo que permitan explicar las diferencias en la respuesta en rendimiento a la dosis de N entre sitios, y generar modelos de respuesta para estimar la DOE de N. En la sección anterior se confirmaron variaciones importantes en el rendimiento y en la respuesta en rendimiento a la dosis de N entre sitios, mientras que el momento de la fertilización tuvo relativamente un menor efecto en el rendimiento (Tabla 2). Para lograr estos objetivos se ajustó el modelo A (ecuación 1), que consideró la variación del intercepto en cada sitio, un término por la interacción de dosis de N x sitio para explorar las variaciones de un sitio a otro en la respuesta en rendimiento a la dosis de N, y un término por el efecto del momento de fertilización. El modelo A se describe en la Figura 9, mostrando variaciones en el intercepto y pendiente entre sitios. El parámetro β_{0j} varió de 7.783 a 13.056 kg ha⁻¹ entre sitios, β_{1j} varió de 23,7 a 58,8 kg ha⁻¹ por kg de N ha⁻¹, y β_{2j} de -0,13 a -0,07 kg ha⁻¹ por kg de N ha⁻¹ (Tabla 3). El R² del modelo fue 0,88 (R²_c).

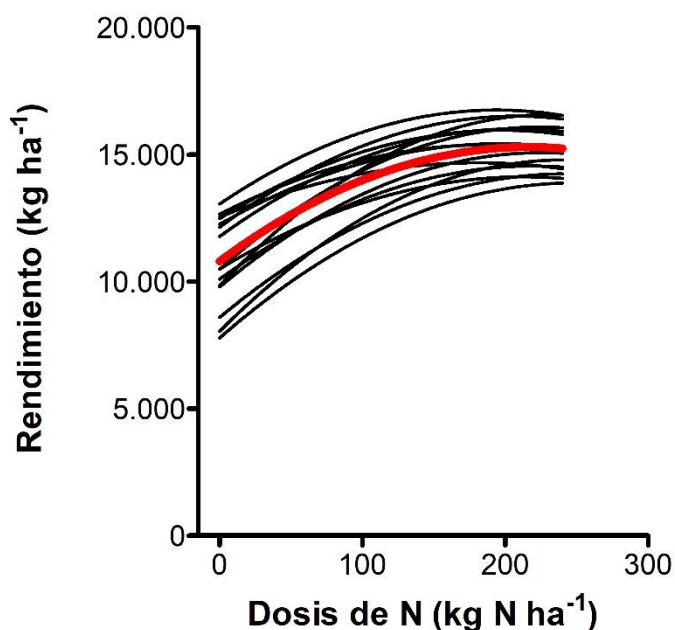


Figura 9. Rendimientos ajustados obtenidos del modelo lineal mixto de intercepto y pendiente aleatoria con efecto del sitio (modelo A). El efecto del sitio se incluye como una variación en el intercepto y en la interacción dosis de N x sitio, como una variación en la pendiente. La línea roja representa la componente fija de la dosis de N para la población de sitios. Los parámetros de las ecuaciones representadas se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros β_{0j} , β_{1j} , y β_{2j} de la ecuación 1 (modelo A).

Sitio	β_{0j} kg ha ⁻¹	β_{1j} kg ha ⁻¹ por kg N ha ⁻¹	β_{2j} kg ha ⁻¹ por kg N ha ⁻¹ al cuadrado
Pg_1	12.139	42,2	-0,10
Oz_1	9.848	58,8	-0,13
Mza_1	12.535	23,7	-0,07
Pz_1	13.056	38,1	-0,10
Th_1	12.254	32,3	-0,08
As_1	11.777	40,8	-0,10
Ru_1	8.044	56,1	-0,12
Oz_2	8.594	46,6	-0,10
As_2	12.479	35,2	-0,09
Ro_2	10.499	34,0	-0,08
Ru_2	10.099	40,6	-0,09
Pg_2	12.655	29,0	-0,08
Mzi_2	10.488	50,0	-0,11
Co_2	9.794	46,9	-0,10
Th_2	7.783	49,3	-0,10
Promedio	10.800	41,6	-0,10

La exploración de datos sugirió que las variables que podrían utilizarse para explicar las diferencias entre sitios en la respuesta en rendimiento a la dosis de N fueron NN-aparente, contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra (Tabla 4) y cultivo antecesor. El intercepto (β_{0j}) fue mayor en sitios que tuvieron soja como cultivo antecesor que en sitios con doble cultivo trigo/soja (12.200 vs. 10.105 kg ha⁻¹, respectivamente; p < 0,05; Figura 10), y la respuesta en rendimiento a la dosis de N (β_{1j}) fue menor en sitios con soja que con trigo/soja como cultivo antecesor (31,4 vs 46,6 kg ha⁻¹ por kg de N ha⁻¹, respectivamente; p < 0,01). El contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra y el NN-aparente se asociaron positivamente con el valor del intercepto (β_{0j}) y negativamente con la respuesta en rendimiento a la dosis de N (β_{1j} ; Figura 10).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre los parámetros β_{0j} , β_{1j} , y β_{2j} , y las variables cuantitativas evaluadas como variables explicativas. * significativo a $p < 0,05$; ** significativo a $p < 0,01$.

Parámetro	FS	DPL	AU	PP	AT	MO	N-1	N _{an}	P	CEA	pH	N-2	N-3	NN-aparente
β_{0j}	0,03	0,42	-0,41	0,30	0,14	-0,18	0,61*	-0,05	0,11	0,08	0,20	0,14	0,12	0,96**
β_{1j}	0,17	-0,04	0,28	-0,03	-0,18	0,20	-0,71**	-0,01	-0,15	-0,14	0,09	-0,09	-0,13	-0,79**
β_{2j}	-0,25	-0,12	-0,23	-0,13	0,16	-0,13	0,64*	0,04	0,18	0,22	-0,22	0,12	0,19	0,60*

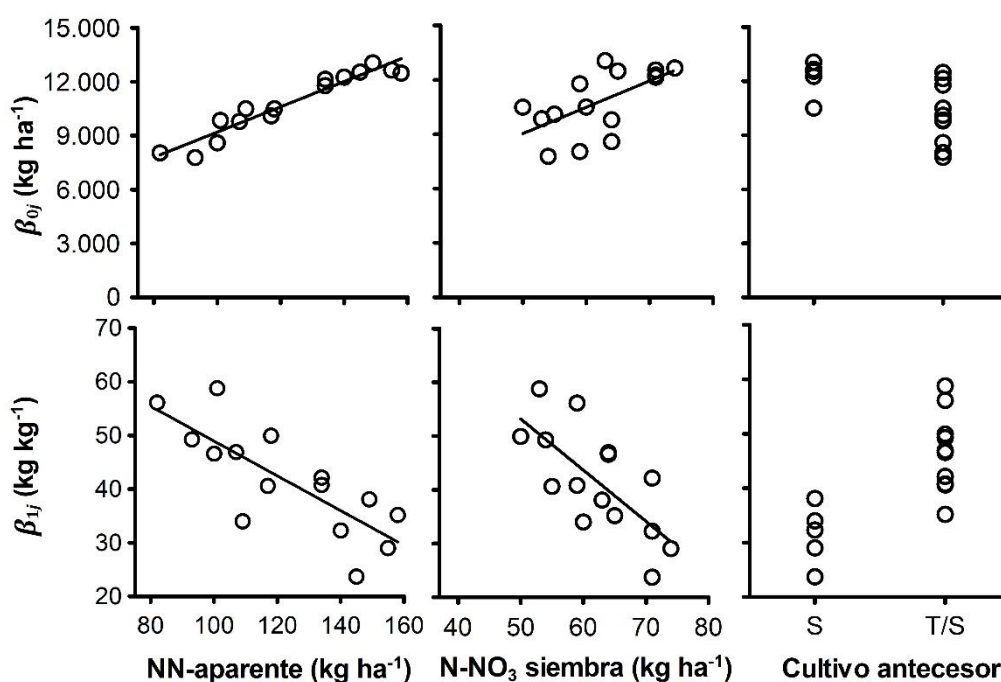


Figura 10. Correlaciones entre los parámetros β_{0j} y β_{1j} con NN-aparente, contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra y cultivo antecesor. En cultivo antecesor, S hace referencia a soja como un solo cultivo y T/S al doble cultivo trigo/soja. β_{0j} representa la variación del intercepto debido al sitio, y β_{1j} representa el parámetro lineal de la respuesta cuadrática en rendimiento a la dosis de N para cada sitio.

Se propusieron tres modelos finales, uno para cada variable explicativa. Los modelos B, C y D incluyen los efectos del NN-aparente, el contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra y el cultivo antecesor, respectivamente, así como la interacción entre cada variable con la dosis de N (Tabla 5). El R^2_m de los modelos varió entre 0,37 y 0,83 y el R^2_c entre 0,83 y 0,90 (Tabla 5).

Tabla 5. Resumen de las estadísticas de los modelos finales y los efectos fijos de las variables explicativas sobre el rendimiento y la respuesta en rendimiento a la dosis de N. El modelo B incluye el NN-aparente, el modelo C el contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra y el modelo D el cultivo antecesor. R²_m es la varianza explicada por los efectos fijos y R²_c es la varianza explicada por todo el modelo. Se proporcionan estimaciones ± error estándar (EE) de los efectos fijos para cada modelo. En el modelo D, la línea de base es soja y el efecto del cultivo antecesor representa el doble cultivo trigo/soja (T/S). Las componentes de la varianza se encuentran en la Tabla 6.

		Modelo B	Modelo C	Modelo D
AIC		7.213	7.238	7.240
R²_m		0,83	0,37	0,47
R²_c		0,83	0,90	0,88
Efectos fijos		Estimación y EE		
Intercepto	α_0	1.940 ± 492	1.322 ± 4.866	12.150 ± 748
Dosis de N	γ_0	80,8 ± 24,9	105,2 ± 16,1	35,0 ± 3,9
	δ_0	-0,14 ± 0,11	-0,19 ± 0,09	-0,10 ± 0,02
NN-aparente	α_1	72,2 ± 3,9		
N-NO₃ siembra	α_2		152,3 ± 77,7	
Cultivo antecesor T/S	α_3			-2024 ± 915
Dosis de N x NN-aparente	γ_1	-0,3 ± 0,2		
	δ_1	0,0003 ± 0,0008		
Dosis de N x N-NO₃ siembra	γ_2		-1,0 ± 0,3	
	δ_2		0,0015 ± 0,0015	
Dosis de N x Cultivo antecesor T/S	γ_3			9,7 ± 4,8
	δ_3			0,003 ± 0,02

Tabla 6. Componentes de la varianza de los efectos aleatorios de los modelos explorados.

Efecto aleatorio	Parámetro	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Componentes de la varianza				
Sitio	β_{0j}	1.997	4.487.000	2.668.000
Sitio x dosis N	β_{1j}	273	1	27
	β_{2j}	<1	<1	<1
Momento	β_{3j}	2337	4416	3317
Residual		821.600	802.700	822.100

Las estimaciones de los coeficientes de regresión para los tres modelos finales permitieron cuantificar el efecto específico de cada variable explicativa sobre el rendimiento en grano y la respuesta en rendimiento a la dosis de nitrógeno. El NN-aparente tuvo un efecto positivo en el rendimiento de 72,1 kg ha⁻¹ por kg de NN-aparente ha⁻¹. La respuesta a la dosis de N disminuyó a razón de 0,3 kg ha⁻¹ por kg de NN-aparente ha⁻¹, como lo indica el coeficiente lineal (modelo B; Tabla 5). De la misma forma, el contenido de N-NO₃ del suelo al momento de la siembra tuvo un efecto positivo en el rendimiento de 152,3 kg ha⁻¹ por kg de N-NO₃ ha⁻¹, y la respuesta a la dosis de N disminuyó a razón de 1,0 kg ha⁻¹ por kg de N-NO₃ ha⁻¹ (modelo C; Tabla 5). Finalmente, el doble cultivo trigo/soja como cultivo antecesor disminuyó el rendimiento en 2.024 kg ha⁻¹, pero aumentó la respuesta en rendimiento a la dosis de N en 9,7 kg ha⁻¹ por kg de N ha⁻¹ (modelo D; Tabla 5). Los modelos finales describieron correctamente las respuestas en rendimiento a la dosis de N observadas en todos los sitios (Figura 11).

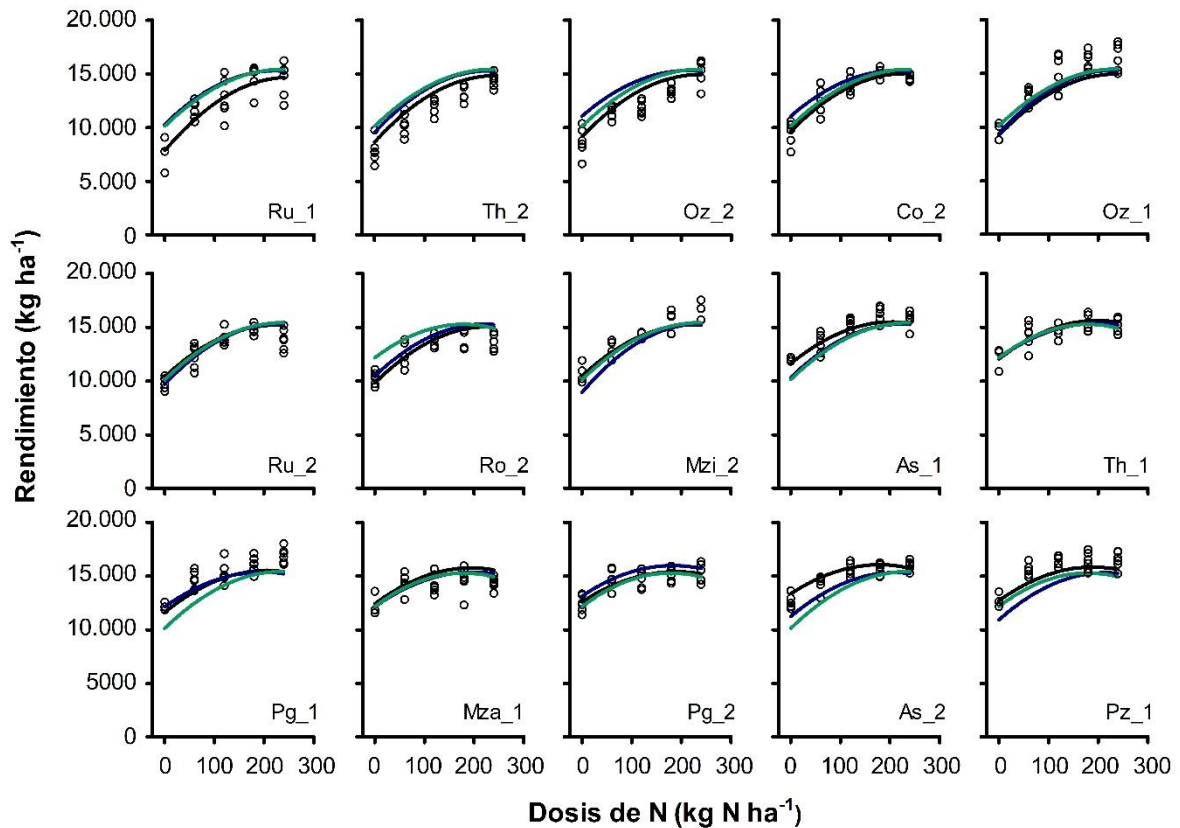


Figura 11. Respuesta en rendimiento a la dosis de N observada en cada sitio y representación de los modelos finales considerando las componentes fijas. Las componentes fijas se muestran en la Tabla 5. La línea negra representa el modelo B, la línea azul el modelo C y la línea verde el modelo D.

Se utilizó la información proporcionada en la Tabla 5 para calcular los parámetros β_{0j} , β_{1j} y β_{2j} de un modelo cuadrático típico de respuesta en rendimiento a la dosis de N, pero considerando las variables explicativas a nivel de sitio que afectan la respuesta en rendimiento a la dosis de N. La Figura 12 proporciona una representación gráfica de estos modelos. Las líneas representan el rendimiento esperado para diferentes dosis de N después de considerar diferentes niveles de NN-aparente, contenido de N-NO_3 del suelo a la siembra o cultivo antecesor. Considerando al modelo B, el impacto del NN-aparente permite obtener un mayor rendimiento a una N dosis de cero y reduce la respuesta en rendimiento a la dosis de N. Del mismo modo, el modelo C indica que el impacto del contenido de N-NO_3 del suelo da como resultado un mayor rendimiento con una dosis de cero N y reduce la respuesta en rendimiento a la dosis de N. Finalmente, el modelo D indica que soja como cultivo antecesor permite obtener rendimientos más elevados con dosis limitadas de N y reduce la respuesta en rendimiento a la dosis de N en comparación con trigo/soja.

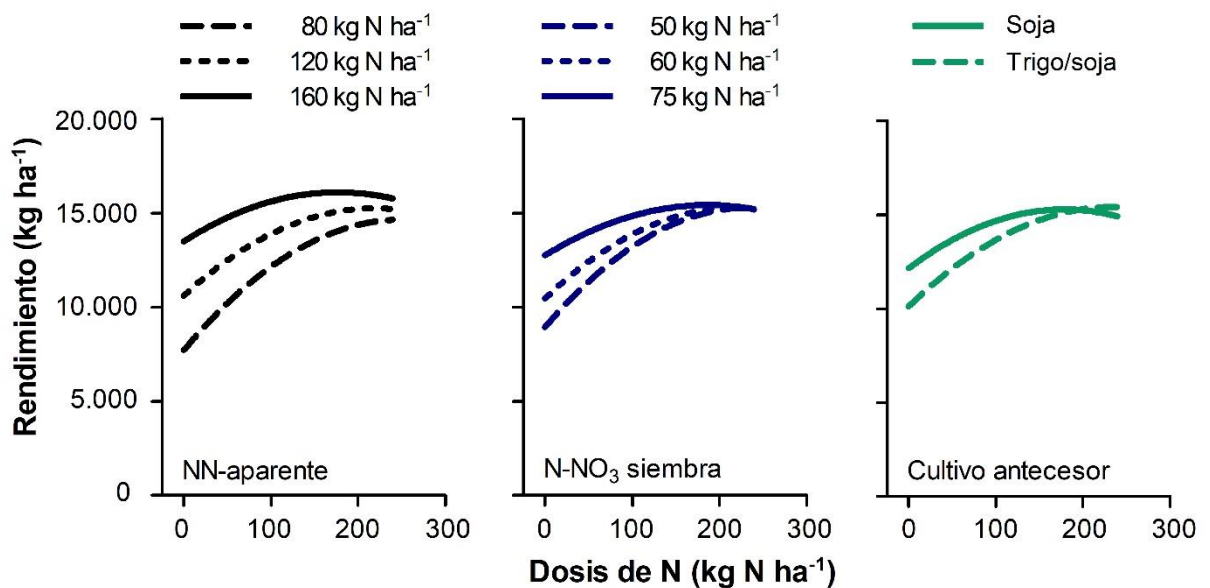


Figura 12. Respuesta en rendimiento esperada a la dosis de N considerando diferentes variables explicativas a nivel de sitio. El modelo B considera tres niveles de NN-aparente: 80 kg N ha⁻¹ (línea discontinua; $Y = 7.713 + 55,2 * X - 0,11 * X^2$), 120 kg N ha⁻¹ (línea punteada; $Y = 10.599 + 42,4 * X - 0,10 * X^2$) y 160 kg N ha⁻¹ (línea completa; $Y = 13.486 + 29,6 * X - 0,08 * X^2$). El modelo C considera tres niveles de N-NO₃ en el suelo a la siembra: 50 kg N ha⁻¹ (línea discontinua; $Y = 8.937 + 54,2 * X - 0,12 * X^2$), 60 kg N ha⁻¹ (línea punteada; $Y = 10.460 + 43,9 * X - 0,10 * X^2$) y 75 kg N ha⁻¹ (línea completa; $Y = 12.745 + 28,6 * X - 0,08 * X^2$). El modelo D considera el cultivo antecesor: trigo/soja (línea discontinua; $Y = 10.126 + 44,7 * X - 0,09 * X^2$) y soja (línea completa; $Y = 12.150 + 35,0 * X - 0,10 * X^2$). Los niveles de NN-aparente y contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra son los mínimos, media y máximos según los datos observados.

Utilizando como base los modelos presentados en la Figura 12, se estimó la dosis óptima económica (DOE) de N igualando la primera derivada de la función cuadrática con los precios relativos de fertilizantes y granos. Para ello, se consideró una relación de precios grano:N de 10 (Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011; Enrico et al., 2020). El modelo B indica que la DOE de N es de aproximadamente 206 kg N ha⁻¹ a 80 kg ha⁻¹ de NN-aparente, o 117 kg N ha⁻¹ cuando el NN-aparente es 160 kg ha⁻¹. Para el modelo C, la DOE es de 191 kg N ha⁻¹ para 50 kg ha⁻¹ de N-NO₃ a la siembra, o 121 kg ha⁻¹ cuando el N-NO₃ a la siembra es de 75 kg ha⁻¹. Considerando el modelo D, si el cultivo antecesor es soja, la DOE de N se aproxima a 128 kg N ha⁻¹, mientras que con el doble cultivo trigo/soja como cultivo antecesor a 184 kg ha⁻¹.

DISCUSIÓN

Una inquietud común entre productores y técnicos asesores en la región donde se llevó adelante este trabajo era la escasa información local con respecto al manejo de la fertilización con N en ambientes de elevada productividad con influencia de napas que fluctúan dentro de profundidades óptimas. Por lo que se conoce, esta inquietud nunca se abordó en otras regiones con un contexto ambiental similar. Los ambientes analizados en este estudio contaban con napas freáticas a la siembra entre 0,7 y 2,0 m de profundidad, y presentaron elevadas respuestas iniciales en rendimiento a la dosis de N (promedio 41,6 kg grano kg N⁻¹). La diferencia de rendimiento entre las dos dosis de fertilizante más extremas (0 y 240 kg N ha⁻¹) fue de 4.544 kg ha⁻¹, y las DOE de N (considerando una relación de precios grano:N de 10) obtenida a partir de los modelos finales propuestos variaron entre 117 y 206 kg N ha⁻¹. Estas dosis permitieron lograr rendimientos promedio de ca. 15.000 kg ha⁻¹.

Las DOE de N obtenidas a partir de los modelos propuestos fueron más elevadas que las comúnmente utilizadas por los productores de la región (96 kg N ha⁻¹; Bolsa de Cereales, 2020). Las respuestas en rendimiento a la dosis de N también fueron mayores que gran parte de las obtenidas en estudios previos realizados en la Región Pampeana para maíz de siembra temprana (Gudelj et al., 2000; Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011; Zorzín y loele., 2012; Correndo, 2018; Vitantonio-Mazzini et al., 2020). A diferencia de los resultados obtenidos por Pagani et al. (2008) y Salvagiotti et al. (2011), en el presente estudio la respuesta en rendimiento a la dosis de N dependió más del rendimiento logrado en el tratamiento con dosis de cero N que de los rendimientos máximos alcanzables. La oferta total de agua promedio fue 960 mm, suficiente para alcanzar 18.000 kg ha⁻¹, considerando una eficiencia en el uso del agua de 19 kg ha⁻¹ mm⁻¹ (Monzón et al., 2012). En base a esto, se puede suponer que en estos ambientes con napas freáticas que fluctúan dentro de profundidades óptimas, los requerimientos de agua y N del maíz se cubrieron con el tratamiento de 240 kg N ha⁻¹, lo que resultó en que los rendimientos máximos alcanzables en los diferentes sitios fueran muy similares (CV 6%). En este sentido, Archontoulis et al. (2020) determinaron que la napa freática permite no solo aumentar y estabilizar los rendimientos entre campañas, sino también mejorar la estimación del rendimiento alcanzable en un determinado ambiente. Al poder definir con precisión un rendimiento alcanzable, futuros trabajos en ambientes con napa deberían focalizarse en el ajuste de modelos de predicción que expliquen los rendimientos en los tratamientos con dosis de cero N y suministro de NN-aparente.

El momento de fertilización tuvo un efecto menor en el rendimiento, que varió entre sitios y que solo resultó relevante en los sitios con los rendimientos más bajos en los tratamientos con dosis de cero N. Sainz Rozas et al. (2001, 2004) observaron en Balcarce que retrasar la fertilización con N desde la siembra a V6 aumentó la eficiencia del uso de N debido a la reducción en las pérdidas por denitrificación en condiciones de anegamiento y la reducción en la lixiviación de NO_3 en suelos arenosos profundos. Por otro lado, en un estudio reciente también realizado en Balcarce, Bonelli et al. (2018) no observaron aumentos en rendimiento al retrasar la fertilización con N desde la siembra a V6-V10. Se planteó como hipótesis que las napas freáticas poco profundas podrían afectar las respuestas en rendimiento al N al aumentar el riesgo de pérdidas de nutrientes. Sin embargo, los resultados mostraron que retrasar el momento de fertilización desde la siembra a V7 tuvo diferencias en rendimiento reducidas e inconsistentes entre sitios. En ambientes con elevados aportes de N del suelo y, por ende, elevados rendimientos en el tratamiento con dosis de cero N, no hubo diferencias entre momentos de fertilización. En solo dos sitios se obtuvieron mayores rendimientos cuando se fertilizó con N a la siembra y en tres cuando se fertilizó en V7. Estos resultados enfatizan la necesidad de optimizar la dosis de N a utilizar en cada sitio específico en lugar del momento de fertilización.

Dosis de fertilización con N excesivas o insuficientes afectan la rentabilidad de la producción de maíz y el medio ambiente (Shanahan et al., 2008). Dosis elevadas aumentan las pérdidas de N por volatilización, lixiviación y denitrificación (Sainz Rosas et al., 2001, 2004). Las pérdidas de N del sistema afectan la calidad del aire y el agua, agravan la eutrofización de aguas y contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero (Robertson y Vitousek, 2009). Por otro lado, dosis de N insuficientes se traducen en mermas en el rendimiento, reducidas eficiencias en el uso del agua y menores aportes de carbono al sistema (Gudelj et al., 2017). El objetivo de los modelos de recomendación de N es estimar la brecha entre el N proporcionado por el suelo y el requerido por el cultivo para maximizar los beneficios, conservando el medio ambiente.

La profundidad de la napa freática a la siembra no explicó las diferencias en la respuesta en rendimiento a la dosis de N y por lo tanto, no fue una variable a incorporar en los modelos de recomendación de N. Esto puede deberse a que todos los sitios contaron con una elevada oferta total de agua, superior a los 771 mm (Figura 5). Las diferencias en la respuesta en rendimiento a la dosis de N entre sitios se explicaron principalmente por el NN-aparente, el contenido de N-NO_3 del suelo a la siembra y el cultivo antecesor.

Cassman et al. (2002) informaron que el NN-aparente en suelos de los Estados Unidos típicamente varía entre 80 y 240 kg N ha^{-1} . El aporte de N del suelo tiene un valor de

sustitución de fertilizante nitrogenado muy alto debido a la relativamente baja eficiencia de recuperación del N de los fertilizante (Cassman et al., 2002). Además, el aporte de N del suelo explica las variaciones en el rendimiento en los tratamientos con dosis de cero N (Cassman et al., 1996). En el presente estudio también se observó una gran variación en el rendimiento en los tratamientos con dosis de cero N, que a su vez se correlacionaron positivamente con el NN-aparente ($r = 0,96$; $p < 0,01$) el cual varió de 80 a 160 kg N ha⁻¹. Similar a Cassman et al. (1996), no correlacionó el NN-aparente con el contenido de MO del suelo. A diferencia de Orcellet et al. (2017), quienes observaron una asociación entre el N_{an} y los rendimientos en los tratamientos con dosis de cero N (N_{an} CV 25%), en este estudio no se pudo confirmar esta asociación. Se hipotetiza que estuvo relacionado con la pequeña variación entre sitios en el contenido de N_{an} (CV 15%). Esta baja variabilidad en los contenidos de N_{an} explorada podría estar relacionada con rotaciones de cultivos y prácticas de manejo similares entre los sitios evaluados. El NN-aparente explicó las variaciones en rendimiento de un sitio a otro en los tratamientos con dosis de cero N y en la respuesta en rendimiento a la dosis de N. Dado que el NN-aparente fue una buena variable explicativa, pero que se desconoce hasta la cosecha, el desarrollo de modelos de predicción para estimar el NN-aparente podría contribuir al desarrollo de criterios de manejo del N más precisos.

Está bien documentado y reconocido que diferentes secuencias de cultivos afectan la respuesta en rendimiento a la fertilización con N del maíz (Dobermann et al., 2011; Enrico et al., 2020). La descomposición de diferentes volúmenes de rastrojos con diferentes relaciones C:N (Gentry et al., 2001; Puntel et al., 2019; Archontoulis et al., 2020) afectan la dinámica del nitrógeno. El residuo de trigo tiene una elevada relación C:N, caracterizada por la inmovilización de N, mientras que el residuo de soja tiene una baja relación C:N y potencialmente puede mineralizar cantidades considerables de N durante la siguiente campaña (Kaboneka et al., 1997). En este estudio se observaron contenidos de N-NO₃ en el suelo a la siembra y de NN-aparente más elevados cuando el cultivo antecesor fue soja que cuando fue doble cultivo trigo/soja. Esta mayor disponibilidad de N resultó en menores respuestas en rendimiento a la dosis de N cuando el cultivo antecesor fue soja.

El enfoque más frecuente en la Región Pampeana para decidir la dosis de N a utilizar es recurrir a modelos de respuesta en rendimiento a la suma del N del suelo y el N del fertilizante, como una única medida de la disponibilidad de N, ajustados mediante mínimos cuadrados ordinarios (Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011). En la tesis también se detectó la importancia del contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra para decidir las recomendaciones de fertilización. Sin embargo, en la presente tesis se utilizaron

modelos lineales mixtos que consideran que la respuesta en rendimiento a la dosis de N varía entre ambientes e incluyen variables explicativas a nivel de sitio para estimar la magnitud de la respuesta en rendimiento a la dosis de N. Como resultado, este tipo de modelos son más adecuados para las recomendaciones de N que los modelos empíricos tradicionales que estiman las necesidades de fertilizantes nitrogenados utilizando la dosis de N más el contenido de N del suelo (Coyos et al., 2018). Por último, estos modelos pueden contribuir al desarrollo de criterios de manejo del N superadores, para ayudar a productores y técnicos asesores a decidir las dosis de fertilización con N.

En resumen, la fertilización con nitrógeno aplicada a la siembra mostró respuestas en rendimiento similares al N aplicado en V7 en ambientes con influencia de napas freáticas que fluctúan dentro del rango de profundidad óptima. Esto indicaría que en cultivos de maíz sembrados en estos ambientes es más relevante optimizar la dosis de N que el momento de fertilización. Las respuestas en rendimiento entre los diferentes sitios se explicaron principalmente por la capacidad de los suelos para aportar N y no por los rendimientos máximos alcanzables. El NN-aparente, el contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra y el cultivo antecesor fueron las variables más relevantes para explicar las respuestas diferenciales en rendimiento a la dosis de N en todos los sitios. Por lo tanto, estas variables deberían considerarse al momento de decidir las dosis de N.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la presente tesis se han presentado y analizado evidencias según los objetivos planteados, permitiendo responder a las hipótesis asociadas. En primer lugar, se planteó determinar la respuesta en rendimiento a las dosis de N en suelos. En segundo lugar, se propuso comparar el efecto del momento de fertilización con N sobre el rendimiento. En tercer lugar, se planteó cuantificar el efecto de variables ambientales y de manejo sobre la respuesta en rendimiento a la fertilización con N. Por último, se propuso modelar la respuesta en rendimiento a la fertilización con N en suelos con influencia de napa. A continuación, se resaltan los resultados de los contrastes de cada hipótesis asociada a cada objetivo y algunos interrogantes relacionados con el objetivo de la tesis a responder con futuras líneas de trabajo.

Contraste de hipótesis

Se rechaza parcialmente la primera hipótesis donde se planteaba que *la respuesta en rendimiento a la fertilización con N en maíces tempranos en ambientes con influencia de napa en profundidades óptimas será mayor que en estudios previos sin influencia de napa*. Los resultados mostraron una respuesta promedio de 4.544 kg ha⁻¹ (42% en términos relativos) a la fertilización con N en maíces tempranos en ambientes con napas freáticas en profundidades que inciden en el crecimiento de los cultivos (Figura 6). A pesar de que la respuesta promedio fue elevada, hubo experimentos previos con mayores respuestas en rendimiento a la fertilización con N (Correndo, 2018). Igualmente, se encontró por el encima del 75% de las respuestas previas logradas en la Región Pampeana (Correndo, 2018).

Se rechaza la hipótesis que afirmaba que *la respuesta en rendimiento a la fertilización con N será mayor en aplicaciones en V7 que en aplicaciones a la siembra*. La fertilización con nitrógeno aplicada a la siembra mostró respuestas de rendimiento similares al N aplicado en V7 en ambientes con influencia de napa freática (Tabla 2, Figura 7). Esto indicaría que en cultivos de maíz sembrados en estos ambientes es significativamente más relevante optimizar la dosis de N que el momento de fertilización.

Se rechaza la hipótesis que afirmaba que *el N_{an} , el contenido de N-NO₃ en el suelo en V4 y la profundidad de la napa freática a la siembra son indicadores consistentes para estimar la respuesta en rendimiento a la dosis de N*. El N_{an} , el contenido de N-NO₃ en el suelo en V4 y la profundidad de la napa freática a la siembra no se asociaron con las diferencias en rendimiento ni con la respuesta en rendimiento a la fertilización con N entre sitios (Tabla 4). El NN-aparente, el contenido de N-NO₃ del suelo a la siembra y el cultivo

antecesor fueron las variables más relevantes para explicar las respuestas diferenciales en rendimiento a la dosis de N en todos los sitios (Tabla 4 y Figura 10).

No se rechaza la hipótesis donde se planteaba que *la dosis óptima económica de N será mayor que la dosis media utilizada por los productores en ambientes similares*. Las dosis comúnmente utilizadas por los productores en la región rondan en los 96 kg N ha⁻¹ (Bolsa de Cereales, 2020). A partir de los modelos finales propuestos, incluyendo variables a nivel de sitio, se obtuvieron DOE recomendadas que variaron entre 117 y 206 kg N ha⁻¹ según el sitio y modelo, significativamente más elevadas que las comúnmente utilizadas.

Perspectivas para futuras líneas de investigación

A partir de la realización de la presente tesis se pudieron identificar algunos aspectos relacionados con la dinámica del N en ambientes con influencia de napa que no han sido totalmente dilucidados, y que se vislumbran como nuevos interrogantes de interés para estudiar en un futuro.

Por un lado, se observó que las diferencias en la respuesta a la dosis de N entre sitio se explicaron principalmente por el rendimiento de los tratamientos con dosis de cero N y no por los rendimientos máximos alcanzables. En ambientes con influencia de napa se debería focalizar en el ajuste de modelos de predicción que expliquen los rendimientos en los tratamientos con dosis de cero N y suministro de NN-aparente. Además, en sistemas de elevada productividad y secuencias de cultivos intensificadas con elevados aportes de materia seca, la cantidad y calidad del rastrojo debería ser contemplada en los modelos de respuesta a la fertilización con N. De esta forma se podrá contribuir al desarrollo de criterios de manejo del N en maíz más precisos.

Por otro lado, ambientes con influencia de napa permiten lograr elevados rendimientos, no solo de maíz, sino también de soja. Existen evidencias que demuestran que el rendimiento de soja se puede encontrar limitado por N en ambientes de elevada productividad, en donde la fijación biológica y el aporte de N del suelo son insuficientes para satisfacer los requerimientos de N del cultivo. Visto que en esta tesis se encontró variabilidad en el aporte de N, es de interés determinar si el N disponible en las rotaciones utilizadas pueden llegar a ser un factor limitante para el rendimiento del cultivo de soja en ambientes con influencia de napa.

BIBLIOGRAFÍA

- Abendroth, L.J., Elmore, R.W., Boyer, M.J., Marlay, S.K., 2011. Corn growth and development. Extension Publication #PMR-1009. Iowa State University. Estados Unidos.
- Aho, K., Derryberry, D., Peterson, T., 2014. Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology*, Vol 95, pgs. 631–636.
- Alsina S., Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., 2020. Base de datos “NAPA”: Primera síntesis de la dinámica freática pampeana desde 1950 al presente. *Ciencia de Suelo*, Vol 38, pgs. 262–273.
- Andrade, F.H., Taboada, M.A., Lema, R.D., Maceira, N.O., Echeverría, H.E., Posse Beaulieu, G., Prieto Garra, D., Sánchez, E.E., Ducasse, D.A., Bogliani., M.P., 2017. Los desafíos de la agricultura Argentina. Editorial: Ediciones INTA, Buenos Aires. Argentina.
- Archontoulis, S.V., Castellano, M.J., Licht, M.A., Nichols, V., Baum, M., Huber, I., Martinez-Feria, R., Puntel, L., Ordóñez, R.A., Iqbal, J., Wright, E.E., Dietzel, R.N., Helmers, M., Vanloocke, A., Liebman, M., Hatfield., J.L., Herzmann, D., Cordova, S.C, Edmonds, P., Togliatti, K., Kessler, A., Danalatos, G., Pasley, H., Pederson, C., Lamkey, K.R., 2020. Predicting crop yields and soil-plant nitrogen dynamics in the US Corn Belt. *Crop Science*, Vol 60, pgs. 721–738.
- Aramburu Merlos, F., Monzon, J.P., Mercau, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbágy, E.G., Cassman, K.G., Grassini, P., 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, Vol. 184, pgs 145–154.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, Vol 67, pgs. 1–48.
- Binder, D.L., Sander, D.H., Walters, D.T., 2000. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. *Agronomy Journal*, Vol 92, pgs. 1228–1236.
- Black, C.A., 1965. *Methods of soil analysis: Part I. Physical and mineralogical properties.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. Estados Unidos.
- Bolsa de Cereales 2020. Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada: Campaña 2018/2019. Disponible on- line, <http://www.bolsadecereales.com/retaa-informes-anuales>

- Bonelli, L.E., Sainz Rosas, H.R., Echeverría, H.E., Barbieri, P.A., 2018. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del Suelo*, Vol 36, pgs. 88–98.
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, Vol 59, pgs. 39-45.
- Bremner, J., Keeney, D., 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Analytica Chimica Acta*, Vol 32, pgs. 485–495.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2002. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach. Springer Science and Business Media, Nueva York. Estados Unidos.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., Huyvaert, K.P., 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology* Vol 65, pgs. 23-35.
- Cassman, K.G., Gines, G.C., Dizon, M.A., Samson, M.I., Alcantara, J.M., 1996. Nitrogen use efficiency in tropical lowland rice systems: contribution from indigenous and applied nitrogen. *Field Crops Research*, Vol 47, pgs. 1–12.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, Vol 31, pgs. 132–140.
- Cerrato, M. E., Blackmer, A. M., 1990. Comparison of models for describing; corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*, Vol 82, pgs. 138-143.
- Chen, X., Zhang, F., Römheld, V., Horlacher, D., Schulz, R., Böning-Zilkens, M., Wang, P., Claupein, W., 2006. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved Nmin method. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Vol 74, pgs. 91–98.
- Ciampitti, I.A., Vyn, T.J., 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crops Research*, Vol 133, pgs. 48–67.
- Correndo, A.A., 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis de Magister, Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- Coyos, T., Borrás, L., Gambin, B.L., 2018. Site-specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown maize in Central Argentina. *Agronomy Journal*, Vol 110, pgs. 1544–1553.

- Dobermann, A., Wortmann, C.S., Ferguson, R.B., Hergert, G.W., Shapiro, C.A., Tarkalson, D.D., Walters, D.T., 2011. Nitrogen response and economics for irrigated corn in Nebraska. *Agronomy Journal*, Vol 103, pgs. 67–75.
- 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*, Vol 115, 126016.
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, P., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P.M., 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, Vol 478, pgs. 337–342.
- Gambin, B.L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L., Garibaldi, L.A., 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems*, Vol 146, pgs. 11–19.
- Gentry, L.E., Below, F.E., David, M.D, Bergerou, J.A., 2001. Source of the soybean N credit in maize production. *Plant Soil*, Vol 236, pgs. 175–184.
- Gudelj, V., Ghio, H., Gudelj, O., Lorenzon, C., Conde, M.B., Ioele, J.P., Galarza, C., Vallone, P., Tamburrini, P., García, F., 2017. Evaluación de reposición de nutrientes en experimentos de larga duración del Sudeste de Córdoba. En: *Ensayos de Larga Duración en Argentina: Un aporte al logro de Sistemas Agrícolas Sustentables*. Editores: Salvagiotti, F., Krüger, H., Studdert, G. Editorial: Ediciones INTA, pgs 115-144.
- Gudelj, V., Vallone, P., Galarza, C., Gudelj, O., Lorenzon, C., Masiero, B., 2000. Fertilización del cultivo de maíz en siembra directa. *Información Para Extensión N° 62*, EEA INTA Marcos Juárez. Argentina.
- IDECOR, 2021. Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba. Disponible on- line, <https://www.mapascordoba.gob.ar/#/descargas>
- INTA, 1978. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363-16, Justiniano Posse. Buenos Aires, Argentina.
- Jobbágy, E.G., Nosoetto, M.D., Santoni, C.S., Baldi and G. 2008. El desafío ecológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral*, Vol 18, pgs. 305–322.

- Kaboneka, S., Sabbe, W.E., Mauromoustakos, A., 1997. Carbon decomposition kinetics and nitrogen mineralization from corn, soybean, and wheat residues. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol 28, pgs. 1359–1373.
- Keeney, D.R., Nelson, D.W., 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page. A. L. et al. (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Pgs. 643-698.
- Klingebiel, A.A., Montgomery, P.H., 1961. Land capability classification. *USDA Agricultural Handbook 210*. US Government Printing Office, Washington DC. Estados Unidos.
- Luo, D., Ganesh, S., Koolaard, J., 2020. predictmeans: Calculate predicted means for linear models. R package version 1.0.4. Disponible on- line, <https://CRAN.R-project.org/package=predictmeans>
- Magdoff, F.R., Ross, D., Amadon, J., 1984. A soil test for nitrogen availability to corn. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 48, pgs. 1301–1304.
- Matuschek, H., Kliegl, R., Vasishth, S., Baayen, H., Bates, D., 2017. Balancing Type I error and power in linear mixed models. *Journal of Memory and Language*, Vol 94, pgs. 305-315.
- McKenzie, H.A., Wallace, H.S., 1953. The Kjeldahl determination of nitrogen: A critical study of digestion conditions-temperature, catalyst, and oxidizing agent. *Australian Journal of Chemistry*, Vol 7, pgs. 55–70.
- Monzón, J.P., Sadras, V.O., Adrade, F.H., 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crops Research*, Vol 130, pgs. 8–18.
- 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, R.D., Osmond, D., Sawyer, J.E., Scharf, P.C., Smith, W., Spargo, J.T. van Es, H.M., Yang, H., 2018. Strengths and limitations of Nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement. *Agronomy Journal*, Vol 110, pgs. 1–37.
- Nakagawa, S., Schielzeth, H., 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, Vol 4, pgs. 133–142.
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B, Sznaider, G.A., 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research*. Vol 113, pgs. 138–148.

- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B., Jackson, R.B., 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol 154, pgs. 2–11.
- Orcellet, J.M., Reussi Calvo, N.I., Sainz Rozas, H.R., Wyngaard, N., Echeverría, H.E., 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn. *Agronomy Journal*, Vol 109, pgs. 291–298.
- Pagani, A., Echeverría, H.E., Sainz Rozas, H.R., Barbieri, P.A., 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, Vol 26, pgs. 183–193.
- Portela, S.I., Andriulo, A.E., Jobbágy, E.G., Sasal, M.C., 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol 134, pgs. 277–286.
- Puntel, L.A., Pagani, A., Archontoulis, S.V., 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *European Journal of Agronomy*, Vol 105, pgs. 189–199.
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Austria.
- Rizzo, G., Rattalino Edreira, J.I., Archontoulis, S.V., Yang, H.S., Grassini, P., 2018. Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the US Corn Belt? *Global Food Security*, Vol 18, pgs. 27–34.
- Robertson, G.P., Vitousek, P.M., 2009. Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource. *The Annual Review of Environment and Resources*, Vol 34, pgs. 97-125.
- Russelle, M.P., Hauck, R.D., Olson, R.A., 1983. Nitrogen accumulation rates of irrigated maize. *Agronomy Journal*, Vol 75, pgs. 593–598.
- Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E., Picone, L.I., 2001. Denitrification in maize under no-tillage: effect of nitrogen rate and application time. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 65, pgs. 1314–1323.
- Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E., Barbieri, P.A., 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agronomy Journal*, Vol 96, pgs. 1622–1631.
- Sainz Rozas, H.R., Calviño, P.A., Echeverría, H.E., Barbieri, P.A., Redolatti, M., 2008. Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal*, Vol 100, pgs. 1020–1025.

- Salvagiotti, F., Pedrol H., Castellarín, J., 2001. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. II. Relación entre la respuesta en rendimiento y la concentración de N-NO₃ en el suelo en el estadio V4-V6. Para mejorar la producción 20. EEA Oliveros INTA. Argentina.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J., Ferraguti, F., Pedrol, H., 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo*, Vol 29, pgs. 199-212.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 70, pgs. 1569-1578.
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 61, pgs. 51-62.
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. 12va Edición. USDA–NRCS, Washington, DC. Estados Unidos.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, Vol 418, pgs. 671–677.
- USDA-FAS, 2020. United State Department of Agriculture – Foreign Agricultural Service. Disponible on-line, <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>
- Vitantonio-Mazzini, L., Borrás, L., Garibaldi, L.A., Pérez, D.H., Gallo, S., Gambín, B.L., 2020. Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, Vol 251, 107779.
- Walkley, A., Black, A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, Vol 37, pgs. 29–38.
- Walsh, O., Raun, W., Klatt, A., Solie, J., 2012. Effect of delayed nitrogen fertilization on maize (*Zea mays* L.) grain yields and nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, Vol 35, pgs. 538–555.
- Zorzín, J.L., Ioele, J.P., 2012. Ajuste de fertilización con N en condiciones de alta productividad del sudeste de Córdoba. *Revista Técnica en Siembra Directa Aapresid*, Maíz 2012, pgs. 83–87.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N.J., Saveliev, A.A., Smith, G.M., 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. Springer, New York. Estados Unidos.

ANEXO

Tabla S1: Fósforo, azufre y zinc aplicados a la siembra en cada sitio.

Sitio	Fósforo kg ha ⁻¹	Azufre kg ha ⁻¹	Zinc kg ha ⁻¹
Pg_1	16	7	0,7
Oz_1	39	14	-
Mza_1	35	-	-
Pz_1	36	-	-
Th_1	22	10	1,0
As_1	39	14	-
Ru_1	32	-	-
Oz_2	24	11	1,1
As_2	31	14	1,4
Ro_2	27	12	1,2
Ru_2	35	-	-
Pg_2	16	7	0,7
Mzi_2	31	-	-
Co_2	35	-	-
Th_2	22	10	1,0

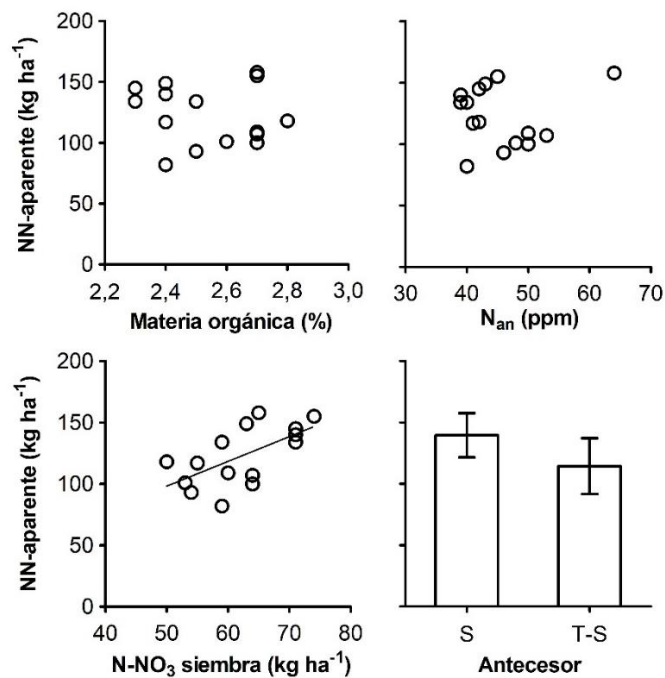


Figura S1: Correlación entre NN-aparente con materia orgánica, N_{an}, N-NO₃ del suelo a la siembra y cultivo antecesor. En cultivo antecesor, S hace referencia a soja como un solo cultivo y T/S al doble cultivo trigo/soja.