



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL RENDIMIENTO
DE MAÍZ SEMBRADO EN FECHAS TARDÍAS EN ZONA NÚCLEO DE
ARGENTINA**

ING. AGR. TOMÁS ANDRÉS COYOS

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

DIRECTOR: DR. LUCAS BORRÁS
CO- DIRECTOR: DRA. BRENDA L. GAMBÍN

2018

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ SEMBRADO EN FECHAS TARDÍAS EN ZONA NÚCLEO DE ARGENTINA

Tomás A. Coyos

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 distribuidos en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe, durante el período comprendido entre 13 de Diciembre de 2012 y Septiembre de 2015, bajo la dirección del Dr. Lucas Borrás y la co-dirección de la Dra. Brenda L. Gambín.

Nombre y firma del Maestrando

Tomás Coyos

Nombre y firma del Director

Lucas Borrás

Nombre y firma del Co - Director

Brenda L. Gambín

Defendida:de 20__.

AGRADECIMIENTOS

- *A mi Director de tesis Lucas Borrás por haberme guiado e incentivado en este camino de formación.*
- *A mi Co - Directora Brenda Gambín por sus aportes, correcciones y valiosas sugerencias sobre el trabajo de tesis.*
- *A Rodolfo Gil y Leandro Ventroni por el sólido apoyo e incentivo en el transcurso de la maestría.*
- *A AAPRESID que financió y apostó a la formación de recursos humanos.*
- *A todos los socios de AAPRESID que me brindaron sus campos, insumos y tiempo para lograr los experimentos de la tesis.*
- *A la Facultad de Ciencias Agrarias por brindarme un excelente ambiente de formación a través de su calidad docente y calidez humana.*
- *A mis familiares, pareja y amigos por el apoyo e incentivo constante brindado durante toda mi carrera*

DEDICATORIAS

A mi familia por el apoyo incondicional y por transmitirme los valores del esfuerzo, la humildad y la educación.

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS

Trabajos en revistas internacionales derivados de la tesis:

Coyos, T.; Borrás, L.; Gambín, B.L., 2018. Site-Specific Covariates Affecting Yield Response to Nitrogen of Late-Sown Maize in Central Argentina. *Agronomy Journal* 110, 1544-1553.

Trabajos presentados en congresos derivados de la tesis:

Coyos, T.; Gambín, B.L.; Borrás, L. 2015. Red de ensayos de maíces tardíos. XXIII Congreso AAPRESID. 5-7 de Agosto 2015. Rosario, Santa Fe. (Presentación oral).

Publicaciones en revistas de extensión derivados de la tesis:

Coyos, T.; Borrás, L.; Gambín, B.L. 2013. Respuesta productiva de maíz tardío a la fertilización nitrogenada en el Centro-Este de Córdoba. *Revista Red de evaluación de maíz en fechas de siembra tardía*. Pgs. 21-26

Coyos, T.; Borrás, L.; Gambín, B.L. 2014. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de maíz tardío en zona núcleo. *Revista Red de evaluación de maíz en fechas de siembra tardía*. Pgs. 17-24

Coyos, T.; Borrás, L.; Gambín, B.L. 2015. Red de maíz tardío: Fertilización nitrogenada y dosis óptima económica. *Revista Red de evaluación de maíz en fechas de siembra tardía*. Pgs. 23-29.

ÍNDICE

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	7
INTRODUCCIÓN.....	11
Importancia del maíz en fechas tardías en la Argentina	11
Manejo de la fertilización nitrogenada en fechas tardías	13
Limitaciones de los modelos de respuesta más usados	15
Hipótesis a evaluar	15
Objetivo general	16
Objetivos específicos.....	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
Sitios, diseño experimental y manejo del cultivo.....	17
Mediciones.....	19
<i>a. Análisis químico de suelo.....</i>	<i>19</i>
<i>b. Contenido de agua en el suelo</i>	<i>20</i>
<i>c. Otras variables de interés</i>	<i>20</i>
Análisis estadístico.....	21
<i>a. ANOVA y análisis de regresión:</i>	<i>21</i>
<i>b. Modelos lineales mixtos</i>	<i>23</i>
RESULTADOS	28
<i>a. Análisis de varianza.....</i>	<i>33</i>
<i>b- Umbral de fertilización aplicando un modelo de regresión al conjunto de datos</i>	<i>37</i>
<i>c- Regresión simple.....</i>	<i>39</i>
DISCUSION.....	47
CONCLUSIONES.....	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXO.....	65

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

15DAA: 15 días antes de antesis
ANOVA: Análisis de la variancia
AIC: Criterio de Información Akaike
AU: Agua útil
ATD: Agua total disponible
C: Carbono
CC: Capacidad de campo
DAP: Densidad aparente
DEH: Distancia entre hilera
DPL: Densidad de plantas logradas
FPH: Fecha de primer helada
i.e.: Es decir
N: Nitrógeno
Nd: Nitrógeno disponible
m: Metro
mg: miligramo
mL: Mililitro
MO: Materia orgánica
N-NO₃: Nitrógeno de nitratos
P10: Percentil 10
P50: Percentil 50
P90: Percentil 90
P: Fósforo
Pa: Fósforo aplicado
Pl: Plantas
PMP: Punto de marchitez permanente
PCA: Peso capa arable
kg: kilogramo
r²: Coeficiente de determinación

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia en la Argentina. En los últimos años las fechas de siembras tardías han tomado una gran relevancia. Mientras que existe abundante información sobre prácticas de manejo para optimizar los rendimientos en fechas tempranas, la información disponible para fechas tardías es escasa. Entre las prácticas de manejo de alto impacto productivo aparece el manejo de la fertilización nitrogenada. En este sentido es de suma importancia conocer la magnitud de la respuesta y de qué factores depende para poder tomar decisiones de fertilización nitrogenada acertadas.

Los objetivos de la presente tesis fueron: i) determinar la respuesta en rendimiento al agregado de N de maíces tardíos y su relación con el N de suelo y el rendimiento logrado sin limitación de N, ii) estimar el umbral de fertilización con N que maximiza los rendimientos de maíz para la zona bajo estudio, iii) cuantificar el efecto de variables ambientales y de manejo sobre la respuesta del rendimiento al agregado de N y generar curvas de respuesta a la fertilización nitrogenada.

Se realizaron 17 experimentos ubicados en zona núcleo maicera durante las campañas 2012/2013, 2013/2014 y 2014/2015. Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados, en macro parcelas, con dos o tres repeticiones. Los tratamientos de fertilización fueron aplicados al azar con niveles de 0, 50, 100 y 130 kgN ha⁻¹. El manejo de los ensayos se realizó con tecnología del productor. Los análisis estadísticos para cumplir los objetivos planteados fueron ANOVA, regresión simple y modelos lineales mixtos.

En la mayoría de los sitios hubo respuesta significativa al agregado de N y la misma tuvo interacción con el sitio evaluado. La presencia de respuesta en rendimiento al N aplicado estuvo explicada parcialmente por el N disponible (Nd) en el suelo al momento de la siembra, sobre todo cuando los niveles de Nd de suelo fueron bajos. Si bien en la mayoría de los sitios hubo respuesta la magnitud de la misma fue variable, siendo baja o nula en varios sitios. La misma se relacionó negativamente con el Nd de suelo al momento de la siembra.

El mejor modelo basado en AIC indicó confirmó que la respuesta a N dependió del nivel de NO₃ a la siembra. El segundo mejor modelo incorporó al tipo de suelo como variable adicional impactando en la respuesta a N. El modelo final presentó una pendiente inicial de 67 kg ha⁻¹ por cada kgN ha⁻¹ adicional aplicado, y el parámetro de curvatura fue de -0,37 kg ha⁻¹ por cada kgN ha⁻¹ adicional aplicado. El modelo indicó que la respuesta inicial se redujo

aproximadamente en 3 kg ha^{-1} por cada 10 kg ha^{-1} de N del suelo a la siembra. El Nd de suelo a la siembra explicó el 46% de la respuesta al agregado de N.

La utilización de modelos mixtos resultaron más adecuados para la predicción de la respuesta que los modelos de análisis clásicos para el set de datos analizados ya que muestran varios atributos importantes: (i) considera la dependencia o estructura jerárquica de los datos, (ii) considera que la respuesta del rendimiento a N aplicado varía con los ambientes, y (iii) utiliza predictores o variables explicativas en el ambiente para estimar la magnitud de la respuesta a N aplicado.

ABSTRACT

THE EFFECT OF NITROGEN FERTILIZATION ON LATE-SOWN CORN YIELD IN CENTRAL ARGENTINA

Available information regarding nitrogen fertilization in late-sown maize in central Argentina is limited. The aims of the present thesis were: i) to determine the yield response to N fertilization of late-sown maize and its relationship with soil N and the yield achieved with the highest level of N applied; ii) to estimate the N fertilization threshold that maximizes maize yields for the area under study iii) to quantify the effect of environmental and management variables on yield response to N and to generate response models to nitrogen fertilization.

Data was obtained from seventeen N fertilization experiments, conducted from 2012 to 2015 growing seasons. Treatments consisted in four levels of applied N: 0, 50, 100 and 130 kg applied N ha⁻¹. Data were analyzed by ANOVA, simple regression and linear mixed-effects models.

Yield increases with N fertilization were evident in most trials, but the response depended on the site explored. Yield response was explained by soil available N at sowing, which was confirmed by the best model based on AIC. The second best model also indicated that soil type partially explained the response to N. We proposed a method and generated statistical models with site specific covariates that can help optimize farmers' decisions on the use of optimal N fertilizer rates.

INTRODUCCIÓN

Importancia del maíz en fechas tardías en la Argentina

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia en la Argentina. El área nacional sembrada con maíz en la campaña 2016/2017 fue de 4 millones de hectáreas. La superficie destinada al cultivo responde a la mejora del germoplasma y a nuevas tecnologías y prácticas de manejo disponibles, que han permitido seguir aumentando los rendimientos del cultivo. El rendimiento medio a nivel nacional durante las últimas cinco campañas fue de 6812 kg ha⁻¹, lográndose la mayor producción durante la campaña 2015/2016 con 7404 kg ha⁻¹ (Bolsa de Comercio de Rosario, 2015).

Las fechas de siembra tradicionalmente recomendadas para la zona núcleo de producción (Sudeste de Córdoba, Santa Fe, Buenos Aires y Entre Ríos) son tempranas dentro de la estación de crecimiento, desde comienzos de septiembre hasta mediados de octubre (Cirilo y Andrade, 1994a, 1994b). El rendimiento potencial en estas fechas es el más alto dentro de la región, favorecido por la alta radiación y niveles óptimos de temperatura durante todo el ciclo del cultivo (Otegui et al., 2002; Maddonni, 2012). El periodo crítico de definición del rendimiento (i.e., +/- 15 días desde la antesis del cultivo; Andrade et al., 1999) de estas fechas de siembra se ubica desde principios de diciembre a principios de enero, donde, en general, las probabilidades de incurrir en estrés hídrico son altas para la región central Argentina. Un retraso de la fecha de siembra a noviembre ubica al periodo crítico durante el mes de enero, con mayor probabilidad de estrés hídrico y golpes de calor, acentuándose el efecto en regiones de menor oferta hídrica y años poco llovedores. A pesar de ello, el riesgo productivo existe dada la variación interanual en los niveles de lluvias. Antecedentes de sequías reiteradas en campañas recientes (2007/2008, 2008/2009 y 2011/2012) han puesto en evidencia este problema.

El maíz sembrado en diciembre no era originalmente recomendado por varias razones. En primer lugar la incidencia de insectos (principalmente *Spodoptera frugiperda* S. y *Diatraea saccharalis* F.) de difícil control se veía como un factor limitante para fechas tardías. Las tecnologías disponibles para el control de insectos (germoplasma con biotecnología Bt principalmente) han cambiado drásticamente esta situación. Las fechas de diciembre ubican el período crítico en febrero, mes que brinda un mejor status hídrico al

cultivo y donde los niveles de radiación y temperatura son menores. En su conjunto estos factores (mayor oferta y menor demanda hídrica) generan una menor probabilidad de estrés hídrico. A pesar de esto, las fechas de diciembre aumentan la probabilidad de ocurrencia de enfermedades (principalmente *Exherohilum turcicum* y *Puccinia sorghi* S.) y contaminación por micotoxinas. También aumenta la probabilidad de ocurrencia de heladas tempranas durante el llenado que pueden afectar el peso final de los granos, principalmente para las fechas de siembra muy tardías de enero. A su vez menores temperaturas y radiación durante el período de llenado de granos pueden disminuir el peso de los mismos.

El área sembrada con maíz tardío ha aumentado considerablemente durante los últimos 15 años, coincidente con el momento en que entra la tecnología Bt al mercado Argentino. Mientras el porcentaje de tempranos/tardíos era originalmente 80/20 hace tan solo cinco años, fue de 70/30 durante la campaña 2008/2009 y 60/40 desde el 2011/2012 a la actualidad.

El rendimiento potencial (i.e., rendimiento en ausencia de cualquier tipo de estrés; Fischer et al., 2014) en fechas de siembra tardías son menores que en fechas tempranas (Maddoni, 2012). Sin embargo, el rendimiento potencial limitado por agua (i.e., rendimiento en ausencia de estrés sin considerar el factor hídrico; Fischer et al., 2014) en muchas oportunidades es mayor en fechas de siembra tardía que en fechas de siembra temprana.

La principal ventaja de las fechas de siembra tardías es que aumentan los rendimientos mínimos, otorgándole al productor una mayor estabilidad con rendimientos mínimos aceptables (Díaz Valdez et al., 2014; Bert y Satorre, 2012). Este atributo ha generado gran interés desde el sistema de producción por estas fechas de siembra. Otra característica es que los maíces tardíos están demostrando comportarse productivamente mejor en ambientes de medio a bajo potencial productivo. La conveniencia de la elección de una fecha de siembra temprana o tardía estaría asociada a la oferta ambiental de cada sitio particular. Datos de producción de los Grupos CREA Región Buenos Aires Norte (Ermácora et al., 2013) y de ensayos de fertilización de INTA EEA Pergamino, realizados en Pergamino, Colón y Ferré (Ferraris et al., 2010; Ferraris y Couretot, 2013a, 2013b) demuestran que los maíces tardíos alcanzan mayores rendimientos que los tempranos en ambientes restrictivos, mientras que los tempranos suelen destacarse en situaciones productivas de alto potencial de rendimiento. El punto de equilibrio para esta región se ubica en un rango de 9000 a 9500 kg ha^{-1} (Ferraris, 2014).

Manejo de la fertilización nitrogenada en fechas tardías

Mientras que existe abundante información sobre prácticas de manejo para optimizar los rendimientos en fechas tempranas, la información disponible para fechas tardías es menor. Entre las prácticas de manejo de alto impacto productivo y con poca información disponible aparece el manejo de la fertilización nitrogenada. El nitrógeno (N) es el nutriente que se utiliza con mayor frecuencia al momento de fertilizar el cultivo de maíz. La causa es la relación positiva costo/beneficio al fertilizar con N producto de la elevada respuesta productiva que presenta el cultivo (Salvagiotti et al., 2001).

La respuesta del rendimiento al N disponible sigue una curva de rendimientos decrecientes (Maddonni et al., 2003). El rendimiento aumenta en forma lineal con el aumento del N disponible mientras el mismo limita la producción. La respuesta deja de ser lineal a medida que el N deja de limitar el crecimiento del cultivo y pasan a limitar otros recursos (otro nutriente, agua o radiación). A muy altos niveles de fertilización se alcanza un techo (o *plateau*), indicando la ausencia de limitación por parte de dicho elemento para la producción del cultivo. A valores excesivos de N el rendimiento puede disminuir debido a un efecto tóxico del nutriente o vuelco del cultivo (Steinbach, 2013).

Actualmente el criterio de fertilización se basa en curvas de respuesta de rendimiento en función del N disponible en suelo más el aplicado por fertilizante. Se suma la disponibilidad del N del suelo a la dosis del nutriente del fertilizante asumiendo que ambos presentan la misma disponibilidad para el cultivo (Steinbach, 2013). Sobre estos datos se ajustan modelos que permiten determinar el umbral de N disponible a partir del cual no hay mayores respuestas a la fertilización con N (Maddonni et al., 2003). Los modelos más conocidos son respuestas cuadráticas, curvas de Mitscherlich, funciones cuadráticas o lineales seguidas de un plateau de saturación de la respuesta, respuestas logísticas, entre otras (Cerrato y Blackmer, 1990). La situación típica es graficar de manera conjunta todos los datos de sitios y años. La aproximación más simple es ajustar un modelo de respuesta basado en mínimos cuadrados (Sain y Jauregui, 1993). Esto provee un modelo simple para determinar dosis de fertilizante a nivel regional.

Para fechas de siembra tempranas este umbral crítico de N disponible oscila entre 135 y 180 kgN ha⁻¹ a 0-60 cm de profundidad para el centro-sur de la provincia de Santa Fe dependiendo del nivel de producción (Salvagiotti et al., 2002). Pagani et al. (2008)

encontraron umbrales críticos de 150 kgN ha^{-1} para la región sudeste de Buenos Aires llegando a 190 kgN ha^{-1} en condiciones de mayor potencialidad de producción. En la Región Pampeana norte (centro-sur de Santa Fe) los umbrales críticos que se determinaron fueron de 137 kgN ha^{-1} en situaciones de rendimientos menores a 9520 kg ha^{-1} , y de 161 kgN ha^{-1} para los casos de rendimientos mayores (Salvagiotti et al., 2011).

Un aspecto relevante en el manejo de maíces tardíos es la menor inversión en fertilización con N por parte del productor. La cantidad de N a aplicar es menor en maíces tardíos que se siembran luego de un periodo de barbecho prolongado producto de que hay más N disponible en el suelo a la siembra debido al mayor tiempo de barbecho y tasa de mineralización por altas temperaturas en fines de primavera comparada con maíces tempranos. En la región Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe es habitual observar un incremento de $30\text{-}40 \text{ kgN ha}^{-1}$ en el período septiembre-diciembre (Ferraris, 2014). La decisión de fertilización asume que el umbral de N disponible es igual en fechas tempranas y tardías, aspecto que no ha sido claramente evaluado hasta el presente. Producto de lo expresado anteriormente se podría esperar que el umbral de respuesta productiva (kgN ha^{-1} disponibles) entre maíces tempranos y tardíos sea diferente debido a que los rendimientos potenciales de fechas de siembra tempranas superan a los rendimientos potenciales de fechas tardías.

Estudios recientes muestran que en la provincia de Entre Ríos el umbral de respuesta en maíces tardíos es de 165 kgN ha^{-1} (Díaz Valdez et al., 2014). En la zona de Pergamino se encontró un aumento de rendimiento del 11 % (846 kg ha^{-1}) al aplicar 60 kgN ha^{-1} , partiendo de 118 kgN ha^{-1} disponibles en el suelo al momento de la siembra en forma de nitratos (Ferraris, 2014). En el centro sur de Santa Fe, cercano a la localidad de Oliveros, los umbrales críticos de N calculados de ensayos fueron de 150 y 159 kgN ha^{-1} en las campañas 2011/2012 y 2012/2013 respectivamente (Salvagiotti, 2014). Gambín et al. (2016) encontraron que el umbral de N donde se satura la respuesta es de 140 kg N ha^{-1} en zona núcleo de producción de maíz argentina. Los umbrales mencionados corresponden a valores de N que contemplan el nivel de N del suelo en forma de nitrato a una profundidad de 0-60 cm medido en estratos cada 20 cm (0-20cm; 20-40cm; 40-60cm) más el N fertilizado.

Limitaciones de los modelos de respuesta más usados

Como fuera mencionado previamente, los modelos de respuesta más utilizados implican graficar de manera conjunta todos los datos de sitios y años y ajustar un modelo basado en mínimos cuadrados. Aunque estos modelos son ampliamente usados por su simplicidad, tienen importantes limitaciones. Cuando las bases de datos incluyen importante variación espacial y temporal, los coeficientes de correlación (r^2) son comúnmente bajos. Esto está atribuido a la larga variabilidad en N del suelo, pérdidas de N asociadas a diferentes mecanismos como lixiviación, volatilización o desnitrificación, limitaciones al rendimiento debido a otros factores como disponibilidad de agua, entre otros (Kim et al., 2008; Kyveryga et al., 2013). Generalmente, la solución fácil es remover subjetivamente datos extremos o respuestas extremas, reduciendo la posibilidad de encontrar una explicación a estas respuestas particulares. Esto ciertamente aumenta la incertidumbre en las recomendaciones de N.

Estos modelos también tienen limitaciones estadísticas, ya que ignoran las correlaciones que probablemente existen entre las respuestas de diferentes parcelas en el mismo sitio y dentro del mismo año (Wallach, 1995). Los parámetros de estimación son entonces ineficientes (Zuur et al., 2009). Los llamados modelos mixtos (también conocidos como modelos jerárquicos o modelo multinivel) son herramientas estadísticas muy poderosas que lidian con esas limitaciones, pero raramente han sido usados para optimizar dosis de fertilización (Wallach, 1995; Kyveryga et al., 2013). Estos modelos también permiten incluir predictores o covariables para explicar la variabilidad en diferentes niveles o grupos (Gelman y Hill, 2007; Qian et al., 2010). Las recomendaciones de fertilizante dependerán entonces de estos predictores. Por ejemplo, Wallach (1995) aplicó estos modelos para estimar el efecto del potasio en praderas sembradas en Francia y demostró la mejora en la exactitud de los estimadores de los parámetros mejorando el nivel de predicción de los mismos.

Hipótesis a evaluar

1. La respuesta en rendimiento al agregado de N en maíces de fecha tardía no siempre es significativa y depende del potencial ambiental en rendimiento y del nivel de N del suelo a la siembra.

2. El umbral de respuesta de N disponible (suelo + fertilizante) usando las aproximaciones clásicas es similar a lo encontrado en otros estudios, pero evidencia una variabilidad que limita su aplicación.
3. La respuesta en rendimiento al N aplicado depende del N del suelo a la siembra, de la fecha de siembra y de la fecha de primera helada. Una mayor disponibilidad de N del suelo a la siembra reduce la respuesta al N aplicado. El atraso en la fecha de siembra aumenta los niveles de N en el suelo y reduce los rendimientos logrados por lo que es esperable que también implique menor respuesta a la aplicación de N. Por último, ante fechas muy tardías con incidencia de heladas tempranas previas a madurez fisiológica es esperable que la respuesta al agregado de N sea menor.

Objetivo general

- Evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada para cultivos de maíz sembrados en fechas tardías en zona núcleo de Argentina.

Objetivos específicos

1. Determinar la respuesta en rendimiento al agregado de N de maíces tardíos y su relación con el N del suelo y el rendimiento logrado sin limitación de N.
2. Estimar el umbral de fertilización con N que maximiza los rendimientos de maíz para la zona bajo estudio.
3. Cuantificar el efecto de variables ambientales y de manejo sobre la respuesta del rendimiento al agregado de N, y generar curvas de respuesta a la fertilización nitrogenada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios, diseño experimental y manejo del cultivo

Se realizaron 17 experimentos en lotes de producción ubicados en zona núcleo maicera (Figura 1). Tres experimentos se ubicaron en el este de Entre Ríos, cuatro en el centro-sur de la provincia de Santa Fe, nueve en la provincia de Córdoba y dos en el centro-norte de Buenos Aires. Las evaluaciones se realizaron durante tres campañas consecutivas (2012/2013, 2013/2014 y 2014/2015).

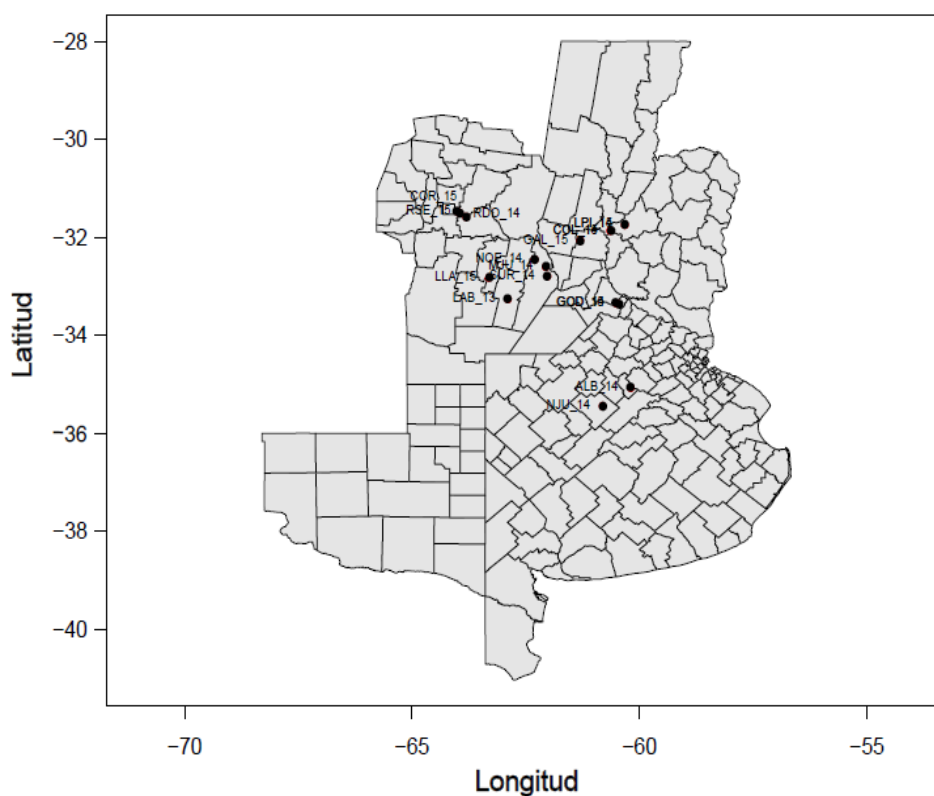


Figura 1. Mapa indicando la ubicación de cada sitio.

Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados con dos o tres repeticiones espaciales por sitio experimental. Cada parcela (o unidad experimental) contó con un ancho mínimo de 50 metros (m) y un largo mínimo de 100 m. Dentro de cada bloque se aplicaron al azar los siguientes tratamientos de fertilización: (i) T0: Control, sin aplicación de fertilizante nitrogenado, (ii) T1: dosis 50, con una aplicación de 50 kgN ha^{-1} , (iii) T2: dosis

100, con una aplicación de 100 kgN ha⁻¹, y (iv) T3: dosis 130, con una aplicación de 130 kgN ha⁻¹. En doce ensayos se aplicó una cantidad mínima de N como arrancador (promedio de 11 kgN ha⁻¹), por lo que las dosis no fueron exactamente las mismas para todos los experimentos.

El manejo de los ensayos se realizó con maquinaria del productor. El fertilizante aplicado fue en forma de urea (46:0:0, N:P:K) incorporada a la siembra o previo al estado fenológico de V6 (Ritchie y Hanway, 1982). Debido a que los ensayos se realizaron en lotes de producción y con la tecnología del productor, cuestiones de manejo como híbrido a sembrar, densidad, espaciamiento, aplicaciones de herbicidas y fungicidas se realizaron de acuerdo a las decisiones de cada productor específico. La fertilización con fósforo (Pa) aplicada en cada lote también fue determinada por el productor. Los ensayos fueron conducidos en secano.

En la Tabla 1 se describe el manejo encada uno de los experimentos. En general los mismos fueron sembrados en el mes de diciembre salvo el caso de COL_14, GOD_15 COL_15 LP_15 y COR_15 que se retrasó la siembra al mes de enero a causa de condiciones de humedad de suelo que no permitieron sembrar en Diciembre. El Pa varió entre sitios. En ocho de los 17 sitios no se aplicó P, mientras que los que aplicaron lo hicieron con niveles de entre 11 y 52 kg ha⁻¹. El promedio de aplicación de P de los que aplicaron fue de 24 kg ha⁻¹. La distancia de siembra entre hileras en la mayoría de los casos fue de 0,52 m, a excepción de los sitios ALB_14 y NJU_14 que fue de 0,7 m. Ninguno de los ensayos fue aplicado con fungicidas debido a que hubo una baja severidad de las enfermedades prevalentes en este cultivo, roya y tizón foliar. El cultivo antecesor fue en su mayoría soja, salvo en LLA_15 y COR_15 que fue maíz y vicia de cobertura respectivamente. La densidad de plantas a cosecha varió entre 38250 (sitio ALB_14) y 75970 pl. ha⁻¹ (sitio LAB_13), y se determinó contando el número de plantas en 6,615 m lineales en los sitios sembrados a una distancia entre surcos de 0,52 m y en 7,142 m lineales en el sitio NJU_14. El procedimiento se repitió 5 veces en cada sitio.

Tabla 1. Manejo agronómico de los sitios evaluados.

Sitio	FS (d)	PA (kg ha ⁻¹)	DEH (m)	Cultivo Antecesor	Genotipo	DC (pl.ha ⁻¹)
LAB_13	42	0	0,52	Soja	DK7010 VT3P	75970
GOD_14	41	13	0,52	Soja	AX 852	73076
RDO_14	48	24	0,52	Soja	DK7210 VT3P	44761
ALB_14	46	24	0,70	Soja	DK7210 VT3P	38250
SUR_14	32	0	0,52	Soja	DOW505 PW	65430
MJU_14	31	52	0,52	Soja	DK7010 VT3	64560
NOE_14	43	24	0,52	Soja	P31Y05	54650
NJU_14	36	22	0,70	Soja	DM2738 MG	61358
COL_14	67	0	0,52	Soja	DOW510 PW	68000
LPI_14	44	0	0,52	Soja	AX878	65000
RSE_15	48	0	0,52	Soja	DK7210 VT3P	56000
GOD_15	66	11	0,52	Soja	AX 7822	73060
GAL_15	53	0	0,52	Soja	ACA 468	69841
LPI_15	63	27	0,52	Maíz	DK7310 VT3P	66700
COL_15	66	17	0,52	Soja	DK7210 VT3P	69230
COR_15	63	0	0,52	Soja	PROAVE467	60000
LLA_15	41	0	0,52	Vicia	DK7210 VT3P	44000

FS: fecha de siembra en días desde el primero de noviembre. PA: fósforo aplicado. DEH: distancia entre hileras en cm.

DC: densidad a cosecha en plantas por hectáreas.

Mediciones

a. Análisis químico de suelo

Al momento de la siembra se tomaron muestras de suelo para análisis químico en cada sitio. Se tomó una muestra compuesta, con 20 sub-muestras o piques, en los estratos 0-20, 20-40 y 40-60 cm. de profundidad. En el estrato 0-20 cm se determinó el porcentaje de materia orgánica (MO) con la metodología de Walkley y Black (1934), el nivel de fósforo (P) en mg kg⁻¹ con la metodología Bray I (1945) y el nivel de nitratos en mg kg⁻¹ por colorimetría (Kenney y Nelson, 1982). El contenido de nitratos también se determinó en los estratos de 20-40 y 40-60 cm. Al valor de nitratos se lo multiplicó por el factor 0,226 (en base a su peso molecular) para calcular la cantidad de N de nitratos.

Los kg de N de suelo ha⁻¹ fueron calculados para cada estrato multiplicando el peso de la capa arable (PCA) de una hectárea y la concentración de N de nitratos (ecuación 1):

$$\text{Nivel de N por hectarea (kgN ha}^{-1}\text{)} = \text{PCA(kg ha}^{-1}\text{)} * \text{Concentración de N de nitratos (kg N – nitratos kg Suelo}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

donde el PCA se calculó como el producto entre la superficie de una hectárea, la profundidad del estrato y la densidad aparente (DAP) (ecuación 2):

$$\text{PCA (kg)} = \text{Superficie de una hectara (m}^2\text{)} * \text{profundidad del estrato (m)} * \text{DAP (kg m}^{-3}\text{)} \quad (2)$$

La DAP fue estimada a partir de la textura de suelo. La textura de suelo fue relevada de cartas de suelo elaboradas por el instituto de tecnología agropecuaria (INTA) buscando el punto geo-referenciado de cada experimento en la carta correspondiente y extrayendo los porcentajes de arena, limo y arcilla en los estratos 0-20, 20-40, 40-60 cm. Con en software Soil Water Characteristic (Saxton et al., 1986) y los valores texturales se clasificaron los suelos y estratos de cada ensayo en Arcillo limoso, franco arcillo limoso, franco limoso, franco y franco arenoso asignándoles un valor de DAP de 1,25; 1,3; 1,35; 1,4 y 1,45 gr cm⁻³ respectivamente. Con este software también se estimaron las constantes hídricas capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Cabe mencionar que los valores de DAP fueron adoptados como guía pero no validados a campo pudiendo existir alguna variación en la posterior estimación de disponibilidad de agua y nutrientes.

b. Contenido de agua en el suelo

Se tomaron muestras de suelo para determinar contenido de agua hasta dos metros de profundidad mediante transecta y muestreo en cinco puntos al azar por ensayo. Las muestras se fraccionaron cada 20 cm. El contenido de humedad se determinó en laboratorio por el método gravimétrico. A la humedad gravimétrica se la multiplicó por la densidad aparente de suelo de cada estrato para obtener la humedad volumétrica. Para calcular el contenido de agua disponible se multiplicó la humedad volumétrica por el espesor del estrato medido (20 cm). La suma de cada estrato medido constituye el agua total disponible (ATD). El agua útil (AU) se calculó restando el PMP al ATD. El % de AU se calculó como el cociente entre el AU y la CC del suelo.

Durante el muestro de suelos también se registró presencia o ausencia de napa. En los casos donde se detectó presencia de napa entre 0-150 cm de profundidad, el % de AU se consideró como 100% mientras que los mm disponibles a la siembra como la CC del suelo del sitio.

c. Otras variables de interés

Se registraron las precipitaciones diarias en cada experimento luego de cada evento de lluvias, y las temperaturas mínimas, máximas, medias diarias y fecha de primera helada (FPH) de la estación climática de INTA más cercana a cada ensayo durante el ciclo el cultivo.

En cada sitio se registró el rendimiento físico en kg ha^{-1} , la humedad de grano inmediatamente luego de la cosecha en cada tratamiento con la maquinaria del productor. El rendimiento se expresó al 14,5 % de humedad.

Análisis estadístico

Se realizaron diversos análisis para evaluar las hipótesis planteadas. Los mismos involucran la aplicación de modelos clásicos para el conjunto de datos (ANOVA y regresión) y modelos más novedosos (modelos lineales mixtos) recomendados para este tipos de datos, ya que permiten tener en cuenta la dependencia de los mismos e incorporar el efecto de co-variables.

a. ANOVA y análisis de regresión:

Ambos análisis se realizaron con el programa Infostat (versión 2014). Primero se realizó un análisis de varianza para determinar el efecto del N aplicado (como variable categórica) sobre el rendimiento. Los efectos a testear fueron dosis de N, el sitio y la interacción dosis de N x sitio.

Un segundo análisis involucró determinar el umbral crítico de N de la manera tradicional; esto es, ajustando un modelo de regresión a la relación entre el rendimiento o el rendimiento relativo del cultivo (relativo al mayor rendimiento logrado dentro de cada bloque) y el N total (kgN ha^{-1} suelo + kgN ha^{-1} fertilizante) por el método de mínimos cuadrados. Se utilizó una función de tipo bi-lineal con plateau definida como (ecuaciones 3 y 4):

$$Y = a + b x \quad x < C \quad (3)$$

$$Y = P \quad x \geq C \quad (4)$$

donde Y representa al rendimiento o rendimiento relativo, a la ordenada al origen, b la respuesta del rendimiento o rendimiento relativo a la disponibilidad de N, x los valores de N disponible (N del suelo a la siembra + N fertilizado; Nd), C el umbral crítico de Nd.

El valor umbral está determinado como el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o rendimiento relativo a incrementos de N_d , y P (plateau) representa todos los valores de $N_d(x)$ en los cuales Y se torna constante (Figura 2).

El modelo de respuesta lineal con plateau ha sido ampliamente utilizado por su fácil interpretación. Sin embargo, una de las principales críticas es que carece de significado biológico por el cambio abrupto de pendiente en la intersección de ambas rectas (Back, 1993). La técnica de ajuste del modelo tiene tres requerimientos para los residuales: normalidad, homogeneidad de varianza e independencia (Kleinbaum y Kupper, 1979; Nester et al., 1990). Se requiere que los residuales tengan una distribución normal, o cercana a la normalidad para que el test de significancia sea válido. La homogeneidad de varianza es una condición requerida por la técnica de los mínimos cuadrados, que se aplica para ajustar los coeficientes de los modelos. La independencia de los errores se requiere para que el modelo no esté sesgado por un efecto de sobre-pesado de alguna condición en particular y los parámetros representen adecuadamente la relación variable independiente - dependiente (Álvarez, 2013).

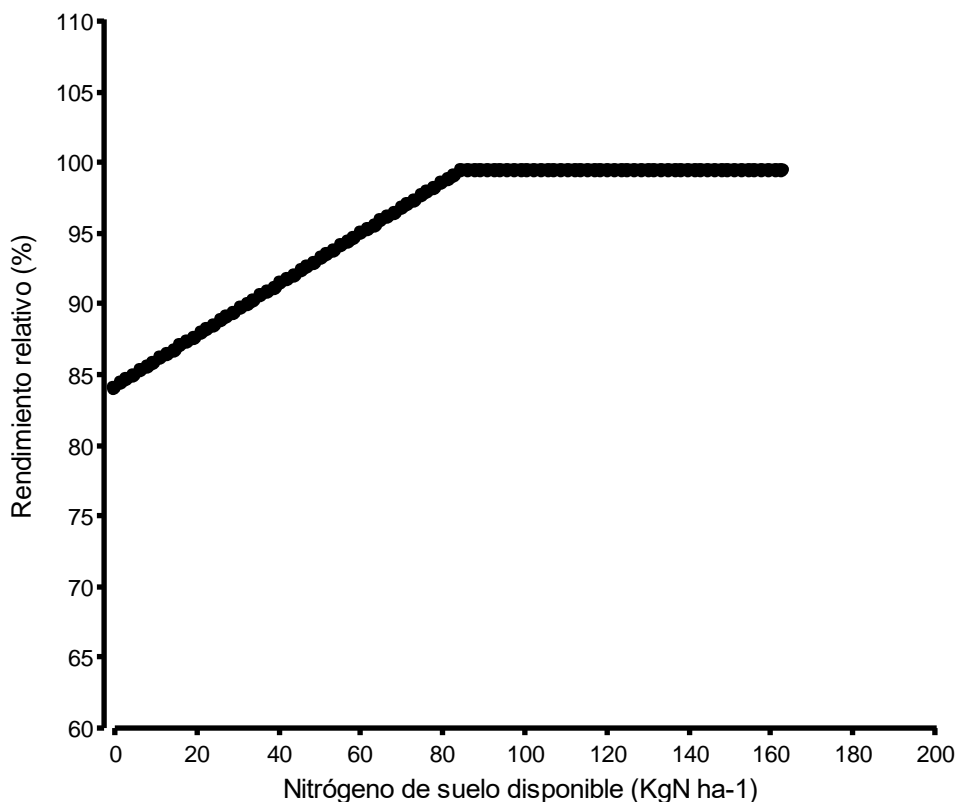


Figura 2. Modelo conceptual de rendimiento relativo al máximo logrado en función de la disponibilidad de $N\ ha^{-1}$ ($kg\ de\ N\ ha^{-1}\ suelo\ 0-60\ cm + kg\ de\ N\ ha^{-1}\ fertilizado$) para determinar el umbral crítico de respuesta.

Otro análisis realizado fue cuantificar la magnitud de la respuesta en rendimiento al agregado de N en función del Nd. Para ello, se tomaron las funciones de mejor ajuste para cada sitio relacionando el rendimiento en grano con el Nd. Luego se calculó la eficiencia agronómica de uso de N (EAUN) como la primer derivada de cada función en cada nivel de N disponible. El último paso fue obtener la regresión de mejor ajuste que relacionara la EAUN (respuesta) con el Nd. Mencionada función estuvo dada por la siguiente ecuación (5):

$$\gamma = a \text{EXP}^{(b * Nd)} \quad (5)$$

donde γ es la EAUN, a es la ordenada al origen, b es la curvatura de la función y Nd es el valor de nitrógeno disponible.

b. Modelos lineales mixtos

Un tercer análisis implicó ajustar modelos lineales mixtos al conjunto de datos (paquete lme4, función lmer) (Bates et al., 2013) en R (R Core Team 2016, versión 3.3.0). El análisis se realizó en dos etapas. En primer lugar, se ajustaron modelos con intercepto e intercepto y pendiente aleatoria con un predictor al nivel individual (N aplicado) para explorar la variación en rendimiento al N aplicado sitio a sitio. El segundo paso fue ajustar el modelo con intercepto y pendiente aleatoria con predictores a nivel de sitio para determinar si los mismos explicaban variaciones en las respuestas en rendimiento al N aplicado y contribuían a generar un modelo con mayor poder predictivo. Cuando se ajustaron estos modelos, se testaron respuestas lineales y curvilíneas usando N aplicado o su transformación en log. Las respuestas curvilíneas fueron exploradas usando una función cuadrática. Se encontró una mejora en el modelo (i.e., menor Criterio de Información Akaike o AIC) con el modelo cuadrático y es por ese motivo que en los resultados se presentan ambos coeficientes β_1 y β_2 correspondientes a una función cuadrática.

El primer modelo consideró la variación de interceptos en los diferentes sitios y bloques anidados dentro de cada sitio y considera un efecto fijo que estima la respuesta en rendimiento al N aplicado para todos los sitios dados por la ecuación 6:

$$\gamma_{ij} = \beta_{0j} + \beta_1 N_{ij} + \beta_2 N_{ij}^2 + \sigma_{ij} \quad (6)$$

donde γ_{ij} es el rendimiento con un nivel i de N aplicado en el sitio j , β_{0j} es la variación en las ordenadas debida al sitio j , β_1 representa el coeficiente lineal, β_2 representa el coeficiente cuadrático, N_{ij} es el nivel de N aplicado en el sitio j y σ_{ij} son los términos del error. Se asume que el término aleatorio β_{0j} se distribuye normalmente con una media igual a cero y varianza constante. El efecto fijo está representado por el intercepto, el coeficiente lineal y el coeficiente cuadrático indicando el efecto a través de la población de sitios.

El segundo modelo es similar al primero, pero consideró la interacción del N aplicado por sitio para explorar diferencias en la respuesta al N aplicado sitio a sitio (ecuación 7). El rendimiento en cada sitio y nivel de N aplicado está dado por:

$$\gamma_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} N_{ij} + \beta_{2j} N_{ij}^2 + \sigma_{ij} \quad (7)$$

donde todos los parámetros son iguales a la ecuación 6 pero β_1 y β_2 varían en cada sitio (nótese el subíndice j en ambos parámetros). Se asume que los términos aleatorios β_{0j} , β_{1j} y β_{2j} tienen una distribución normal, con una media igual a cero y varianza constante. Como en la ecuación 6 los efectos fijos están representados por el intercepto, coeficiente lineal y el coeficiente cuadrático indicando el efecto a través de la población de sitios.

Los modelos se ajustaron utilizando las estimaciones REML y se compararon mediante un test de verosimilitud (Zuur et al., 2009).

El segundo paso fue explorar distintos predictores a nivel de sitio para explicar las diferentes respuestas al agregado de N aplicado a través de los sitios. La inclusión de los distintos predictores se basó en varios aspectos, incluyendo el interés específico en determinar la influencia de ciertas variables en la respuesta al N aplicado, disponibilidad de los datos y la variación a través de los ensayos. Se exploraron los siguientes predictores:

- a. N de suelo en la siembra (kg ha^{-1} , 0-60 cm de profundidad): como variable cuantitativa (N de suelo).
- b. Materia orgánica del suelo (% , 0-20 cm de profundidad): como variable cuantitativa.
- c. Fósforo del suelo (mg kg^{-1} , 0-20 cm de profundidad): como variable cuantitativa (P de suelo).
- d. Tipo de suelo: como variable categórica con tres niveles (I, II y III).

e. Contenido de agua disponible del suelo en la siembra (mm, 0-2 m de profundidad): como variable cuantitativa (Agua de suelo).

f. Precipitación durante el ciclo del cultivo (mm): como variable cuantitativa.

g. Profundidad de napa: como variable nominal (dos niveles: 0, ausencia, 1, presencia a menos de 150 cm de profundidad).

h. Fecha de siembra: como días posteriores al 1 de noviembre (variable cuantitativa).

El predictor fecha de primera helada no fue incluido ya que en la totalidad de los ensayos la misma ocurrió luego de madurez fisiológica de maíz cuando el rendimiento ya estaba definido.

Para determinar la inclusión de un predictor en el modelo, se exploró la correlación entre el predictor particular y la variación en rendimiento a través de los sitios (β_{0j}) y la respuesta al N aplicado obtenido en el modelo ajustado (β_{1j}). La exploración de las mismas sugirió que las variables explicativas en el componente fijo que más probablemente contribuirían al modelo óptimo fueron fecha de siembra, N de suelo y el tipo de suelo (Fecha de siembra se correlacionó negativamente ($p < 0,05$) con la variación del rendimiento a través de los sitios mientras que N de suelo y tipo de suelo se correlacionaron negativamente ($p < 0,05$) con la respuesta al N aplicado (β_{1j}) (Figura suplementaria 1 del Anexo).

El modelo final se obtuvo siguiendo la estrategia llamada “*top-down*” del proceso de selección de modelos (Zuur et al., 2009), esto incluye comenzar con un “modelo óptimo”, que incluía el efecto de variables que potencialmente influyen en la respuesta al N aplicado.

Usando el modelo óptimo, se definió la estructura óptima de la componente aleatoria basada en estimaciones REML. Al incluir el bloque anidado dentro del sitio y el sitio anidados en años como efectos aleatorios, los modelos estimaron diferentes interceptos para cada bloque, sitio y año a fin de considerar la estructura jerárquica de los datos.

Una vez definida la estructura aleatoria óptima, se definió la estructura fija óptima basadas en estimaciones ML. Finalmente el modelo es presentado usando estimaciones REML.

El modelo final óptimo fue:

$$Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} N_{ij} + \beta_{2j} N_{ij}^2 + \sigma_{ij} \quad (8)$$

donde

$$\beta_{0j} \approx N(\mu_{\beta_0}; \sigma_{\beta_0}^2) \text{ y}$$

$$\mu_{\beta_{0j}} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{ fecha de siembra }_j \quad (9)$$

$$\beta_{1j} \approx N(\mu_{\beta_{1j}}; \sigma_{\beta_{1j}}^2) \text{ y}$$

$$\mu_{\beta_{1j}} = \gamma_0 + \gamma_1 \text{ N de suelo}_j + \gamma_2 \text{ tipo de suelo }_j \quad (10)$$

$$\beta_{2j} \approx N(\mu_{\beta_{2j}}; \sigma_{\beta_{2j}}^2) \text{ y}$$

$$\mu_{\beta_{2j}} = \phi_0 + \phi_1 \text{ N de suelo}_j + \phi_2 \text{ tipo de suelo}_j \quad (11)$$

Nótese que la ecuación 8 es igual a la ecuación 7 pero ahora β_{0j} , β_{1j} y β_{2j} son dependientes de predictores a nivel de sitio con efecto sobre el coeficiente estimado. β_{0j} depende del efecto fijo constante α_0 y del efecto fijo fecha de siembra (α_1). β_{1j} depende del efecto fijo constante γ_0 , el efecto fijo de N aplicado (γ_1) y del efecto fijo de tipo de suelo (γ_2). Igualmente β_{2j} depende del efecto fijo constante ϕ_0 , el efecto fijo de N de suelo, (ϕ_1) y del efecto fijo de tipo de suelo (ϕ_2).

El modelo final fue obtenido siguiendo la inferencia multi-modelo basada en el enfoque de la teoría de la información (Burnham y Anderson 2002, 2004). Este procedimiento no acepta que existe un único modelo verdadero en ciencias biológicas. La selección del modelo de mejor aproximación representa la inferencia de los datos y nos indica que “efectos” (representados por parámetros) pueden ser apoyados por datos (Burnham & Anderson, 2002). Se utilizó AIC para seleccionar las mejores combinaciones de modelos de 4 variables predictoras de efecto fijo (Aho et al., 2014). Basado en el contexto y objetivos de la tesis, AIC es la herramienta apropiada para la selección de modelos cuando se compara con otros como BIC o pruebas de hipótesis (Aho et al., 2014; Burnham y Anderson, 2002, 2014; Burnham et al., 2011). Debido a que los modelos tienen diferentes efectos fijos (pero con la misma estructura aleatoria), la estimación se basó en ML y no REML.

Se comprobaron los supuestos de normalidad y de homogeneidad de varianzas (Zuur et al., 2009) para los residuos estandarizados de los modelos con análisis gráficos.

Se calculó el cambio proporcional en la varianza (CPV) como se describe en Merlo et al. (2005). CPV cuantifica los cambios específicos de un componente de la varianza. Esto es, cómo la inclusión de predictores adicionales reduce (o aumenta) el componente de varianza

en niveles particulares. El cambio proporcional de la varianza se calcula de la siguiente manera (ecuación 12):

$$CPV = \frac{V_{N-1} - V_{N-2}}{V_{N-1}} \quad (12)$$

donde V_{N-1} es la varianza en el modelo sin predictores y V_{N-2} es la varianza en el modelo final con predictores. El valor positivo indica una reducción en la variación entre grupos (por ejemplo, sitios) dada por la incorporación de predictores. El modelo sin predictores es similar a la ecuación 7 pero con el efecto fijo único representado por el modelo intercepto.

Los r^2 de los modelos ajustados se obtuvieron siguiendo la metodología descrita en Nakagawa y Schielzeth (2013) para modelos mixtos lineales generalizados. Se calcularon los r^2 marginal y condicional. El r^2 marginal (r^2_m) representa la varianza explicada por factores fijos y viene dada por la ecuación 13:

$$R_m^2 = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sum_{l=1}^{\mu} \sigma_l^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (13)$$

donde σ_f^2 es la varianza calculada a partir de los componentes de efectos fijos del modelo mixto lineal, σ_l^2 es la componente de varianza del factor aleatorio l , y σ_ε^2 es la varianza residual. La ecuación 13 se puede modificar para expresar r^2 condicional (r^2_c) (ecuación 14):

$$R_c^2 = \frac{\sigma_f^2 + \sum_{l=1}^{\mu} \sigma_l^2}{\sigma_f^2 + \sum_{l=1}^{\mu} \sigma_l^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (14)$$

que representa la varianza explicada por el modelo completo (factores fijos y aleatorios) (Nakagawa y Schielzeth, 2013).

RESULTADOS

Variación de ambientes y manejo entre sitios

Los sitios presentaron valores de MO entre 1,7 % para el caso del LLA_15 y 3,96 % en el sitio ALB_14 (Tabla 2). La mayoría de los sitios presentaron valores de MO de entre 2 y 3 %. Los valores de P de suelo mostraron una gran variabilidad. ALB_14 tuvo la menor concentración de P ($6,9 \text{ mg kg}^{-1}$) mientras que MJU_14 la mayor concentración ($68,1 \text{ mg kg}^{-1}$; Tabla 2). Los suelos explorados fueron Argiudoles, Haplustoles y Hapludoles. La aptitud varió entre I y III presentando limitaciones por diferentes causas (ep: Erosión potencial; c: Climática por temperatura y falta de humedad; s: de suelo en la zona radical; w: exceso hídrico; Tabla 2).

En cuanto a la caracterización hídrica la mayoría de los sitios presentaron valores de AU de 100 % salvo RDO_14, RDO_15 y LLA_15 que presentaron valores de 37, 53 y 59 %, respectivamente (Tabla 2). La napa estuvo presente en 7 de los 17 sitios evaluados oscilando entre 80 y 150 cm de profundidad (Tabla 2). Los niveles de precipitaciones durante el periodo siembra-cosecha fueron desde 450 mm en LAB_13 a 1095 mm en GOD_14 (Tabla 2), con un valor medio de 662 mm.

Tabla 2. Caracterización hídrica y edáfica de cada sitio.

Sitio	MO (%)	P (mg kg ⁻¹)	Aptitud	Clasificación de Suelo	AU (%)	Profundidad de Napa (cm)	Lluvias (siembra-cosecha)
LAB_13	2,07	19,0	II c	Haplustol údico	100	150	450
GOD_14	2,41	16,2	III we	Argiudol vértico	100	80	1095
RDO_14	1,80	46,5	III c	Haplustol típico	37	Sin napa	846
ALB_14	3,96	6,9	II w	Argiudol típico	100	Sin napa	750
SUR_14	2,87	62,1	I	Argiudol típico	100	80	650
MJU_14	2,63	68,1	II c	Argiudol típico	100	Sin napa	585
NOE_14	2,56	47,4	II c	Argiudol típico	100	120	518
NJU_14	2,60	7,0	II	Hapludol éntico	100	Sin napa	846
COL_14	2,70	42,0	II ep	Argiudol ácuico	100	100	754
LPI_14	1,80	30,6	II ep	Argiudol mólico	100	100	566
RSE_15	1,86	15,8	III c	Haplustol típico	53	Sin napa	746
GOD_15	2,41	17,2	II s	Argiudol vértico	100	Sin napa	452
GAL_15	2,90	27,4	I	Argiudol típico	100	100	548
LPI_15	2,44	14,8	II ep	Argiudol mólico	100	Sin napa	812
COL_15	2,80	10,0	II ep	Argiudol ácuico	100	Sin napa	482
COR_15	3,32	60,0	III c	Haplustol típico	100	Sin napa	632
LLA_15	1,70	15,3	III c	Hapludol éntico	59	Sin napa	527

MO: Materia orgánica; P: Concentración de fósforo del suelo, AU: Agua útil.

Los niveles de N en el suelo a la siembra variaron desde 30 kg ha⁻¹ a 352 kg ha⁻¹ para el sitio LLA_15 y NOE_14, respectivamente (Figura 3). La media registrada entre todos los sitios fue de 133 kg N ha⁻¹. Cabe remarcar que el percentil 25 tuvo un valor de 82 kg N ha⁻¹ indicando que el 75 % de los casos presentaron valores superiores, mientras que el percentil 75 un valor de 159 kg N ha⁻¹.

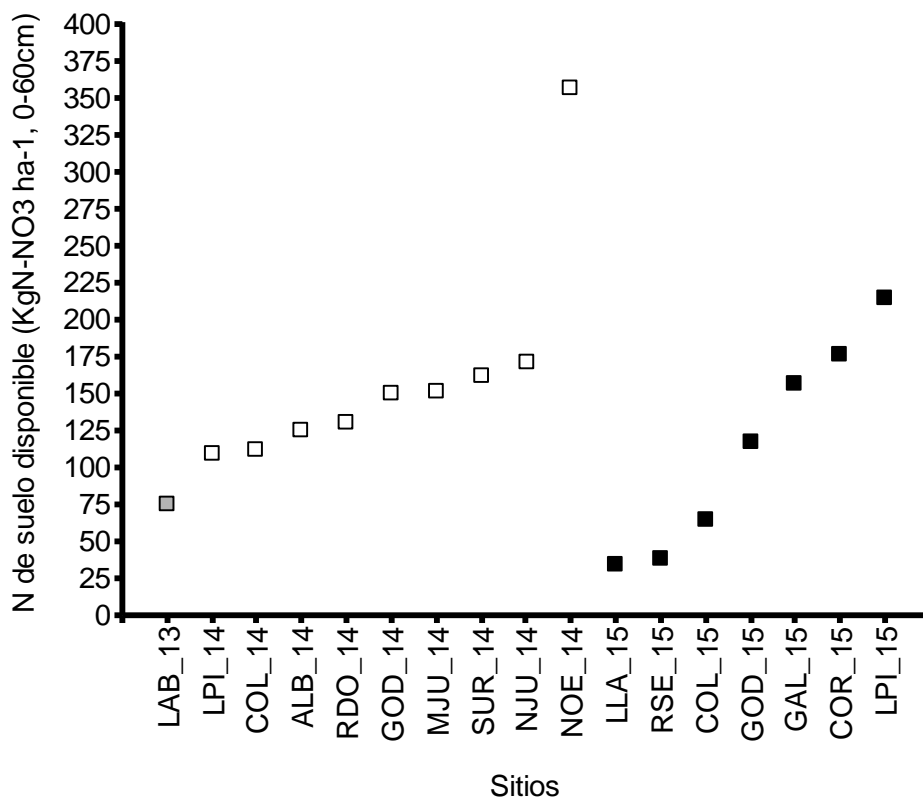


Figura 3. Disponibilidad de N (kg ha⁻¹ suelo 0-60 cm) en cada campaña y sitio de experimentación. Los colores identifican diferentes campañas.

La concentración de N de suelo varió entre estratos. El estrato superficial (0-20 cm) presentó el mayor valor (62,88 kg ha⁻¹) aunque con importante variabilidad. El 80 % de las mediciones estuvieron entre 22 y 112 kg ha⁻¹ (P10 y P90 respectivamente). A mayor profundidad el contenido de N ha⁻¹ disminuyó. En el estrato de 20-40 cm el valor medio fue de 47 kg ha⁻¹ mientras que en el estrato de 40-60 cm el valor medio fue de 28 kg ha⁻¹ (Figura 4).

Se encontró una relación lineal consistente entre el contenido de N de suelo en el estrato de 0-20 cm y el contenido en el estrato de 0-60 cm. La misma presentó un r² igual a 0,93 y una pendiente de 1,28. Esto indicaría que por cada kgN ha⁻¹ en el estrato 0-20 cm hay 1,28 kgN ha⁻¹ en el estrato de 0-60 cm (Figura 5).

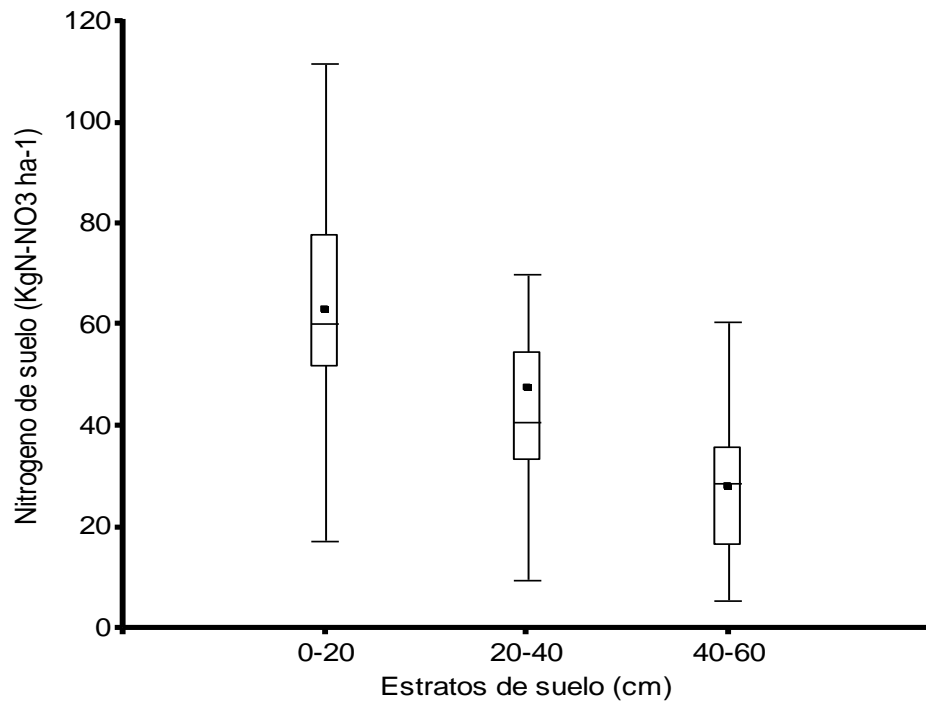


Figura 4. Niveles de nitrógeno en cada estrato de suelo. El punto representa el valor medio, la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana, los extremos de las cajas representan el percentil 25 y 75 y los bigotes representan el percentil 5 y 95.

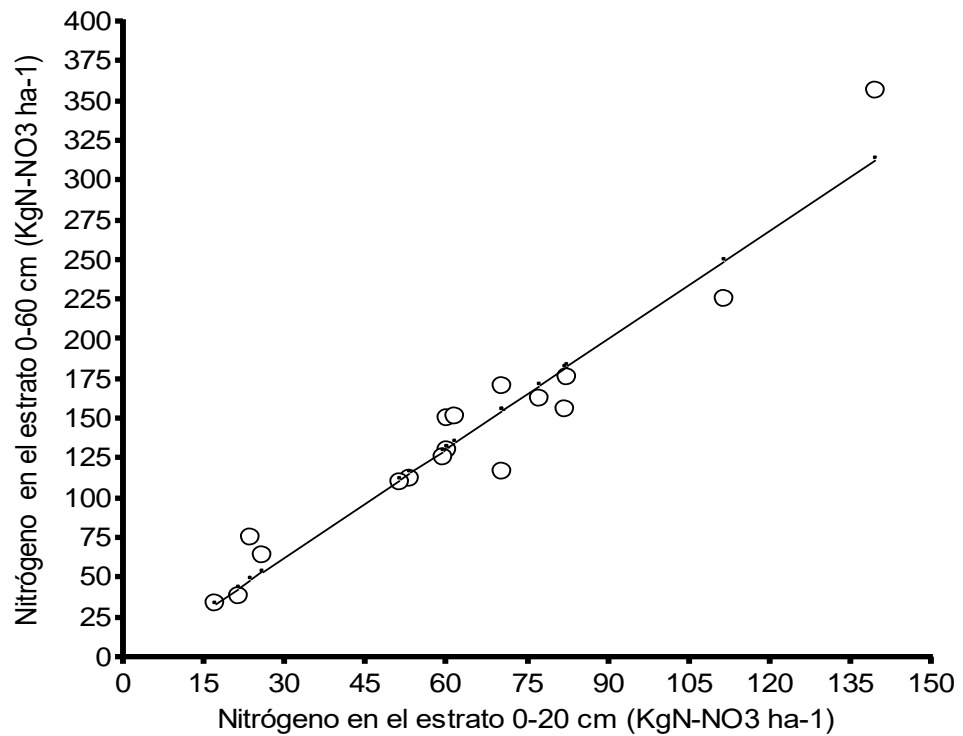


Figura 5. Relación entre la contenido de N de suelo ha^{-1} en el estrato de 0- 20 cm y en el estrato de 0- 60 cm.

Los rendimientos medios explorados de cada sitio presentaron un rango desde 5059 kg ha⁻¹ a 12213 kg ha⁻¹ obtenidos en los sitios COR_15 y LAB_13 respectivamente (Figura 6). La media de todos los sitios fue de 8719 kg ha⁻¹. La variación refleja la diversidad de ambientes explorados.

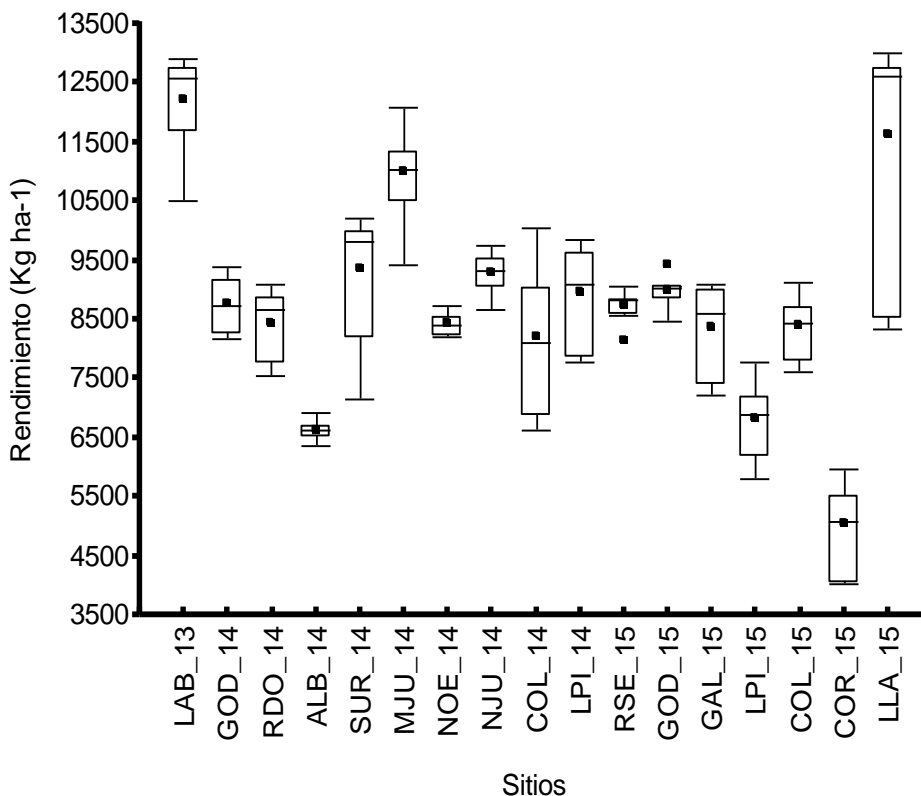


Figura 6. Rendimientos explorados en cada sitio. El punto representa el rendimiento medio, la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana, los extremos de las cajas representan el percentil 25 y 75 y los bigotes representan el percentil 5 y 95.

Dentro de cada sitio, las diferencias entre el valor máximo y mínimo fueron muy diferentes (Figura 6). Hubo sitios con importante variación de rinde entre parcelas (como LLA_15, COL_14 y SUR_14), mientras que otros mostraron muy poca diferencia (como ALB_14, NOE_14 y GOD_15). Estos resultados dan indicios de la variabilidad en la respuesta a N entre sitios. Esto se puede observar en la Figura 7, que representa el rendimiento logrado para cada nivel de N disponible (suelo + fertilizante). Se observa variación en rendimientos, disponibilidad de N a la siembra y respuesta al N disponible. Existieron sitios donde la respuesta fue casi nula como GOD_14, GOD_15, ALB_14 y NOE_14. El resto de los sitios mostraron respuesta variable. En algunos sitios las respuestas

fueron lineales (RDO_14, LPI_14, LP_15, COL_14, COR_15 y GAL_15). En otros sitios las respuestas siguieron el comportamiento de rendimientos decrecientes (MJU_14, NJU_14, RSE_15, SUR_14, LAB_13, LLA_15 y COL_15). Cabe remarcar que el tipo de respuesta se relacionó con la macro zona geográfica donde se desarrollaron los experimentos. Por ejemplo, GOD_14 y GOD_15 presentaron muy baja respuesta. LP_14, LP_15, COL_14 y COL_15 tuvieron respuestas lineales mientras que en LLA_15, LAB_13, SUR_14 y MJU_14 las respuestas fueron decrecientes a medida que aumentó el nivel de N.

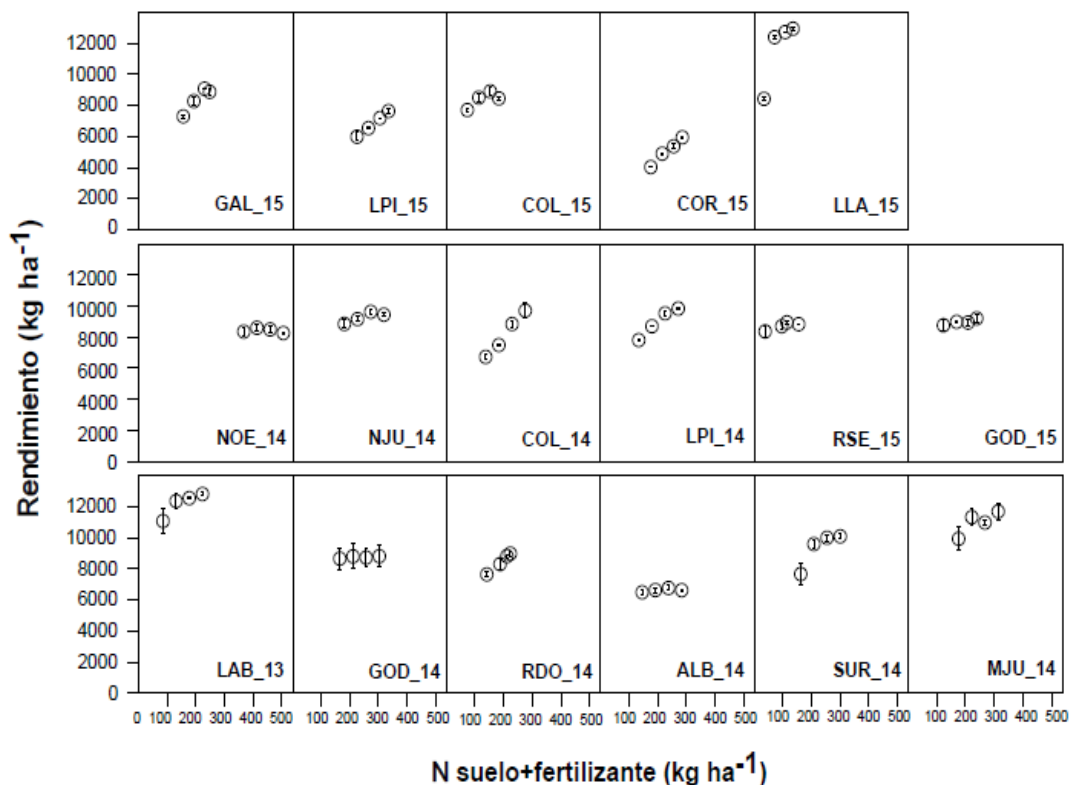


Figura 7. Rendimiento (kg ha^{-1}) en función del N disponible (kg ha^{-1} suelo + fertilizante) en cada sitio de experimentación. El punto representa la media y la barra el desvío estándar.

Respuesta a la fertilización aplicando modelos clásicos

a. Análisis de varianza

Los resultados del ANOVA por sitio se muestran en la Tabla 3. En 13 de los 17 sitios hubo respuesta ($p < 0,10$) al N aplicado. Cabe remarcar que en el caso de MJU_14 si bien no hubo diferencias estadísticamente significativas sí existió una tendencia al aumento de rendimiento con incrementos en el N aplicado y que en el caso de NOE_14 el valor de N disponible de suelo a la siembra fue extremadamente alto y poco frecuente para la zona (352

kg ha⁻¹). Estos resultados confirman la variabilidad en la respuesta del rendimiento al N aplicado y la necesidad de cuantificar el N inicial para no caer en errores de decisiones de fertilización.

Tabla 3. Rendimiento (kg ha⁻¹) en cada sitio para cada nivel de N aplicado.

Sitio	T0	T1	T2	T3	Promedio	Significancia
LAB_13	11088a	12374 b	12563 b	12829 b	12214	•
GOD_14	8669a	8811 a	8734 a	8821 a	8759	ns
RDO_14	7652 a	8314 b	8830 c	8990 c	8446	**
ALB_14	6496 a	6643 b	6775c	6632 b	6636	*
SUR_14	7672 a	9607 b	10014 b	10100 b	9348	*
MJU_14	9948 a	11338 ab	10993 ab	11704 b	10996	ns
NOE_14	8361 a	8608 a	8500 a	8266 a	8434	ns
NJU_14	8853 a	9165 ab	9636 bc	9453 c	9277	•
COL_14	6730 a	7494 b	8849 c	9709 d	8195	**
LPI_14	7812 a	8710 b	9537 c	9847 d	8976	**
RSE_15	8373 a	8704 ab	8955 b	8836 b	8717	•
GOD_15	8767 a	8989 a	8945 a	9211 a	8978	ns
GAL_15	7295 a	8277 b	9078 c	8876 c	8382	**
LPI_15	5984 a	6533 b	7186 c	7635 d	6835	**
COL_15	7703 a	8506 bc	8906 c	8450 b	8391	*
COR_15	4030 a	4892 b	5369 c	5944 d	5059	**
LLA_15	8425 a	12400 b	12725 c	12945 d	11624	**
Promedio	7874	8786	9153	9309		

•, *, ** $p < 0,1, 0,05, 0,01$, respectivamente; ns= no significativo.
Las letras representan DS entre tratamientos dentro de cada sitio.

El ANOVA del conjunto de datos confirma una interacción N aplicado x sitio significativa, que representó el 6,8 % de la variación total de los datos. Estos resultados son consistentes con lo mostrado en la Figura 7.

El ANOVA del conjunto de datos también indicó significancia de los efectos principales N aplicado y sitio (Tabla 4). El porcentaje de la suma total de cuadrados indica que gran parte de la variación en rendimiento (83,4 %) se debe a variación entre sitios, mientras que el 8,5 % se debe al N aplicado (Tabla4).

Tabla 4 Significancia y % de la suma de cuadrados totales (SCT) para el ANOVA del conjunto de datos.

Factor	p <	% SCT
N aplicado	0,001	8,5
Sitio	0,001	83,4
N aplicado x Sitio	0,001	6,8

La respuesta en rendimiento al N aplicado estuvo explicada parcialmente por el N disponible en el suelo al momento de la siembra (Figura 8). Sitios con valores de N de suelo menor a 117 kgN ha⁻¹ tuvieron respuesta significativa a la fertilización (Figura 8). No existieron sitios con bajo nivel de N de suelo sin respuesta al N aplicado. Cuatro sitios (GOD_15, GOD_14, MJU_14, y NOE_15) mostraron respuesta no significativa a la fertilización, coincidente con valores iguales o superiores a 117 kgN ha⁻¹.

Existió un grupo de 7 sitios (ALB_14, RDO_14, GAL_15, SUR_14, NJU_14, COR_15 y LP_15) que, presentando valores superiores a 117 kgN ha⁻¹ (entre 125 y 214 kgN ha⁻¹) presentaron respuesta significativa al N aplicado (Figura 8).

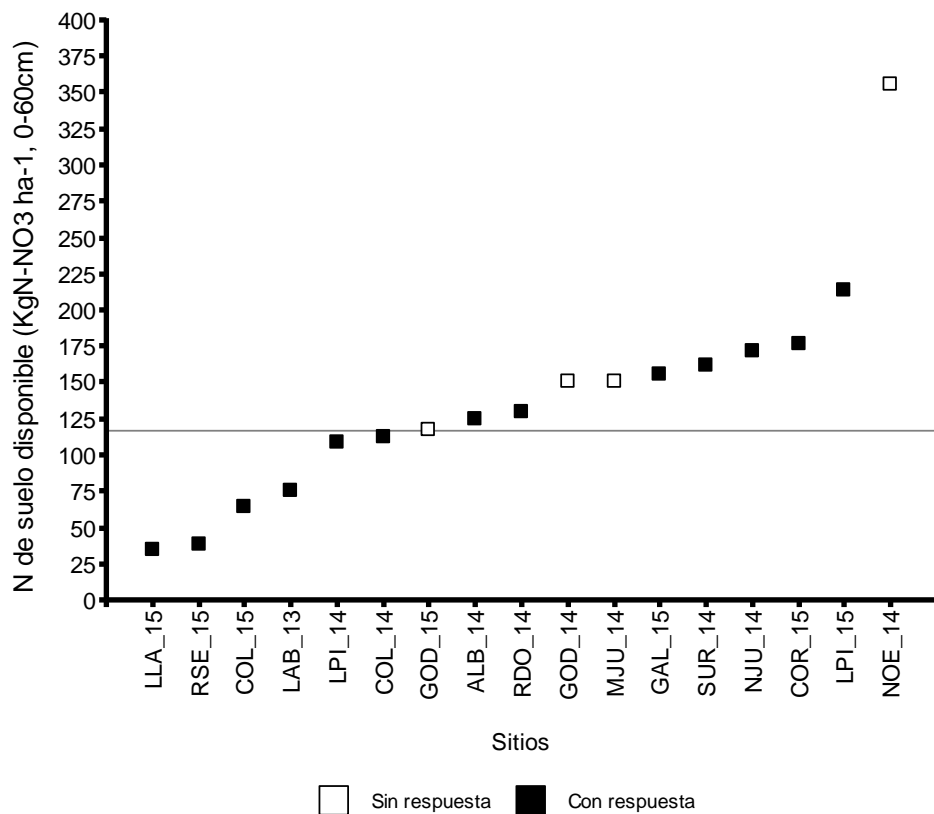


Figura 8. Niveles de N del suelo a la siembra (kgN ha⁻¹, 0-60 cm) para cada sitio. Se identifican sitios con (símbolos negros) y sin respuesta (símbolos blancos) significativa del rendimiento al agregado de N. La línea horizontal indica el nivel de N por debajo del cual siempre existió respuesta significativa.

En la Figura 9 se puede observar que la respuesta al agregado de N no fue explicada por la relación entre el rendimiento logrado con el máximo nivel de N aplicado y la disponibilidad de N a la siembra. Los sitios que comenzaron con menos de 117 kgN de suelo ha⁻¹ tuvieron respuesta al agregado de N dentro de un rango de rendimiento que fue entre 8450 kg ha⁻¹ y 12829 kg ha⁻¹. Sin embargo a partir de niveles de 117 kgN de suelo ha⁻¹ no se evidenció una respuesta clara ya que hubo sitios con y sin respuesta con altos niveles de N disponible de suelo con altos y bajos rendimientos logrados.

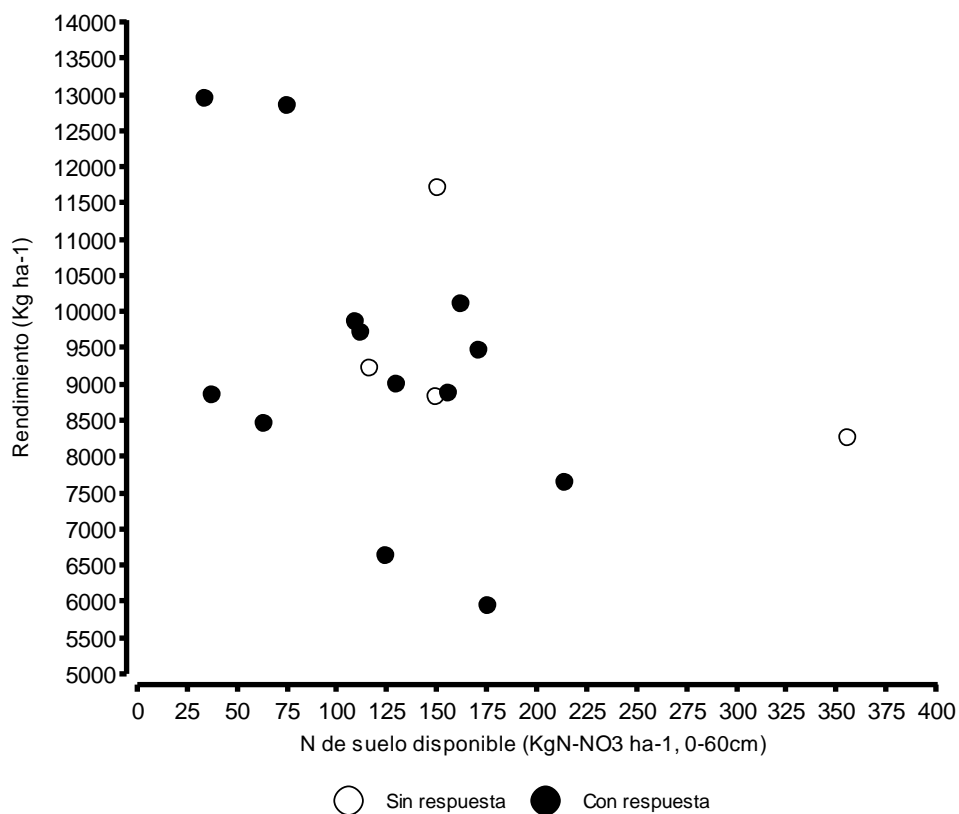


Figura 9. Rendimientos logrados en el tratamiento con máximo nivel de N aplicado en función del N disponible del suelo a la siembra. Se identifican sitios con (símbolos negros) y sin respuesta (símbolos blancos) significativa en rendimiento al agregado de N. Cada punto representa un sitio.

b- Umbral de fertilización aplicando un modelo de regresión al conjunto de datos

Fue posible calcular un umbral de respuesta para la región bajo estudio. Todos los parámetros de la función calculada fueron significativos ($p < 0,001$). La ordenada al origen (parámetro a) presentó un valor de 84, la pendiente de la función (parámetro b) fue de 0,05 y el valor umbral donde se saturó la respuesta (parámetro C) fue de 292 kg N ha⁻¹. Es decir que por cada kg de N disponible ha⁻¹ el rendimiento relativo se incrementó un 0,05 % hasta los 292 kg N ha⁻¹. Los intervalos de confianza (90%) para el parámetro a , b y C fueron de 80 a 87; 0,28 a 0,67 y de 212 a 372, respectivamente. El ajuste del modelo fue bajo ($r^2 = 0,13$), siendo baja la confiabilidad del modelo (Figura 10).

Al calcular el modelo bilineal contemplando sólo el N aplicado se pudo observar una mejora en su ajuste ($r^2 = 0,42$; Figura 11). Todos los parámetros de la función calculada fueron significativos ($p < 0,001$). La ordenada al origen (parámetro a) presentó un valor de 83, la pendiente de la función (parámetro b) fue de 0,18 y el valor umbral donde se saturó la respuesta (parámetro C) fue de 83 kg N aplicado ha⁻¹. Los intervalos de confianza (90%) para

los parámetros a, b y C también disminuyeron el rango presentando valores de 80 a 85, 0,14 a 0,23 y de 68 a 97 respectivamente. Cabe remarcar que la ordenada al origen es de 83, es decir que sin aplicar N el rendimiento estimado por el modelo es el 83 % del rendimiento máximo obtenido, lo que remarca una respuesta media a la fertilización baja. Este resultado, en general, no sucede en maíces de siembras temprana donde la pendiente suele ser mayor y el porcentaje de rendimiento logrado sin aplicación de N (ordenada al origen) es menor (Salvagiotti et al., 2011). Otra observación interesante es que desde niveles bajos de N aplicado existe una alta proporción de casos que superan el 90 % del rendimiento, lo cual indicaría que en estos casos el suelo aporta el N requerido por el cultivo.

Es evidente en ambos casos la variabilidad de rendimiento relativo para similares valores de N, siendo muy alta a bajos e intermedios niveles de N (Figuras. 10 y 11).

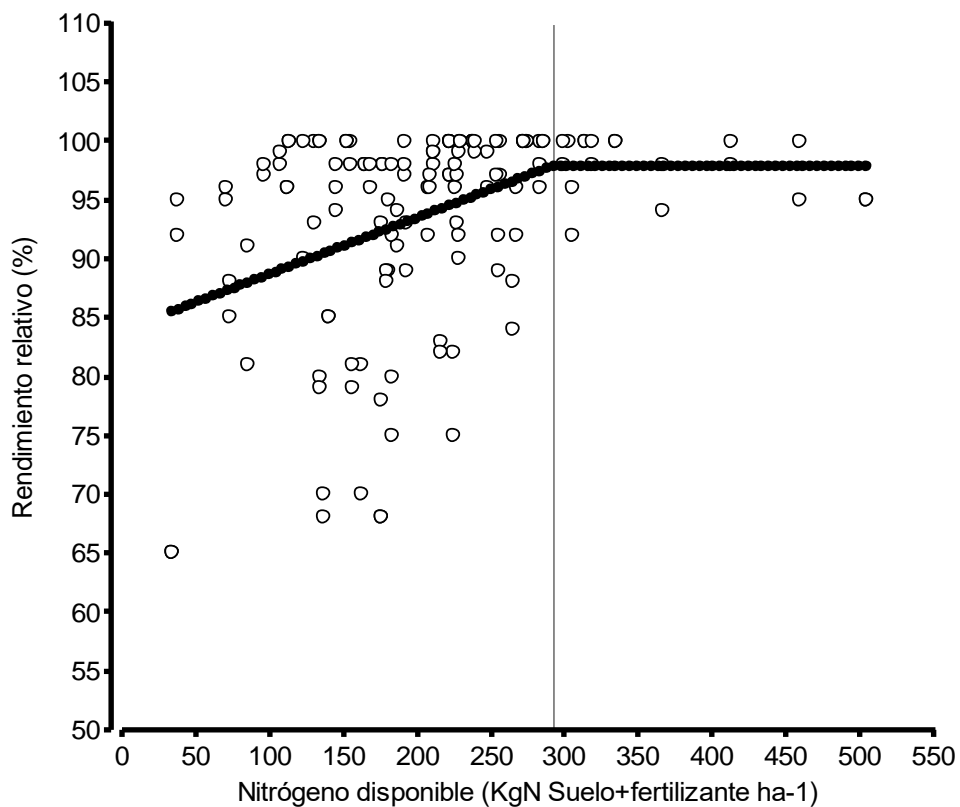


Figura 10. Rendimiento relativo en función de N disponible (N de suelo, 0-60 + fertilizante aplicado). La línea vertical indica el valor umbral de N disponible donde se satura la respuesta en rendimiento relativo.

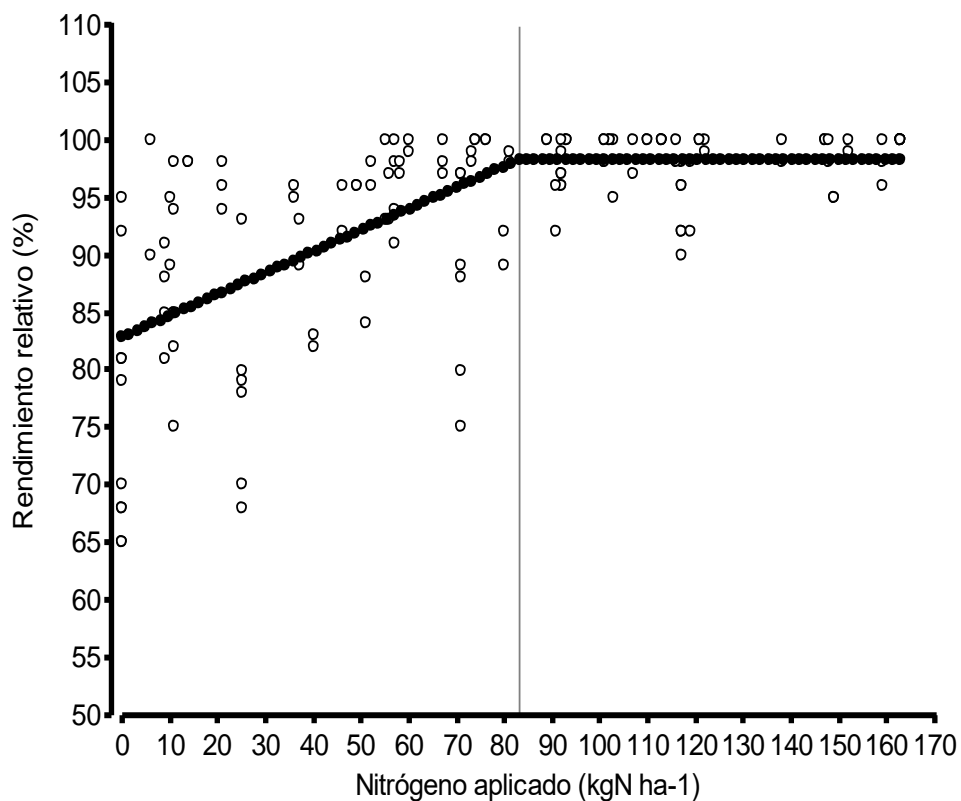


Figura 11. Rendimiento relativo en función del N aplicado. La línea vertical indica el umbral de N aplicado donde se satura la respuesta en rendimiento.

c- Regresión simple

Otro análisis realizado que permite determinar un umbral de respuesta biológico y económico fue la relación entre la EAUN y el Nd (Figura 12). La función de mejor ajuste para estimar la relación de estas variables fue una función de regresión exponencial (5). El parámetro a presentó un valor de 102, mientras que el parámetro b un valor de -0,012. Ambos parámetros fueron significativos ($p < 0,001$). El r^2 de la función fue de 0,42. Los valores de EAUN fueron máximos cuando el Nd fue bajo disminuyendo exponencialmente a medida que el Nd fue aumentando. La variabilidad fue máxima en niveles bajos de Nd, mientras que fue disminuyendo a mayor Nd.

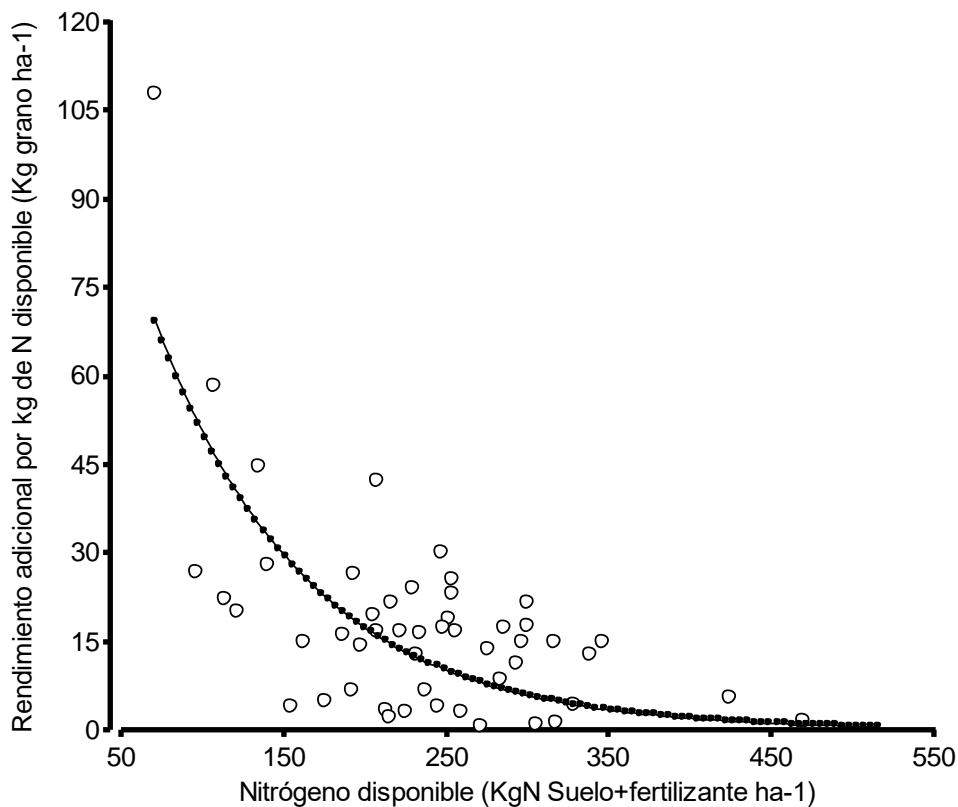


Figura 12. Eficiencia agronómica de uso de N en función del nitrógeno disponible.

Respuesta a la fertilización usando modelos lineales mixtos

Las limitaciones de los modelos clásicos utilizados para determinar umbrales de fertilización (bajos r^2 , incumplimiento de los supuestos de independencia), pretenden ser superados con los denominados modelos lineales mixtos. Como fue mencionado previamente, estos modelos permiten tener en cuenta la dependencia de los datos e incorporar el efecto de predictores o variables para explicar diferencias en la respuesta al agregado de N.

El primer análisis consistió en determinar si la respuesta del rendimiento variaba con el sitio explorado, antes de analizar el efecto diferencial de variables ambientales y de manejo sobre la respuesta al N aplicado. Se evaluaron dos modelos: el modelo 1 el cual considera que el intercepto varía con el sitio explorado pero la pendiente es igual para todos los sitios (Figura 12 A) y un segundo modelo (modelo 2) que incorpora el efecto de la interacción entre el N aplicado y el sitio explorado (Figura 12 B). El modelo B muestra variación en el intercepto y la pendiente.

El test de verosimilitud evidencia que el modelo que considera el efecto de la interacción N aplicado por sitio fue mejor ($p < 0,001$). Complementario a lo anterior el modelo que incorpora el efecto de la interacción N aplicado x sitio presentó menor AIC que el modelo final sin interacción (2223 vs 2251, respectivamente). La mejora también se observó en los residuales, siendo menor en el modelo con interacción que aquel sin interacción (264 vs 580 kg ha^{-1}). La Figura 12 muestra el ajuste de ambos modelos.

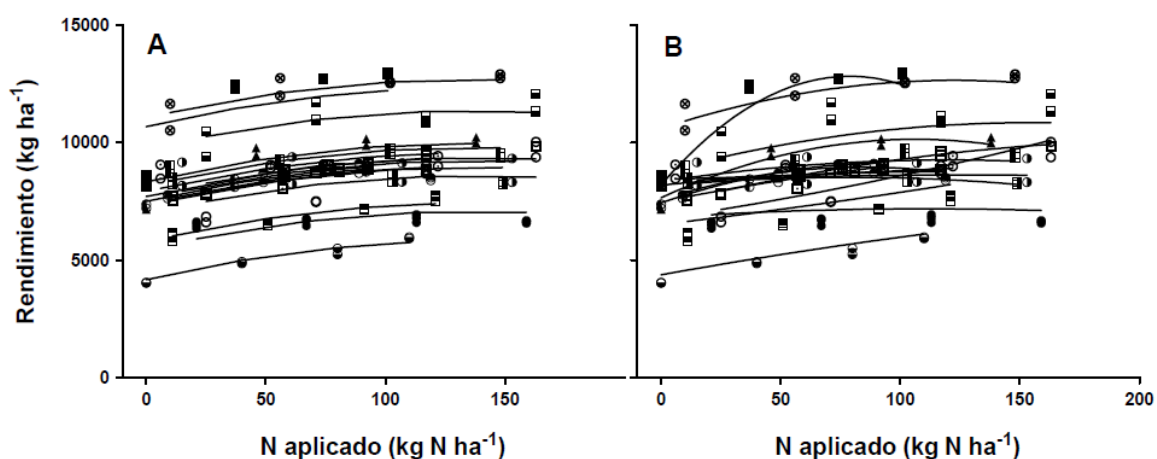


Figura 12. Rendimientos observados (símbolos) y ajustados (líneas) obtenidos del modelo lineal mixto. Cada símbolo representa sitios individuales. La Figura 12(A) representa el modelo de intercepto aleatorio donde el efecto del sitio es incluido como una variación en el intercepto. La Figura 12(B) representa el modelo de intercepto y pendiente aleatoria en donde el efecto del sitio es incluido como una variación en el intercepto y el efecto de la interacción N aplicado x sitio es incluido en la pendiente del modelo. Para mayor claridad no se representa el ajuste (componente fija) para la población de sitios.

Como fue descrito en los materiales y métodos, la pendiente de la respuesta del rendimiento al N aplicado para los diferentes sitios (Figura 12B) fue correlacionado con diferentes variables de manejo y ambiente (N del suelo, materia orgánica, fósforo del suelo, tipo de suelo, lluvias durante el ciclo, agua útil a la siembra, presencia de napa a la siembra y fecha de siembra) para explorar la influencia potencial de diferentes predictores al nivel de sitio sobre la respuesta al N aplicado. La exploración sugirió que los predictores en la componente fija que podían contribuir a mejorar el modelo eran fecha de siembra, N del suelo y tipo de suelo (Figurasuplementaria 1 del anexo). Por este motivo estas 3 variables fueron incluidas en los modelos.

Hubo dos modelos destacados basados en AIC. El mejor modelo (Modelo A) basado en AIC indicó que el rendimiento dependió del efecto de la fecha de siembra, el N aplicado y

de la interacción del N aplicado con el N del suelo a la siembra, que explicó la respuesta al aplicado de N diferencial entre sitios. El segundo modelo destacado (Modelo B) fue igual al modelo A con la inclusión de la interacción entre el N aplicado y el tipo de suelo. Los términos de interacción indican las respuestas diferenciales a través de los sitios dependen del N de suelo y el tipo de suelo (Tabla 5). Estos modelos fueron mejores que aquel sin predictores; esto es, asumiendo que no hay influencia del N aplicado o interacción N aplicado con el N del suelo y tipo de suelo. Esto se evidencia cuando se compara el AIC de los modelos destacados finales con el AIC del modelo sin predictores (Tabla 5). La varianza explicada por los efectos fijos (r^2_m) fue del 0,35 y 0,33 para el modelo A y B respectivamente. La varianza explicada por el modelo completo (r^2_c) fue de 0,93 y 0,94 para el modelo A y B respectivamente, indicando que el modelo describe adecuadamente los rendimientos observados.

Tabla 5. Criterio de Información Akaike (AIC) para modelos de efectos mixtos de la influencia potencial del N de suelo y tipo de suelo sobre la respuesta en rendimiento al N aplicado. Se muestran los mejores 5 modelos (de un total de 10 posibles). Cada columna representa un predictor diferente. Celda vacía indica que esa variable no fue incluida en el modelo. La inclusión de variables en un modelo particular está representado por + r^2_m representa la varianza explicada por los efectos fijos, mientras que el R^2_c representa la varianza explicada por el modelo completo.

Modelos	Predictores				r^2_m	r^2_c	AIC	Δ AIC
	Fecha de siembra	N aplicado	N aplicado x N del suelo	N aplicado x Tipo de suelo				
A	+	+	+		0,35	0,93	2198	0
B	+	+	+	+	0,33	0,94	2198	0,2
C	+	+		+	0,28	0,94	2207	9
D		+	+		0,12	0,91	2211	13
E					-	-	2216	17

En el modelo sin efectos fijos, la variación entre sitios en rendimiento tuvo la mayor contribución a la varianza total (90%). Esto es esperable dado la importante variación en manejo y ambiente entre sitios (Tablas 1 y 2). Esto también se observa en la variación de los interceptos en ambos modelos en la Figura 12. Los modelos finales indicaron que parte de la variación a través de los sitios fue debida a la fecha de siembra. La misma explicó entre el 10 y el 12 % de la variación de rendimiento como se evidencia en la Tabla 6.

La variación de la respuesta del rendimiento al N aplicado entre sitios (i.e., interacción N aplicado x sitio) representó el 1,3% de la varianza total sin efectos fijos (Tabla 6). Después de considerar los efectos fijos, el modelo A indicó que parte de la variación en la respuesta al

N aplicado fue debida a diferencias en el N del suelo a la siembra entre sitios (CPV fue 46 y 11% para β_{1j} y β_{2j} respectivamente, Tabla 6). En el modelo B que incluye tipo de suelo como predictor el CPV fue mayor (83 y 73% para β_{1j} y β_{2j} respectivamente, Tabla 6).

Tabla 6. Componentes de la variancia (CV) de efectos aleatorios y estimación y desvío estándar para diferentes modelos. El modelo sin efectos fijos está representado solo por un intercepto fijo. Los modelos A y B son los mejores modelos encontrados basados en AIC (Tabla 2). Todos los modelos tienen la misma estructura aleatoria.

Efecto	Parámetro*	Modelo sin efectos fijos	Modelo A	Modelo B
Efectos aleatorios			CV	
Sitio	β_{0j}	11.131.162	999000	1.020.350
N aplicado X Sitio	β_{1j}	17024	9214	2847
	β_{2j}	0,5	0,4	0,1
Residual		85758	91090	69510
CPV ^c _{Sitio}			12	10
CPV _{N aplicado x Sitio}	β_{1j}		46	83
	β_{2j}		11	73
CPV _{Residual}			-6	19
Efectos fijos		Estimación y DE		
Intercepto	α_0	8073 ± 383	11680 ± 1012	11390 ± 1059
Fecha de siembra	α_1	-	-76 ± 19	-74 ± 20
N aplicado	γ_0	-	67 ± 47	66 ± 47
	ϕ_0	-	-0,37 ± 0,32	-0,35 ± 0,32
N aplicado x N de suelo	γ_1	-	-0,30 ± 30	0,21 ± 0,18
	ϕ_1	-	0,002 ± 0,002	0,001 ± 0,001
N aplicado x tipo de suelo**	γ_2	II -	-	-13 ± 40
	ϕ_2	II -	-	0,09 ± 0,28
	γ_2	III -	-	-14 ± 44
	ϕ_2	III -	-	0,06 ± 0,31

*parámetros de la función cuadrática de respuesta al N aplicado; CPV, cambio proporcional de la variancia; ** Tipo de suelo es una variable categórica con tres niveles (Tipo I, II, y III); La línea de base es suelo tipo I

Los estimadores de los coeficientes de regresión de los modelos finales cuantifican la influencia particular de cada predictor sobre el rendimiento y la respuesta al N aplicado. La fecha de siembra tuvo un efecto negativo sobre el rendimiento siendo muy parecida en ambos modelos (-76 y -74 kg ha⁻¹d⁻¹ luego del 1 de Noviembre). El N aplicado mostró una respuesta positiva decreciente sobre el rendimiento (Figura 13). La pendiente inicial fue de 67 y 66 kg ha⁻¹ por cada kg N ha⁻¹ adicional aplicado para el modelo A y B respectivamente. El parámetro de curvatura fue de -0,37 y -0,35 kg ha⁻¹ por cada kg N ha⁻¹ adicional aplicado para el modelo A y B respectivamente (Tabla 6). La reducción de la respuesta en rendimiento al N aplicado al incrementar los niveles de N de suelo fue mayor en el modelo A que en el B (aproximadamente 3 y 2 kg ha⁻¹ por cada kg N ha⁻¹ aplicado al incrementarse 10 kg N ha⁻¹ de

suelo para el modelo A y B respectivamente, Tabla 6). El modelo B incluye una disminución adicional en la respuesta dada por el tipo de suelo. Relativo al suelo tipo I la reducción de la respuesta fue de 13 y 14 kg ha⁻¹ por cada kg N ha⁻¹ aplicado para suelo tipo II y III respectivamente (Figura 13).

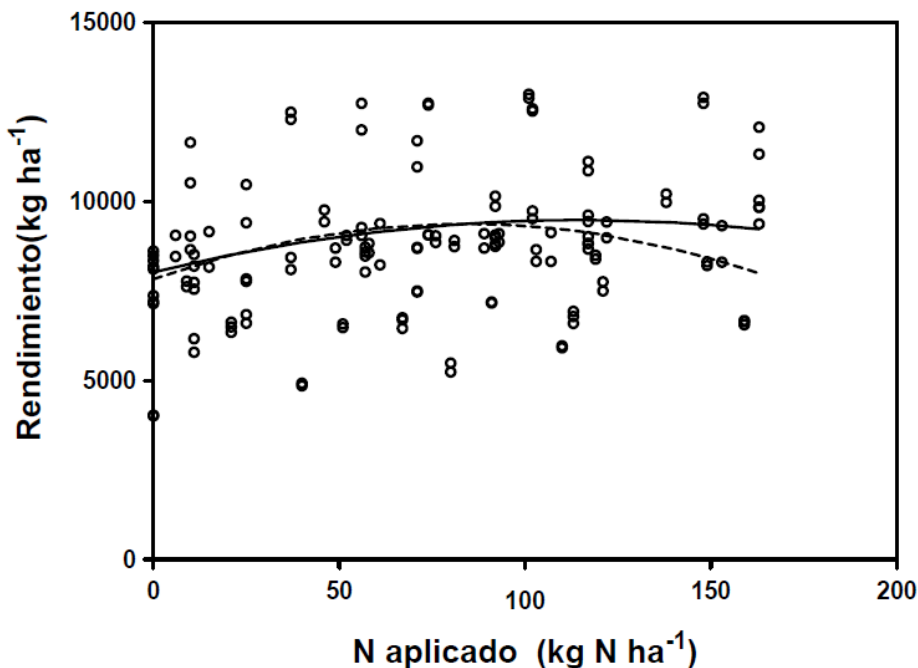


Figura 13. Rendimiento en función del N aplicado para el conjunto de datos. Las líneas representan los modelos finales para la población de sitios. La línea continua representa el modelo A y la línea discontinua representa el modelo B. Los parámetros de los modelos finales están representados por los efectos fijos mostrados en la Tabla 6.

La Figura 14 muestra la representación gráfica de los modelos finales. Las líneas representan la respuesta esperada del rendimiento para diferentes niveles de N aplicado considerando diferentes niveles de N de suelo. La respuesta al N aplicado fue calculada como la primera derivada de la ecuación cuadrática. En el modelo A el impacto del N de suelo redujo fuertemente la respuesta de rendimiento al N aplicado, independientemente del tipo de suelo (Figura 14A). En el modelo B, el impacto del N-NO₃ en el suelo en la siembra fue menos importante pero existió reducción adicional en la respuesta de rendimiento asociada con el tipo de suelo (figuras 14B, 14C, y 14D). La respuesta del rendimiento al N aplicado fue mayor en el suelo tipo I y menor en los tipos de suelo II y III (figuras 4B, 4C y 4D).

La información proporcionada en la Figura 14 se puede utilizar para realizar recomendaciones de fertilización con N igualando la respuesta del rendimiento al N aplicado (eje y en la Figura 14) con la relación de precios entre el fertilizante nitrogenado y el grano de maíz. Por ejemplo: considerando un precio relativo esperado de 15, el modelo A indica que la respuesta del rendimiento al N aplicado siempre es menor que este valor si el N de suelo es de 190 kg ha^{-1} (Figura 14A). Esto indica que no hay beneficio económico al aplicar N ya que en cualquier nivel de N aplicado la respuesta será menor a 15. Sin embargo, si el N de suelo es de 130 a 50 kg ha^{-1} , la respuesta del rendimiento al N aplicado es superior a 15 para niveles de N aplicado aproximadamente de 70 kg ha^{-1} , siendo la respuesta del rendimiento más alta a medida que se reduce el nivel de N de suelo. La respuesta del rendimiento con niveles superiores a 80 kg ha^{-1} de N aplicado se vuelve insignificante en cualquier nivel de N de suelo (Figura 14A). El modelo B indicó que para un suelo tipo I, el beneficio económico se da con una aplicación de 70 kg ha^{-1} de N cuando el suelo tiene 50 kg ha^{-1} de N; o bien de 40 kg ha^{-1} de N cuando el N de suelo es de 190 kg ha^{-1} (Figura 14B). Para suelos relativamente menos productivos (suelo tipo III), el beneficio económico se da con aplicaciones de 50 kg ha^{-1} cuando el suelo posee 50 kg N ha^{-1} y no hay beneficio económico de aplicar N en niveles altos (190 kg ha^{-1}) de N de suelo. (Figura 14D).

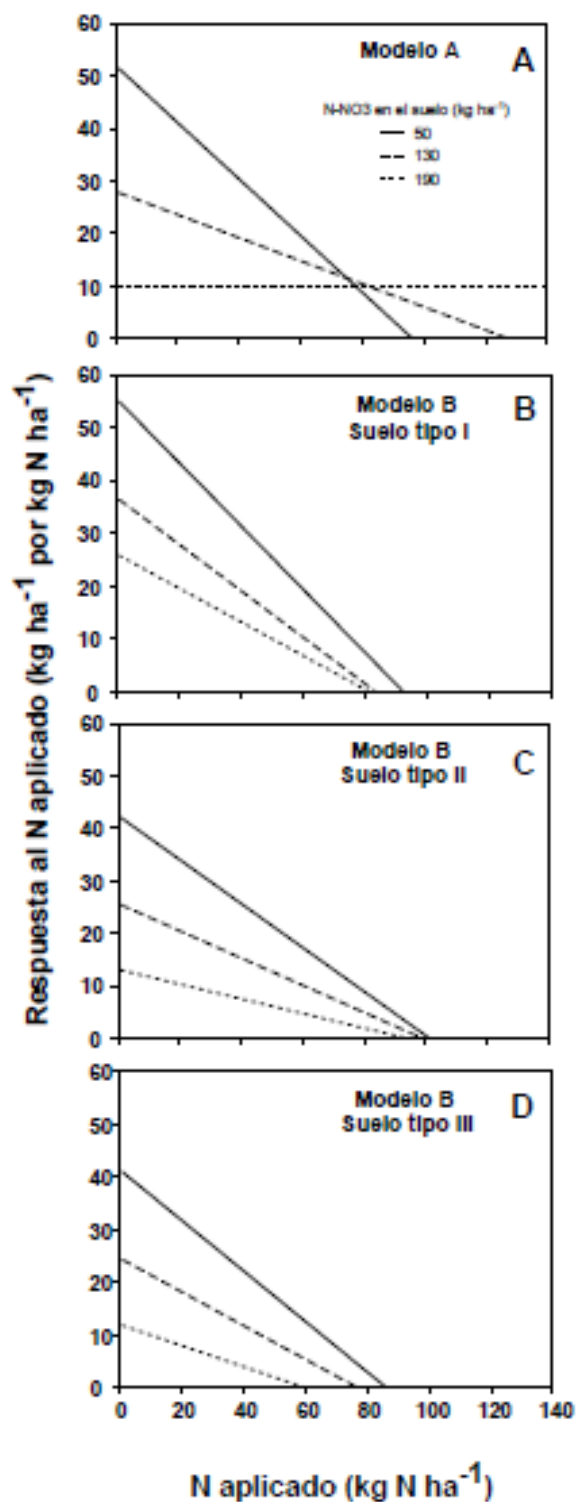


Figura 14. Respuesta esperada del rendimiento al N aplicado para diferentes niveles de N aplicado. La respuesta fue calculada como la primer derivada de la función cuadrática para el modelo A (A) y para el modelo B (B, C y D). En el modelo B la respuesta del rendimiento al N aplicado varía con el tipo de suelo (B, Tipo I; C, Tipo II; D, Tipo III). Cada línea representa la respuesta del rendimiento para diferentes niveles de N de suelo. Los niveles de N de suelo representados son los cuantiles 10 (50 kg N ha⁻¹), 50 (130 kg N ha⁻¹) y 90 (190 kg N ha⁻¹).

DISCUSION

Se asume que en maíces de siembras tardías los rendimientos logrados serán menores que en siembras tempranas y que el incremento en la oferta de N de suelo a la siembra es suficiente para cubrir una gran parte de los requerimientos del cultivo. Por ello la fertilización nitrogenada en siembras tardías es actualmente una práctica poco utilizada por los productores, o bien se realiza utilizando criterios poco confiables. En la presente tesis se pudo validar que la respuesta a la fertilización nitrogenada es significativa en la mayoría de los casos y dependió del sitio explorado, sin embargo la magnitud de la respuesta fue variable siendo en varios sitios nula o muy baja. La variable del sitio que explicó la magnitud de la respuesta fue nivel de N de suelo a la siembra y el tipo de suelo. Otras variables evaluadas del ambiente y de manejo no tuvieron efecto sobre la misma. Dos factores que posiblemente expliquen los resultados mencionados son la disponibilidad hídrica y el N de suelo a la siembra. Ninguno de los sitios incurrió en déficit hídrico y los valores de N a la siembra fueron levemente más elevados que en estudios de siembras tardías presentados por otros autores (Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2014; Diaz Valdez et al., 2014). Esto podría estar dado por la mejor calidad edáfica de los sitios evaluados en la presente tesis sumado a las condiciones de hídricas de suelo y de temperatura del aire favorable al proceso de mineralización de materia orgánica del suelo en los tres meses previos a diciembre. En las tres campañas evaluadas fueron más elevadas que el promedio histórico en cada sitio favoreciendo de manera diferencial procesos de mineralización comparados con años donde los valores de temperatura y humedad se acercan al promedio histórico. Factores como la humedad y temperatura del suelo inciden sobre la tasa de mineralización siendo máxima cuando el 50-70 % de los poros están ocupados por agua y la temperatura de suelo asciende entre los 25- 35 °C (Echeverría y Sainz Rosas, 2014).

Los rendimientos explorados estuvieron en su mayoría por debajo de 9500 kg ha⁻¹. Salvagiotti et al. (2011) encontró un umbral de respuesta para estos niveles de rendimientos de 137 kgN ha⁻¹ disponibles (N suelo + N fertilizado) en maíces de siembra temprana, valor muy cercano al nivel de N de suelo promedio de los sitios evaluados (133 kg N ha⁻¹). En contraste, en fechas de siembra temprana se esperaría que el N de suelo y la condición hídrica sean más limitantes que en fechas tardías y presenten mayor influencia sobre la respuesta en rendimiento al agregado de N y su magnitud.

Hubo casos que mostraron respuesta en rendimiento al agregado de N (de distinta magnitud) aun cuando los niveles de N de suelo disponible al momento de la siembra fueron elevados, sugiriendo que existen procesos de pérdida de N de suelo previa a su utilización por parte del cultivo. Las condiciones hídricas del suelo sumadas a la presencia de napa freática y a las elevadas precipitaciones inmediatas a la siembra pudieron haber generado procesos de pérdida de N de suelo por desnitrificación en casos de anegamientos temporarios y de lavado de N por lixiviación donde el agua drenó, siendo este último proceso el más frecuente en la zona bajo estudio. El AU del suelo al momento de la siembra fue en la mayoría de los casos del 100% y en muchos de ellos existió la presencia de napa freática. Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron, en general, abundantes. El AU del suelo sumado a las precipitaciones superó los 750 mm en el 75% de los casos. El promedio de precipitaciones durante el mes siguiente a la siembra fue de 106 mm superando este valor en más del 50 % de los sitios evaluados. El principal factor que regula la magnitud de pérdida de N por desnitrificación es el contenido de agua del suelo (Aulakh et al., 1984), seguido de la disponibilidad de N y C. La tasa de desnitrificación aumenta abruptamente cuando el espacio poroso del suelo lleno de agua alcanza el 78-79 % (Aulakh et al., 1984). Las pérdidas de N por desnitrificación son mayores en SD que en LC (Picone et al., 1997). Se han reportado pérdidas de 25 kg N ha⁻¹ bajo sistema de SD durante el cultivo de maíz (Hilton et al., 1994). En maíz bajo siembra directa en Balcarce, las mayores tasas de desnitrificación se dieron entre siembra y V6. Con fertilizaciones a la siembra las pérdidas fueron de 6,8 y 3,4 % de N para dosis de 70 y 210 kg N ha⁻¹ (Sainz Rozas et al., 2001). La desnitrificación disminuye la eficiencia con la que el N proveniente del fertilizante es usado por los cultivos (Aulakh et al., 1992). El promedio de precipitaciones durante el mes siguiente a la siembra fue de 106 mm. La lixiviación de nitrato depende principalmente del balance hídrico, ya que el nitrato es un ión muy soluble y no es adsorbido por los coloides del suelo. El lavado de nitratos es a menudo el principal mecanismo de pérdida en sistemas productivos agrícolas de regiones húmedas. Las pérdidas pueden variar desde 2 hasta 100 kg N ha⁻¹ (Haynes, 1986). Para Argiudoles típicos del sudeste bonaerense, Aparicio et al. (2008) reportaron pérdidas de N por lavado de 17, 28 y 38 kg N ha⁻¹ año⁻¹ para dosis de 0, 100, 200 kg N ha⁻¹ respectivamente. Es importante remarcar que la desnitrificación y la lixiviación de nitratos no sólo disminuyen la productividad parcial de N (kg de rendimiento de maíz por kg de N aplicado) y la eficiencia de recuperación de N (kg de N absorbido por el cultivo por kg de N aplicado), sino que

incrementan la emisión de gases invernaderos (óxido nítrico y nitroso) y el transporte de nitratos hacia capas de agua sub-superficiales.

La utilización de modelos mixtos para la predicción de la respuesta en rendimiento al agregado de N brindó información y certeza para el diagnóstico de fertilización nitrogenada, constituyéndose en una herramienta necesaria cuando se pretende generar criterios de fertilización a partir de ensayos multi-ambientales. Este estudio permitió encontrar modelos razonables y parsimoniosos que reducen la incertidumbre al decidir las dosis de fertilizante nitrogenado. Los modelos encontrados describieron satisfactoriamente la variación espacial y temporal de la respuesta del rendimiento en grano de maíz al N aplicado con un ajuste elevado ($r^2 = 0,93$). Los mismos tienen varios atributos importantes a considerar: (i) considera la estructura jerárquica de datos, una característica común de estos y otros datos agronómicos, (ii) considera que la respuesta en rendimiento al N aplicado varía con los sitios, y (iii) predice que la magnitud de la respuesta en rendimiento al N aplicado depende de variables ambientales, en nuestro caso del N de suelo al momento de la siembra y del tipo de suelo.

La utilización de modelos mixtos para recomendaciones de fertilización es rara. Lo más frecuente es ajustar una única función de respuesta para todo el set de datos usando mínimos cuadrados ordinarios (Mombiela et al., 1981; Sain y Jauregui, 1993; Pagani et al., 2008; Salvagiotti et al., 2011; Díaz Valdez et al., 2014). Los modelos lineales de efectos mixtos (también llamados modelos jerárquicos o multinivel) son una poderosa herramienta estadística (Wallach, 1995; Zuur et al., 2009; Qian et al., 2010) y el uso para explorar la influencia de prácticas de manejo y variables ambientales sobre variables de respuesta a nivel regional se está incrementando. Un ejemplo del uso de estos modelos ha sido realizado para cuantificar el efecto de prácticas de manejo sobre el rendimiento del cultivo de maíz (Gambín et al., 2016).

Como señalan Gelman y Hill (2007), un modelo jerárquico es un método para asociar dos modelos extremos: ignorar la variación entre sitios-años (agrupación completa) o estimar modelos separados dentro de cada sitio-año (sin agrupación). Modelos separados para cada sitio-año proporcionan modelos con r^2 alto, pero, por supuesto, dan resultados poco prácticos cuando se pretende generar un modelo de alcance regional.

La aplicación de un modelo de agrupación completa al conjunto de datos del presente trabajo, que es la situación típica, resulta en un modelo con r^2 de 0,08 que es significativamente menor que el modelo de efecto mixto propuesto anteriormente. Este

modelo de agrupamiento completo también calcula que el rendimiento se maximiza a un nivel más alto de N aplicado en comparación con los modelos de efectos mixtos (dato no presentado). Los parámetros del modelo indicaron que el rendimiento se maximiza a 150 kg de N ha⁻¹ aplicado cuando se utiliza un modelo cuadrático ajustado a todos los datos usando mínimos cuadrados ordinarios, mientras que los modelos finales propuestos aquí indicaron que el rendimiento se maximiza aproximadamente entre 80 y 120 kg ha⁻¹ de N aplicado (respuesta a N aplicado igual a cero, Figura 14) dependiendo del modelo y en base a niveles intermedios esperados de N de suelo. Esto sugiere que cuando se utilizan enfoques extremadamente simples las recomendaciones de fertilización de N podrían ser en exceso.

Aunque los beneficios de los modelos de efectos mixtos lineales para la recomendación de fertilizantes han sido reconocidos hace más de veinte años (Wallach, 1995), su uso es actualmente limitado. Algunos ejemplos de uso de estos modelos para la recomendación de N fueron explorados en trigo de invierno en Francia (Makowski y Wallach, 2001; Makowski et al., 2001). Los autores demostraron la importancia de los parámetros aleatorios para ser consistentes con los datos que normalmente observan, y destacaron la posibilidad de ampliar el modelo mediante la inclusión de características año-sitio. En su caso, mostraron cómo la inclusión de un predictor (N mineral del suelo al final del invierno) mejoró la precisión de las predicciones. Aunque en el presente estudio exploramos otros predictores, los resultados son consistentes con los encontrados en los estudios mencionados, mostrando la importancia del N de suelo a la siembra para ayudar a las recomendaciones de fertilización. Esto también es consistente con el uso general de modelos que incluyen el N de suelo y N aplicado como una única medida del total de nutrientes (González Montaner et al., 1997; Salvagiotti et al., 2011). El enfoque alternativo utilizado aquí (llamado enfoque de covarianza, Sain y Jauregui, 1993) tiene ventajas prácticas, incluyendo una respuesta del rendimiento al N aplicado variable basado en N de suelo o menor dependencia de análisis de suelo asumiendo algún nivel esperado.

Un modelo alternativo indicó que variables más integradoras como el tipo de suelo influyen en la respuesta del rendimiento al N aplicado. Características aisladas del suelo como materia orgánica o P de suelo no mostraron relación con la respuesta al N aplicado. Esto es una evidencia clara de la complejidad que existe entre la adición del fertilizante al suelo y rendimiento donde se integran algunos procesos conocidos y desconocidos (Sain y Jauregui, 1993). En este sentido, Nelson et al. (1985) concluyeron que no se puede recomendar un solo

modelo para todas las situaciones, y que el investigador solo puede esperar que el mejor modelo tenga fundamentos agronómicos. Esto es acorde a nuestra estrategia de selección de modelos. Este enfoque no acepta la noción de que hay un simple "modelo verdadero" en ciencias biológicas. La selección del mejor modelo representa la inferencia a partir de los datos disponibles y nos dice qué efectos pueden respaldarse con los datos (Burnham y Anderson, 2002, 2004). La visión global de la selección de modelos basada en AIC considera que "todos los modelos son incorrectos, pero algunos son útiles" (Aho et al., 2014).

Otras variables como la materia orgánica, el fósforo del suelo, el tipo de suelo, la precipitación durante el ciclo del cultivo, el contenido inicial de agua en el suelo, la presencia de una capa freática influyente y la fecha de primera helada agronómica no tuvieron influencia significativa sobre la magnitud de la respuesta. La falta de interacción con el P del suelo podría esperarse, dado que la mayoría de los sitios evidenciaron valores de P en el suelo por encima del umbral por debajo del cual el P de suelo se considera limitante en nuestra región (12-14 mg kg⁻¹; Rubio et al., 2016). En condiciones con P de suelo reducido, se esperaría que la respuesta de rendimiento al N aplicado sea menor (Rubio et al., 2016). Sin embargo, no pudimos explorar esta hipótesis. Debido a que el maíz de siembra tardía se siembra particularmente en ambientes de baja capacidad productiva, la interacción con otros nutrientes es un aspecto importante que merece mayor atención.

Un aspecto a enfatizar es que la falta de parámetros que expliquen la respuesta podría estar relacionado con el número limitado de sitios evaluados y / o la variación de los predictores. A su vez el hecho de que varios sitios no presentaron respuesta (Figura 14) reduce la posibilidad de encontrar relaciones con la misma (Markowski et al., 2001).

Otras variables que no se pudieron explorar aquí pero que es sabido que influyen en la respuesta del rendimiento de grano a N aplicado (densidad de plantas logradas, Duncan, 1954, Carlone y Russell, 1987 o genotipo, Gambín et al., 2016) son de especial interés para un futuro análisis. Se ha demostrado la importancia del tamaño del conjunto de datos sobre el valor de incluir una variable explicativa (Markowski et al., 2001). Aunque nuestro estudio es limitado en cuanto al tamaño del conjunto de datos (número de combinaciones sitio-año), los modelos mixtos generados muestran un enfoque estadístico que conduce a mejores modelos que los que se utilizan actualmente.

Finalmente, las variaciones de rendimiento entre los sitios fueron muy importantes independientemente de los niveles de N aplicado o de N de suelo. Los modelos finales

indicaron que la fecha de siembra explicaba parte de esta variabilidad, siendo menor en las fechas de siembra tardía desde principios de diciembre hasta principios de enero. Resultados similares fueron encontrados por Mercau y Otegui (2014) usando un modelo de simulación, destacando la importancia de esta variable de manejo. Ninguna de las otras variables exploradas mostró aparente asociación con el rendimiento. Se sabe que otras variables de manejo no exploradas (genotipo y densidad de siembra) tienen una influencia relevante sobre el rendimiento en el maíz de fechas de siembra tardía (Gambín et al., 2016), y podrían estar provocando variaciones en el rendimiento no capturadas por los modelos actuales.

Un criterio de fertilización comúnmente utilizado para la zona bajo estudio es la de fijar un valor objetivo de N disponible en función del rinde esperado, restarle el N que el suelo tiene a la siembra y el resto aplicarlo con la fertilización. Este umbral para la zona, en fechas tempranas, está alrededor de 137-180 kg N ha⁻¹ para el centro sur de Santa fe (Salvagiotti et al., 2002, 2011) y entre 150 y 180 kg N ha⁻¹ para el sudeste de Buenos Aires (Pagani et al., 2018). Este criterio no calcula la capacidad de mineralización del suelo durante el ciclo del cultivo ya que solo se cuantifica el N a la siembra y el aplicado. En siembras tardías se asume que este umbral es similar o menor ya que el rendimiento objetivo baja y por lo tanto el requerimiento será menor. Este criterio asume que el suelo tiene la misma capacidad de mineralización de N durante el ciclo del cultivo en siembras tempranas y tardías y que el N de suelo encontrado a la siembra es utilizado con la misma eficiencia en ambas fechas de siembra. Estudios realizados por Díaz Valdez et al. (2014), Salvagiotti et al. (2014) y Gambín et al. (2016) encontraron umbrales menores a 170 kg N ha⁻¹. En el presente estudio el umbral de Nd (kg N del suelo ha⁻¹ + kg N aplicado ha⁻¹) encontrado fue de 292 kg de Nd ha⁻¹. Este valor no fue consistente ya que la función estimada, si bien tuvo parámetros significativos, el valor de r² fue bajo (0,13). La causa de este bajo ajuste puede deberse a la gran variabilidad de ambientes explorados. Los sitios evaluados presentaron un alto rango en el nivel de N de suelo al momento de la siembra y de rendimientos logrados. A su vez sitios con altos niveles de N de suelo a la siembra presentaron respuesta significativa al agregado de N. Lo anterior explicaría, en parte, el bajo ajuste del modelo y el valor umbral encontrado con respecto a otros trabajos donde el rango de N de suelo explorado es menor. Cuando se calculó el umbral de kg N aplicado ha⁻¹ en el cual se satura la respuesta (sin contemplar el N de suelo disponible a la siembra) el ajuste de los parámetros de la función mejoró con respecto al modelo anterior, dándole mayor confiabilidad a la función generada. La mejora en la

estimación de los parámetros se dio principalmente porque el rango evaluado de N fue menor (solamente N aplicado) y la respuesta fue positiva en la mayoría de los casos. Una observación relevante es que la ordenada al origen fue de 84, esto significa que sin aplicar N se estaría logrando el 84 % del rendimiento máximo. Este valor es considerablemente mayor (29%) a los reportados por Salvagiotti et al. (2011) y levemente mayor (10%) a las reportadas por Díaz Valdez et al. (2014) en siembras tardías en Entre Ríos. Este resultado es lógico ya que la oferta de N es mayor en siembras tardías y por ende cubriría un mayor porcentaje del rendimiento máximo logrado.

Si bien el modelo que relaciona rendimiento relativo y N aplicado es una herramienta válida para el diagnóstico de fertilización, presenta limitaciones a la hora de definir la dosis de N a aplicar. Una de ellas es que la variable dependiente es rendimiento relativo al máximo rendimiento logrado, lo que significa que si un productor quiere alcanzar el máximo rendimiento debe aplicar una dosis fija de N (umbral) sin importar el rendimiento que espere. Esto es una limitación ya que es sabido que los requerimientos de N de maíz varían según el rendimiento logrado. Si se aplicaría la misma dosis para lotes con rendimientos diferentes, inevitablemente, en algunos casos la dosis aplicada sería muy alta y en otros estaríamos fertilizando menos de lo que requiere el cultivo. Es de suma importancia no incurrir en sobre-fertilizaciones ya que el N no utilizado por el cultivo puede incrementar la emisión de gases de efectos invernaderos o bien ser lixiviado hacia acuíferos no contaminados (Stevenson y Cole., 1999). Otra limitación del modelo es que para calcularla dosis óptima económica (DOE) se deberían transformar los parámetros de la función de porcentaje a rendimiento absoluto a partir de suponer el rendimiento máximo objetivo en función del ambiente y planteo productivo. Esta es una aproximación válida pero carece de simplicidad, y tiene la limitante de tener que suponer un rendimiento máximo a lograr en un lote determinado que es algo errático en la mayoría de los casos. Otra limitación es que el modelo lineal plateau supone una respuesta constante al agregar una unidad de N hasta el valor umbral donde se satura la respuesta. Esto biológicamente carece de sentido ya que el comportamiento de la respuesta al agregado de N sigue la ley de los rendimientos decrecientes donde una función cuadrática podría representarla con mayor fidelidad. Cabe remarcar que en el presente trabajo también se calculó un modelo cuadrático plateau pero los parámetros de la función no difirieron significativamente de los parámetros de la función lineal plateau por lo que se optó utilizar el último por su mayor simplicidad.

La EAUN mostró una relación decreciente con el N disponible. Este análisis es coincidente con lo encontrado a través de la utilización de modelos mixtos que explica la magnitud de la respuesta está condicionado por el nivel de N de suelo disponible al momento de la siembra. La EAUN baja exponencialmente a medida que el Nd se incrementa. Una ventaja de este modelo es que es posible calcular la DOE con cierta facilidad. Conociendo la relación de precios entre aplicar una unidad de N y el precio neto del grano de maíz, e igualándolo con la EAUN se puede determinar el Nd con el cual deberíamos contar para lograr el máximo beneficio económico. Conociendo cuanto N nos aporta el suelo y restándolo al valor de Nd se puede determinar la DOE. Sin embargo este modelo tiene la limitante de presentar un bajo ajuste, lo que le quita certeza para predecir respuestas.

El gran desafío que hoy enfrenta la agricultura es aumentar la producción y a su vez reducir el impacto ambiental. El aumento de producción no pueden basarse únicamente en la expansión de la superficie ya que resulta en pérdidas de biodiversidad, emisión de gases de efecto invernadero y exposición de tierras frágiles a procesos erosivos (Andrade, 2016). El aumento de la producción debe centrarse en tecnologías de procesos y de conocimiento (Satorre, 2004) que permitan revertir la degradación de suelos, la contaminación química y hacer un uso más racional de los recursos e insumos. La eficiencia de uso de un nutriente generalmente disminuye en respuesta al incremento de la disponibilidad del mismo siguiendo la ley de rendimientos decrecientes (Ferreyra, 2015; Abbate y Andrade, 2014), por lo que aumentar la producción a base de un insumo termina en reducciones de la eficiencia de uso del mismo. Esto conduce a que para mejorar la producción y la eficiencia de recursos a la vez se necesitan saltos de curva en la relación entre el rendimiento del cultivo y la disponibilidad de recursos e insumos. El aumento de la eficiencia en el uso de los insumos conduciría a utilizar menor cantidad de los mismos y a reducir el riesgo de contaminación. En lo que respecta a maíz de fechas tardías algunas variables podrían ser consideradas en busca de aumentos de producción y eficiencia de uso de N. La inclusión de cultivos invernales previos al maíz aparece como uno de los aspectos del sistema de producción más relevantes. Andrade et al. (2016) encontró que rotaciones que incluían leguminosas invernales previa al maíz incrementaban en N adsorbido y esto podría explicar la mayor productividad comparada con rotaciones de monocultivos. Álvarez et al. (2012) encontraron un incremento de entre 28 y 30 % de rendimiento en maíz tardío incluyendo centeno de cobertura como antecesor a maíz tardío; cabe remarcar que este resultado se dio principalmente por una mayor captura y

disponibilidad de agua para el cultivo de maíz y no por aporte de N por parte del centeno. La inclusión de *Vicia villosa* es una práctica utilizada por los productores con la finalidad de elevar la disponibilidad de N biológico para maíz siguiente (Rillo, S. et al., 2013; Capurro J. et al., 2012; Madias et al., 2016) e incrementar la productividad del sistema (Capurro J. et al., 2012). La intensificación y diversificación del sistema se traducen en mejoras físicas y químicas del suelo que permiten lograr aumentos de producción acompañadas de aumentos de eficiencia de uso de N. Salvagiotti et al. (2016) no encontraron respuesta en rendimiento de maíz tardío al agregado de en N con antecesor *Vicia villosa* posiblemente por el incremento de N disponible de suelo aportado por la leguminosa. Esto sugiere que contemplando el cultivo antecesor uno podría manejar la oferta de N sin tener la necesidad de fertilizar para cubrir los requerimientos de maíz en siembras tardías evitando aplicar N sin ser utilizado. Prácticas específicas de manejo propias del cultivo también podrían lograr saltos productivos que se traduzcan en mayor eficiencia de uso de N. En este sentido la densidad de siembra, la elección del genotipo y la nutrición balanceada aparecen como variables de jerarquía. Cerliani et al. (2017) demostraron que existe interacción entre la respuesta al agregado de N y la densidad de siembra en ambientes de alto potencial en el sudeste de Córdoba concluyendo que es necesario contemplar la interacción entre estas variable para aumentar la producción, la eficiencia de uso del nitrógeno y disminuir el impacto ambiental. Ferreyra (2015) demostró cómo híbridos modernos superan en producción y eficiencia de uso de N a híbridos antiguos tanto en altas como baja disponibilidad de N. Gambín et al. (2016) encontró una fuerte interacción entre el genotipo utilizado y la respuesta en rendimiento al N aplicado en maíces tardíos en la zona central de Argentina sugiriendo que existen genotipos más eficientes en el uso del N que otros. En cuanto a nutrición balanceada es frecuente encontrar aumentos en la eficiencia de uso de N cuando la fertilización es acompañada de otros nutrientes. Esposito et al. (2013) muestra como el agregado de Zn incrementa la EUN en un 50 %. Castillo et al. (2016) encontró que el agregado de 13 kgS ha⁻¹ permitió disminuirla dosis de N en 25 kg ha⁻¹ manteniendo similar producción de granos. Fixen (2005) encontró que la fertilización complementaria con P incrementó la eficiencia de recuperación en maíz en todas las dosis de N. De los sitios analizados LLA_15 logró la máxima eficiencia de uso de N. Esto coincide con que LLA_15 fue el único sitio que tuvo un cultivo de cobertura antecesor y una fertilización con 40 kg P ha⁻¹, 11 kg S ha⁻¹ y 0,11 kg Zn ha⁻¹ a la siembra del cultivo de CC. Lo anterior son algunos ejemplos de tecnologías específicas que deberían ser tenidos en cuenta a

la hora de cuantificar la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz tardío en pos de lograr un incremento de producción, mayor estabilidad de rendimientos, un uso más eficiente del N con menores riesgos de contaminación, constituyendo una agricultura más sustentable.

CONCLUSIONES

Se acepta parcialmente la hipótesis que afirma que la respuesta en rendimiento al agregado de N en maíces de fecha tardía no siempre es significativa, y depende de la relación entre el rendimiento logrado con el máximo nivel de N y el nivel de N disponible de suelo a la siembra. Se demostró que la respuesta no siempre es significativa y varía con el sitio explorado. La presencia o ausencia de respuesta se vio condicionada parcialmente por el nivel de N de suelo disponible a la siembra, observándose respuesta con niveles bajos de N de suelo a la siembra. La relación entre el rendimiento logrado con el máximo nivel de N y el N de suelo al momento de la siembra no fue un indicador consistente para determinar respuesta a la fertilización.

Se acepta parcialmente la hipótesis que afirma que la respuesta en rendimiento al N aplicado depende del N del suelo a la siembra, de la fecha de siembra y de la fecha de primera helada. La utilización de modelos mixtos permitió encontrar un modelo razonable y parsimonioso que describió la variación espacial y temporal del rendimiento de grano de maíz al N aplicado con un elevado ajuste ($r^2 = 0.91$). Los modelos encontrados demostraron que la fecha de siembra tiene un efecto significativo sobre la determinación del rendimiento y que la magnitud de la respuesta al N aplicado depende del N de suelo al momento de la siembra y del tipo de suelo explorado.

Se acepta la hipótesis que afirma que el umbral de respuesta de N disponible (suelo + fertilizante) usando las aproximaciones clásicas es similar a lo encontrado en otros estudios, pero evidencia una clara variación que limita su aplicación. La utilización de modelos bilineales para estimar umbrales de respuesta no resultó útil y confiable, mostrando limitaciones debido a la variabilidad de datos analizados. Los modelos mixtos generados demostraron ser más certeros en la predicción de la respuesta del rendimiento al N aplicado para el set de datos, demostrando la importancia del N del suelo a la siembra y del tipo de suelo como variables que explican en parte la respuesta del maíz en fechas tardías. Se propuso un método y se generaron modelos estadísticos con covariables a nivel de sitio para ayudar a los productores a optimizar la dosis de fertilización con N.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, P., Andrade, F., 2014. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. Eds: Echeverría H y García F. Editorial INTA. Capítulo 6, pgs. 155-185.
- Aho, K., Derryberry, D., Peterson, T., 2014. Model selection for ecologists: the worldviews of AIC and BIC. *Ecology*. Vol. 95, pgs.631-636.
- Álvarez, R., 2013. Métodos estadísticos usados para elaborar modelos de respuesta a la fertilización. En: Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Ed.: Álvarez et al., editorial FAUBA. Capítulo 4, pgs. 57.
- Álvarez, C., Fernández, R., Bagnato, R., Lienhard, C. P., Quiroga A., 2012. Manejo de cultivos de coberturas: efecto sobre la dinámica de agua, nitrógeno y productividad de maíz tardío. En revista en siembra directa. *Revista especial Agua*. Pgs. 56-62.
- Aparicio, V., Costa, J. L., Zamora, M., 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agricultural Water Management*, Vol 95, pgs. 1361-1372.
- Andrade, F. H., Andrade, F. H. 2016. Los desafíos de la agricultura.
- Andrade, F., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., Valentinuz, O., 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, Vol 39, pgs.453-459.
- Aulakh, M. S., Rennie, D. A., Paul, E. A., 1984. The influence of plant residues on denitrification rates in conventional and zero tilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 48, pgs.790-794.
- Aulakh, M. S., Doran, J. W., Mosier, A. R., 1992. Soil denitrification significance, measurement, and effects of management. In *Advances in soil science*, pgs. 1-57.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., 2013. lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.0-5. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Bert F., Satorre E., 2012. Sistemas de producción de maíz: maíz temprano y tardío. En revista técnica en SD. *Revista Aapresid Maíz*, pgs.19 -24.
- Black, C.A. 1993. Soil fertility evaluation and control. Lewis Publisher. USA. Pgs. 72.
- Bolsa de Comercio de Rosario 2014. Informe especial sobre cultivos N°60, enero 2014. Bolsa de cereales de Rosario, Argentina.

- Bolsa de Comercio de Rosario 2015. Estimaciones de Producción, base de datos disponible on-line, <https://www.bcr.com.ar/Pages/gea/estimaProd.aspx>
- Bolsa de Cereales argentina 2014. Panorama Agrícola Semanal, base disponible on-line, <http://www.bolsadecereales.org/>
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer Science and Business Media.
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., 2004. Multimodel inference understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods and Research* Vol 33, pgs.261-304.
- 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.
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., 2014. P values are only an index to evidence: 20th-vs. 21st-century statistical science. *Ecology*. Vol 95, pgs. 627-630.
- 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.
- Bryk, A. S. and Raudenbush, S. W. 1992. Hierarchical Linear Models. Newbury Park, CA: SAGE Publication.
- Capurro, J., Dickie, M. J., Ninfi, D., Zazzarini, A., Tosi, E., González, M. C., & EEA, I. 2012. Vicia y avena como cultivos de cobertura en maíz. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, Vol6, pgs. 20-22.
- Carlone, M. R., & Russell, W. A. 1987. Response to Plant Densities and Nitrogen Levels for Four Maize Cultivars from Different Eras of Breeding 1. *Crop Science*, Vol 27, pgs. 465-470.
- Castillo C., Espósito G. y Balboa R., 2006. Fertilización del Maíz en el Sur de Córdoba. Interacción entre Nitrógeno y Azufre. XX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo y I Reunión de suelos de la Región Andina. Salta y Jujuy. Argentina.
- 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.
- Cerliani C., Naville R., Balboa G., Ruiz A., Bologna G. M., Bossio N., Espósito G., 2017. Importancia de la interacción nitrógeno:densidad en la dosificación de N. Simposio de fertilidad 2017. Argentina.

- Cirilo, A.G., Andrade, F.H., 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science* Vol 34, pgs.1044-1046.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2010. InfoStat versión 2010. InfoStat Group, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Díaz Valdez, S., García, F., Caviglia, O., 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, Vol 13, pgs. 18-20.
- Duncan, E. R. 1954. Influences of Varying Plant Population, Soil Fertility and Hybrid on Corn Yields 1. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 18, pgs. 437-440.
- Echeverría, H. E., & Sainz Rozas, H. R., 2014. Nitrógeno. Eds.: Echeverría, H. E., García, F.O. Editorial INTA, Capitulo 7, pgs. 218.
- Espósito, G., Balboa G., Cerliani C. y Balboa R., 2013. Mejores prácticas de manejo para la nutrición de suelos y cultivos. En: *Primeras Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y Segundas Jornadas Provinciales de Agricultura Sustentable*. Eds: Barbosa, Osvaldo Andrés; Colazo, Juan Cruz. Argentina. Editorial: AACCS, pgs.49-69.
- Ferraris, G. 2014. Elección de ambientes, rendimiento y fertilización de maíz según fecha de siembra. Disponible on-line en: <http://inta.gob.ar/documentos/eleccion-de-ambientes-rendimiento-y-fertilizacion-de-maiz-segun-fecha-de-siembra>.
- Ferraris, G. Couretot, L., 2013. Fertilización Nitrogenada de maíz bajo tres escenarios productivos. Eficiencia, efecto de fuente y uso de inhibidores en maíz. Resultados de experiencias. pgs. 145-151.
- Ferraris, G., Couretot, L. 2013. Fuentes y dosis de fertilizantes nitrogenados en sistemas de producción de maíz tradicional y tardío. INTA EEA Pergamino. Informe técnico. pgs. 9-15.
- Ferraris, G., Couretot, L., Toribio M. 2010. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz en Pergamino (Bs As). Efectos de

- fuente, dosis y uso de inhibidores. Mesa de Fertilidad y Nutrición de Cultivo. IX Congreso Nacional de Maíz. 1º Simposio Nacional de Sorgo, pgs 4.
- Ferreyra, J.M., 2015. Efectos del mejoramiento del maíz (1965-2010) sobre la eficiencia en el uso del N. Tesis MSc. UNMP.
- Fischer, T., Byerlee, D., Edmeades G., 2014. Crop yields and food security: will yield increases continue to feed the world? In Proc. 12th Australian Agronomy Conference, Armidale, NSW. Disponible en http://www.regional.org.au/au/asa/2012/agriculture/7936_fischerra.htm.
- Gambín, 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.
- Gelman, A., Hill, J., 2007. *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- González Montaner, J., Maddonni, G.A., Di Napoli, M.R., 1997. Modeling grain yield and grain yield response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean Southern Pampa. *Field Crops Research* Vol 51, pgs 241-252.
- Haynes, R. J., 1986. Origin, distribution and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems. In 'Mineral nitrogen in the plant-soil system', Ed.: RJ Haynes, pgs. 1-51.
- Keeney, D. R., Nelson, D. W., 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page. A. L. et al. Edición: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. Pgs. 643-698.
- Kleinbaum, D.G. y Kupper, L.L., 1997. *Applied regression analysis and other multivariable methods*. Duxbury Press, pgs. 565.
- Maddonni, G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina-a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology* Vol 107, pgs.325-345.
- Maddonni, G.A., Ruiz, R.A., Villariño, P., Garcia de Salomon, I., 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*, Eds.: Satorre et al., Editorial FAUBA, Capítulo 19, p. 783.
- Madias, A., Alzueta, I., Agosti, B., 2016. Intensificación agrícola: Vicia como cultivo de cobertura. *Cultivos de invierno*. En revista *Red de innovadores de Aapresid*. Vol *Cultivos de invierno*, pgs. 93-98

- Makowski, D., Wallach, D., Meynard, J., 2001. Statistical methods for predicting responses to applied nitrogen and calculating optimal nitrogen rates. *Agronomy Journal*. Vol 93, pgs.531-539.
- Makowski, D., Wallach, D., 2001. How to improve model-based decision rules for nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*. Vol 15, pgs.197-208.
- Mercau, J. L., & Otegui, M. E. 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double cropped wheat–maize in the rainfed Pampas region of Argentina. *Practical Applications of Agricultural System Models to Optimize the Use of Limited Water*, pgs.351-374.
- Merlo, J., Yang, M., Chaix, B., Lynch, J., Råstam, L., 2005. A brief conceptual tutorial on multilevel analysis in social epidemiology: investigating contextual phenomena in different groups of people. *Journal of Epidemiology and Community Health*. Vol 59, pgs.729-736.
- Monbiela, F., Nicholaides, J. J., & Nelson, L. A. 1981. A Method to Determine the Appropriate Mathematical Form for Incorporating Soil Test Levels in Fertilizer Response Models for Recommendation Purposes 1. *Agronomy Journal*, Vol 73, pgs.937-941.
- Nakagawa, S., Schielzeth, H., 2013. A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution* Vol 4, pgs.133-142.
- Neter, J., Wasserman, W. y Kutner, M.H. 1990. *Applied linear statistical models*. Irwin Inc, Illinois, pgs. 515.
- Otegui, M.E., Mercau, J., Menéndez, F. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En: *Guía Dekalb del cultivo de maíz*, Edición.: Satorre, Dekalb, pg.293.
- 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.
- Picone, L. I., Videla, C. C., García, F. O., 1997. Desnitrificación durante el cultivo de trigo en un argiudol típico bajo siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del suelo (Argentina)*. Asociación Argentina de la ciencia del suelo Vol 15, pgs.53-58.

- Qian, S.S., Cuffney, T.F., Alameddine, I., Mc Mahon, G., Reckhow, K.H., 2010. On the application of multilevel modeling in environmental and ecological studies. *Ecology* Vol 91, pgs.355-361.
- R Core Team 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rillo, S., Álvarez, C., Bagnato, R., & Noellemeyer, E. 2013. Cultivos de cobertura: gramíneas y leguminosas en el centro oeste de la provincia de Buenos Aires. *Cultivos de cobertura*, p. 58.
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University, Special Report 48.
- Rozas, H. R. S., Echeverría, H. E., Picone, L. I. 2001. Denitrification in maize under no-tillage. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 65, pgs. 1314-1323.
- Sain, G.E., Jauregui, M.A., 1993. Deriving fertilizer recommendations with a flexible functional form. *Agronomy journal* Vol 85, pgs.934-937.
- Salvagiotti F., Enrico J. M., Barraco M., Prieto G., Agosti M. B., 2016 Componentes de la eficiencia de N en maíz de siembra tardía con diferentes antecesores. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rio Cuarto. Argentina.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J. M., Ferraguti, F. J., Pedrol, H. M., 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.
- Salvagiotti, F., Ferraguti, F., Enrico, J., Prieto, G., 2014. Fertilización nitrogenada en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. Informe de actualización técnica. EEA Marcos Juárez, Vol. 31.
- Salvagiotti, F., Pedrol, H., Castellarin, J., Capurro, J., Felizia, J. C., Gargicevich, A., Trentino, N., 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. 1. Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para Mejorar la Producción Vol 20, pgs.67-70.
- Satorre E., 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura actual. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. Bs As. JICA-INTA.
- Saxton, K. E., Rawls, W., Romberger, J. S., Papendick, R. I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, pgs. 1031-1036.

- Steinbach, H.S., 2013. Funciones de producción. En: Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Ed.: Álvarez et al., editorial FAUBA, Capítulo 2, pgs. 33-44.
- Stevenson, F. J., & Cole, M. A., 1999. In: Cycle of Soil Carbon, Nitrogen Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. The Nitrogen cycle in soil. Global and ecological aspects. pgs. 139-190.
- Valdez, S. D., García, F., & Caviglia, O., 2014. Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. Informaciones agronómicas. IAH 13. Pgs. 18-20
- Wallach, D., 1995. Regional optimization of fertilization using a hierarchical linear model. Biometrics, pgs.338-346.
- 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. Vol 37 pgs. 29-37.
- 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.

ANEXO

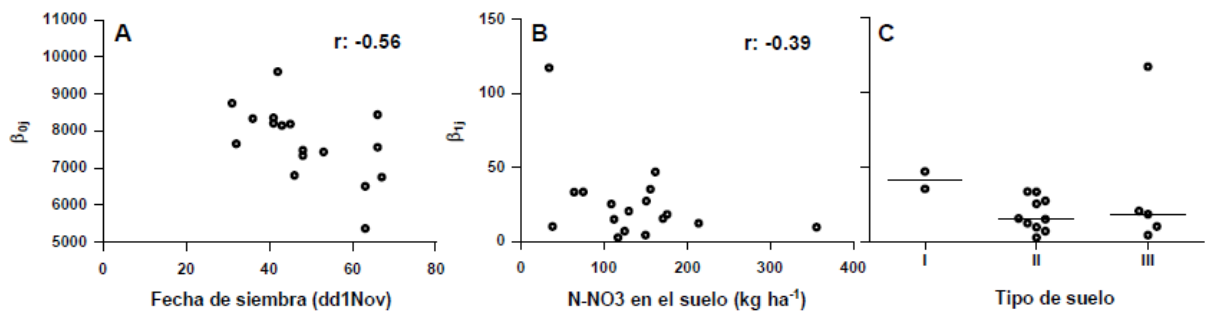


Figura suplementaria 1: Correlaciones entre: (A) el parámetro β_{0j} y fecha de siembra (dd1Nov: días desde el 1 de noviembre). (B) β_{1j} y N del suelo a la siembra (kg ha⁻¹) y (C) β_{1j} y tipo de suelo. β_{0j} representa la variación del intercepto a través de los sitios y β_{1j} representa el componente lineal de la función cuadrática de respuesta del rendimiento al N aplicado en cada sitio. Las líneas horizontales en la figura correspondiente al tipo de suelo representan la mediana.

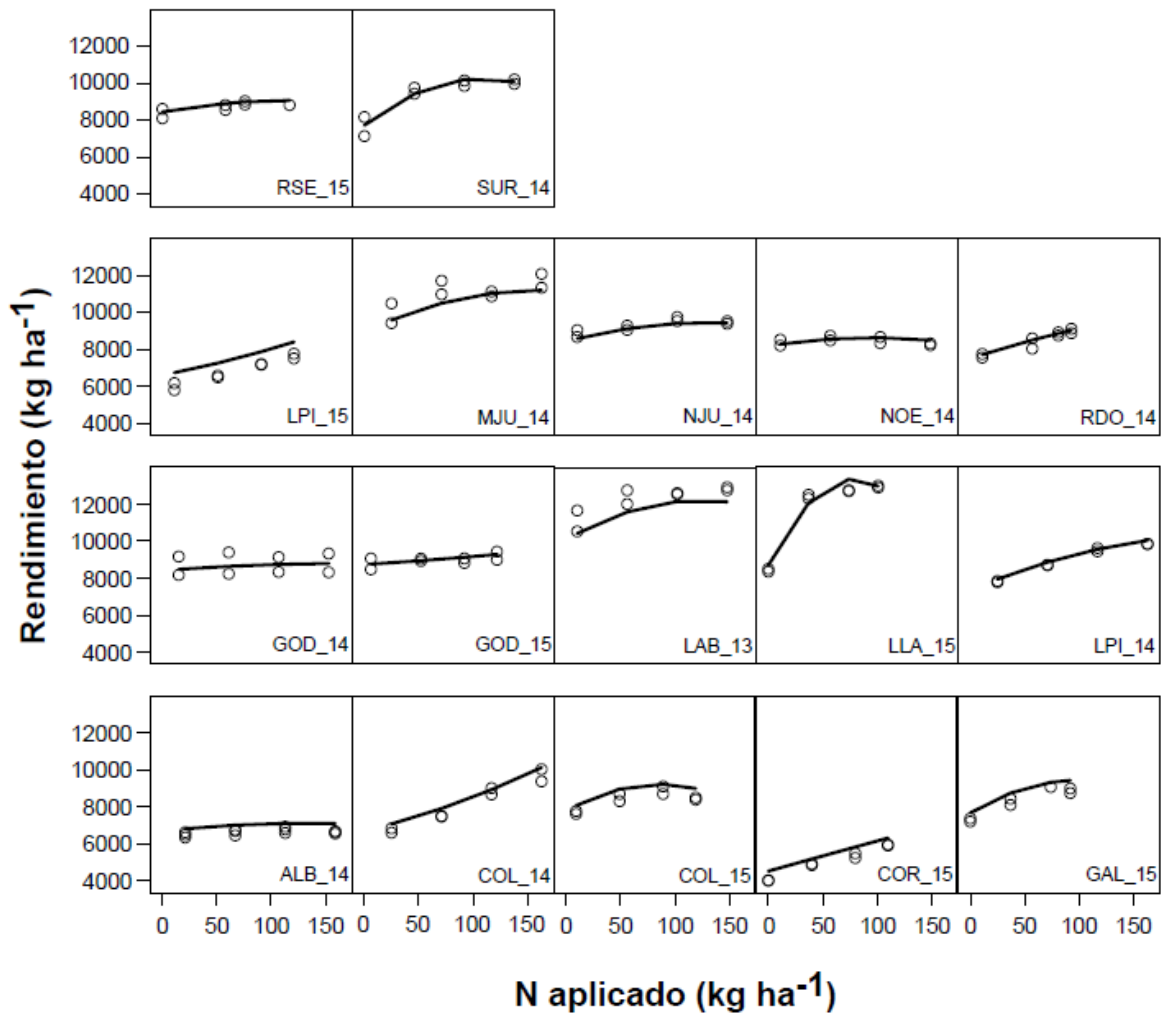


Figura suplementaria 2: Respuesta del rendimiento al N aplicado para cada sitio. La línea representa el modelo final.