

## CALIBRACIÓN DE UMBRALES CRÍTICOS DE NITRÓGENO DISPONIBLE EN EL SUELO PARA MAÍZ TARDÍO EN ENTRE RÍOS

SANTIAGO T. DIAZ VALDEZ<sup>1\*</sup>; FERNANDO O. GARCIA<sup>2</sup>; OCTAVIO P. CAVIGLIA<sup>3-4</sup>

Recibido: 03/10/2019

Recibido con revisiones: 19/11/2019

Aceptado: 20/11/2019

### RESUMEN

Con el fin de estabilizar los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.), evitando la coincidencia de la floración con momentos de mayor déficit hídrico típicos de las siembras tempranas, la superficie de maíz tardío (MT) en Entre Ríos se ha incrementado notoriamente desde 2010. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una metodología de diagnóstico para recomendar la fertilización nitrogenada en MT en Entre Ríos, a partir del nitrógeno (N) disponible en el suelo + fertilizante (Nd). El trabajo se realizó sobre doce experimentos de fertilización nitrogenada en MT, conducidos durante dos campañas. Cuando se consideraron todos los experimentos, no hubo asociación entre el Nd y el rendimiento, producto de la variabilidad encontrada en la respuesta a N entre localidades. Debido a dicha variabilidad, se trabajó con el conjunto de las localidades utilizando el rendimiento relativo (RR). Los modelos lograron un mejor ajuste realizando el muestreo de suelo en presiembra (PS) que en V6. En PS, el ajuste no varió por modificar la profundidad de muestreo (0-20, 0-40 o 0-60 cm). El modelo que utilizó el RR mejoró el ajuste con respecto al modelo que utilizó el rendimiento y permitió obtener un único umbral de 165 kg Nd ha<sup>-1</sup> a 0-60cm. Sin embargo, la utilización de un solo modelo puede llevar a recomendaciones incorrectas al no considerar distintos niveles de rendimiento. En efecto, los modelos que tuvieron en cuenta el ambiente, *i.e.* el rango de rendimientos obtenidos, difirieron en el umbral obtenido. Se definieron ambientes de menos de 6000 kg ha<sup>-1</sup>, 6000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> y más de 9000 kg ha<sup>-1</sup>, para los cuales los umbrales de Nd (0-20 cm) fueron de 93; 102 y 108 kg N ha<sup>-1</sup> y la eficiencia de uso del Nd fue de 13; 21 y 26 kg grano kg N<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Palabras clave:** Fertilización Nitrogenada, Análisis de suelo, Diagnóstico

## CALIBRATION OF CRITICAL THRESHOLDS OF SOIL AVAILABLE NITROGEN FOR LATE-SOWN MAIZE IN ENTRE RIOS PROVINCE, ARGENTINA

### ABSTRACT

Since 2010, late-sown maize (MT) area in Entre Rios Province, Argentina has noticeably increased, in order to stabilize grain yields avoiding the coincidence of flowering with water deficit periods, which are typical in early sowings. We aimed to develop a methodology to recommend N fertilization in MT for the Entre Ríos Province, considering available N (soil N + fertilizer) ( $N_{av}$ ). Twelve experiments of N fertilization were carried-out during two growing seasons. Owing wide yield variability among locations, no association between yield and  $N_{av}$  was detected, when all the locations were pooled. To deal with this variability, models considering Relative Yield (RR) can be alternatively used. Models considering soil sampling at pre-sowing (PS) have a better fit than those with soil sampling at V6. In PS, the fit of the model did not change across soil depth sampling (0-20, 0-40 or 0-60 cm). Using RR, fit of the model was improved and it allowed obtain a unique threshold of  $N_{av}$  (0-60 cm) of 165 kg  $N_{av}$  ha<sup>-1</sup>. However, since there are no single thresholds for all the environments, models considering yield-environment level could be more adequate. We defined yield-environments of: less than 6000 kg ha<sup>-1</sup>, 6000 to 9000 kg ha<sup>-1</sup> and more than 9000 kg ha<sup>-1</sup>, with  $N_{av}$  (0-20 cm) thresholds of 93; 102 y 108 kg N ha<sup>-1</sup> and N use efficiency of 13; 21 y 26 kg grain kg  $N_{av}$ <sup>-1</sup>, respectively.

**Key words:** Nitrogen Fertilization, Soil test, Diagnosis.

1 Bayer. Argentina.

2 Consultor Privado y Facultad de Ciencias Agrarias, Balcarce. Universidad Nacional de Mar del Plata. Argentina.

3 Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos. Argentina.

4 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET. Argentina.

\* Autor de contacto: santiago.diazvaldez@bayer.com

## INTRODUCCIÓN

En los sistemas agrícolas, la variabilidad meteorológica es una fuente de incertidumbre y riesgo (Bert *et al.*, 2006). En maíz, el ajuste de la fecha de siembra es una práctica de manejo utilizada para sincronizar la ocurrencia de la floración, etapa considerada crítica en la determinación del rendimiento, con las condiciones ambientales (Bonelli *et al.*, 2016). En Entre Ríos, la ventana tradicional de siembra de maíz comienza a fines de agosto y se extiende hasta la primera quincena de octubre (Maltese *et al.*, 2019). Una alternativa, cada vez más difundida, para evitar la coincidencia de la floración del maíz con la sequía estacional del verano, es retrasar la siembra hacia el final de la estación primaveral o principios del verano, de esta manera, la floración femenina ocurre a partir de mediados del verano y el período de llenado de los granos se corre a finales del verano y principios de otoño (Maddonni, 2012). Esto ocurre en maíces sembrados en fecha tardías, cuya principal ventaja es el aumento de los rendimientos mínimos, otorgándole mayor estabilidad a la productividad del cultivo (Mercau & Otegui, 2014; Bonelli *et al.*, 2016; Gambin *et al.*, 2016).

En Entre Ríos, en los últimos años se incrementó la superficie de maíz tardío (MT), cuyo ciclo transcurre en una época de mayores temperaturas y mayor disponibilidad de precipitaciones que el de maíz temprano, por lo que la dinámica del N se ve afectada por una mayor mineralización del N de la materia orgánica durante el período presiembra (Salvagiotti *et al.*, 2014). Por lo tanto, es necesario generar nuevos modelos que permitan predecir la respuesta a la fertilización en situaciones de siembra tardía.

El análisis de suelo es una práctica recomendable para el diagnóstico de la fertilización nitrogenada (García & Salvagiotti, 2009). En los últimos años numerosos investigadores de diferentes áreas de la región pampeana han trabajado para desarrollar herramientas de diagnóstico que permitan predecir la respuesta a la fertilización. Para maíz, se han calibrado, umbrales críticos de N disponible (Nd, N-nitrato suelo + N fertilizante), constituyéndose en el método más difundido para determinar la necesidad de N (Pagani

*et al.*, 2008; Salvagiotti *et al.*, 2011; Correndo & García, 2014). Para que el Nd en el suelo tenga un valor diagnóstico, este tiene que estar asociado al rendimiento del cultivo (Gutiérrez Boem *et al.*, 2013). Cuando los valores de Nd encontrados son superiores a los de un umbral crítico (C), la probabilidad de respuesta a la fertilización es nula o inconsistente (García & Salvagiotti, 2009). Estos umbrales varían según la zona y el nivel de rendimiento objetivo (Correndo & García, 2014). La decisión acerca del manejo de la fertilización debe tomarse a partir de metodologías de diagnóstico locales y actualizadas, esto implica conocer la capacidad del suelo de proveer esos nutrientes (Barbagelata *et al.*, 2014). Los ensayos deben involucrar prácticas de manejo representativas de las condiciones en las cuales el modelo va a ser utilizado y ser repetidos para contemplar la variabilidad temporal (Steinbach, 2007), de manera que sus resultados sean transferibles a los productores (Álvarez, 2007). Este es un punto clave, ya que la selección de la dosis de fertilizante es una variable que afecta la rentabilidad del maíz y está muy relacionada con el impacto ambiental de la práctica (Cerrato & Blackmer, 1990).

El objetivo de este trabajo fue calibrar umbrales críticos de Nd (N-nitrato suelo + N fertilizante) para maíces de siembra tardía en Entre Ríos según momento y profundidad de muestreo y ambiente productivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción de los experimentos y manejo

Durante las campañas agrícolas 2011-2012 y 2012-2013, se realizaron cuatro experimentos en microparcels (MP) y ocho experimentos en franja (Fr) en lotes de producción de maíz en siembra directa en diferentes departamentos de la provincia de Entre Ríos, con diferentes historias de manejo previo.

Los experimentos de MP, se condujeron en Paraná y Gualeguay (campaña 2011-2012) y Victoria y Gualeguaychú (campaña 2012-2013) sobre suelos Argiudoles acucos. Todos los ensayos fueron sembrados entre el 27 de diciembre y el 5 de enero. La fertilización fosforada se realizó a la

siembra en todos los casos, en Paraná y Gualeguay con fosfato monoamónico (grado equivalente 11-52 (23)-0) con dosis de fertilizante de 109 kg ha<sup>-1</sup> y 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En Victoria y Gualeguaychú se fertilizó con 152 y 156 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato triple (grado equivalente 0-46 (20)-0). La fuente de N fue UAN en ambos años (grado equivalente 32-0-0), que fue aplicado en post-emergencia del maíz (V6) con mochila experimental de CO<sub>2</sub>, con una barra de cuatro picos. En todos los experimentos el híbrido utilizado fue DK72-10MGRR2. Las unidades experimentales fueron de 6 u 8 hileras de ancho por 10 metros de largo, las hileras laterales cumplen la función de zona buffer entre tratamientos y la cosecha se realizó sobre las 2 hileras centrales. En la campaña 2012-2013 se utilizaron insecticidas para el control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), no siendo necesario el tratamiento en la campaña 2011-2012. El control de malezas se realizó químicamente, se partió con barbechos limpios, se aplicó atrazina + acetoclor + glifosato a la siembra y se repitió una aplicación de glifosato en V5-V6.

Los experimentos en Fr de la campaña 2011-2012 fueron sembrados durante la segunda quincena del mes de diciembre en los departamentos de Paraná, Victoria, Gualeguay y Gualeguaychú, cercanos a los centros urbanos/rurales de Cerrieto, Rincón de Nogoyá, Gualeguay y Pehuajó Sud, con estos nombres se identifican los ensayos en Fr de la campaña 2011-2012. En la campaña 2012-2013, la siembra se realizó a partir del 10 de diciembre y se extendió hasta los primeros días de enero. Los ensayos fueron sembrados en Gualeguay y Gualeguaychú, en este último departamento se realizaron ensayos en 3 sitios diferentes que se denominan Larroque I, Larroque II y Gualeguaychú, y el ensayo de Gualeguay se sembró en General Galarza, con estos nombres se identifican los ensayos en Fr de esta segunda campaña. Cada franja tuvo 8 hileras a 52 cm. Los sitios experimentales se implantaron sobre Argiudoles acuicos excepto en el caso de Gualeguaychú que corresponde a un Argiudol vértico. Los ensayos en franja fueron conducidos con tecnología del productor. En todos los casos, el cultivo antecesor fue soja en lotes manejados

bajo siembra directa y el híbrido utilizado DK72-10MGRR2. La disponibilidad de fósforo no fue limitante, ya que se fertilizó con este nutriente para llevar el suelo a niveles no limitantes, utilizándose distintos fertilizantes como arrancadores (23 a 32 kg P ha<sup>-1</sup>). Cuando el fertilizante fosfatado contenía N, este fue considerado para el cálculo del N disponible, agregándolo al N del suelo. En las aplicaciones de N entre V5 y V7, la fuente de N en todos los casos fue UAN (grado 32-0-0), a excepción de los ensayos de Gualeguay y Paraná (campaña 2011-2012), que se aplicó urea (grado 46-0-0) incorporada al suelo, al momento de la siembra. En todos los ensayos se realizó un correcto control de malezas e insectos.

### Diseño experimental y tratamientos

Los ensayos de MP fueron conducidos con un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con cuatro repeticiones. Las dosis de N aplicadas fueron de 0, 25, 50, 100 y 150 kg de N ha<sup>-1</sup>, en el caso de Paraná y Gualeguay; y 0, 25, 50, 75 y 150 kg de N ha<sup>-1</sup> en el caso de Victoria y Gualeguaychú. De acá en adelante se denominará a los tratamientos 0N, 25N, 50N, 75N, 100N y 150N.

En los ensayos en franja, se utilizaron dosis de 0, 25, 50, 75 y 100 kg de N ha<sup>-1</sup> dispuestos en un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA), donde cada localidad se consideró un bloque. De acá en adelante se denominará a los tratamientos 0N, 25N, 50N, 75N y 100N. En el ensayo de Gualeguay sembrado en la campaña 2011-2012, no fue posible regular las dosis de N según la descripción de los tratamientos recientemente enumerados, por lo cual los datos de esta localidad se utilizarán directamente para la calibración del umbral crítico considerando la dosis real de N aplicado con el fertilizante. Las dosis aplicadas en este ensayo fueron 0, 28, 41, 61 y 112 kg N ha<sup>-1</sup>.

### Muestreo y análisis de suelo

Los muestreos se realizaron en presiembrado (PS), 6 hojas expandidas (V6) y emergencia de estigmas (R1) según la escala de Ritchie y Hanway (1982). En PS se determinó, materia

orgánica (Walkley & Black, 1934), pH (1:2,5 suelo: agua) (Peech, 1965), P extractable (Bray I), S-sulfato (Bardsley & Lancaster, 1965) y N anaeróbico (Waring & Bremmer, 1964) a la profundidad de 0-20 cm y N-nitrato (Bremmer, 1965) y textura del suelo a 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm. En V6, se determinó N-nitrato a 0-20 cm y 20-40 cm. Considerando la profundidad del estrato, la densidad aparente y la concentración de N-nitrato, se calculó el N disponible en el suelo (N suelo,  $\text{kg N ha}^{-1}$ ). En todos los casos se realizaron tres repeticiones por localidad. En los muestreos a 0-20 cm, la muestra se compuso de 30 sub-muestras, en los muestreos a 20-40 y 40-60 cm la muestra se compuso de 10 sub-muestras. A partir de los datos de humedad obtenidos por el método gravimétrico y la densidad aparente se calculó el agua útil en PS y en R1, hasta la profundidad de 1.20 m, siguiendo la metodología de Gil (2005). Los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitez permanente se estimaron a través de funciones de pedotransferencia a partir de la textura y la materia orgánica (Saxton & Rawls, 2006).

### Calibración del umbral crítico

La calibración del umbral crítico se realizó combinando la información proveniente de los ensayos de MP y Fr. El umbral crítico de N se determinó ajustando la relación entre el rendimiento y/o el rendimiento relativo (RR) del cultivo con el N disponible (Nd). El Nd fue calculado a través de la sumatoria del N proveniente del suelo y del fertilizante, *i.e.*  $\text{kg de N suelo ha}^{-1} + \text{kg de N fert ha}^{-1}$ . El rendimiento relativo se calculó sobre el tratamiento de mayor rendimiento en cada sitio, según la fórmula de Gutiérrez Boem *et al.* (2013):

$$\text{RR (\%)} = (\text{rendimiento del tratamiento } i / \text{rendimiento más alto del sitio}) \times 100 \text{ (ec. 1)}$$

Las funciones que relacionan rendimiento o rendimiento relativo y disponibilidad de nutriente (Nd) se ajustaron por el método de mínimos cuadrados (Álvarez, 2007). Se evaluaron funciones de tipo lineal-plateau y cuadrática-plateau.

La función lineal-plateau se define como:

$$Y = a + b x \quad x < C \text{ (ec. 2)}$$

$$Y = P \quad x \geq C \text{ (ec. 3)}$$

donde  $Y$  representa al rendimiento o rendimiento relativo,  $a$  la ordenada al origen,  $b$  la eficiencia en el uso del Nd (la respuesta del rendimiento o rendimiento relativo a la disponibilidad de N),  $x$  los valores de Nd,  $C$  el umbral crítico de Nd, el valor umbral ocurre en el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o rendimiento relativo a incrementos de Nd y  $P$  (plateau) representa todos los valores de Nd ( $x$ ) en los cuales  $Y$  se torna constante.

La función cuadrática-plateau se define como:

$$Y = a + b x + c x^2 \quad x < C \text{ (ec. 4)}$$

$$Y = P \quad x \geq C \text{ (ec. 5)}$$

donde  $Y$  representa al rendimiento o rendimiento relativo,  $a$  la ordenada al origen,  $b$  la eficiencia en el uso del Nd (respuesta del rendimiento o rendimiento relativo a la disponibilidad de N),  $c$  el coeficiente cuadrático,  $x$  los valores de Nd,  $C$  el umbral crítico de Nd, el valor umbral ocurre en el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o rendimiento relativo a incrementos de Nd y  $P$  (plateau) representa todos los valores de Nd ( $x$ ) en los cuales  $Y$  se torna constante.

Las ecuaciones 2 y 4 se utilizan cuando el Nd ( $x$ ) fue menor al umbral crítico ( $C$ ), situación donde es esperable un aumento de rendimiento con el incremento de la disponibilidad de N. Las ecuaciones 3 y 5 representan las situaciones donde Nd ( $x$ ) es mayor o igual al umbral crítico ( $C$ ), en estas situaciones, no son esperables variaciones en el rendimiento del cultivo debidas al agregado de N. En todos los casos, los ajustes de estas ecuaciones se realizaron con el software GraphPad Prism V6.07 (GraphPad Software INC).

## RESULTADOS

### Caracterización de los sitios

En la **Tabla 1** se presentan las variables de fertilidad química, agua disponible en los primeros 120 cm de profundidad en PS y R1 y las precipitaciones ocurridas entre la siembra y madurez fisiológica (MF) y durante el período crítico para la determinación del rendimiento (R1  $\pm$  15 días) para cada sitio. Los contenidos de N, considerando diferentes profundidades de muestreo,

**Tabla 1.** Nitrógeno disponible (Nd) en presiembra (PS) y en V6 según diferentes profundidades de muestreo. N anaeróbico, P-Bray I, S-SO<sub>4</sub>, Materia Orgánica, pH, Arcilla (<2 μ) en presiembra (PS). Agua disponible en el suelo en presiembra (PS) y emergencia de estigmas (R1) y precipitaciones (Pp) para los períodos siembra-madurez fisiológica (S-MF) y durante el período crítico (R1 ± 15 días) para los distintos experimentos de microparcelas (MP) y franjas (Fr).

**Table 1.** Available Nitrogen (Nd) in pre-planting (PS) and V6 according to different sample depth. Anaerobic Nitrogen, P-Bray I, S-SO<sub>4</sub>, Organic Matter, pH, Clay (<2 μ) in pre-sowing (PS). Available soil water in pre-sowing (PS) and silking (R1) and rainfall (Pp) for the periods: sowing-physiological maturity (S-MF) and around critic period (R1 ± 15 days) fir the different small plots (MP) and strip test (Fr) experiments.

Variable	Profundidad	Unidad	Paraná	Gualeguay	Victoria	Gualeguaychú	Gualeguay	Pehuajó Sud	Cerrito	Rincón de Nogoyá	G. Galarza	Gualeguaychú	Larroque	Larroque II
	(cm)		2011-12 (MP)	2011-12 (MP)	2012-13 (MP)	2012-13 (MP)	2011-12 (Fr)	2011-12 (Fr)	2011-12 (Fr)	2011-12 (Fr)	2012-13 (Fr)	2012-13 (Fr)	2012-13 (Fr)	2012-13 (Fr)
Nd (PS)	0-20	(kg N ha <sup>-1</sup> )	45	35	46	29	43	39	43	38	56	48	29	57
Nd (PS)	20-40	(kg N ha <sup>-1</sup> )	24	22	33	21	24	22	23	22	36	34	21	42
Nd (PS)	40-60	(kg N ha <sup>-1</sup> )	11	13	14	16	12	12	10	12	27	25	16	35
Nd (PS)	0-60	(kg N ha <sup>-1</sup> )	80	70	93	66	79	73	76	72	119	107	66	134
Nd (V6)	0-20	(kg N ha <sup>-1</sup> )	43	53	66	58	56	39	38	51	69	58	58	61
Nd (V6)	20-40	(kg N ha <sup>-1</sup> )	29	28	32	26	34	26	25	32	20	24	26	23
Nd (V6)	0-40	(kg N ha <sup>-1</sup> )	72	81	98	84	90	65	63	83	89	83	84	84
N anaeróbico (PS)	0-20	(kg N ha <sup>-1</sup> )	60	54	70	67	54	42	50	52	63	80	67	64
P- Bray I (PS)	0-20	(ppm)	10,6	8,4	11,3	11,1	8,6	8,7	10,7	9,5	8,5	4,2	11,1	6,9
S-SO <sub>4</sub>	0-20	(ppm)	9,1	9,6	14,0	13,9	10,2	11,0	9,8	11,4	14,2	15,6	13,9	14,3
Materi orgánica (PS)	0-20	(%)	3,7	3,3	3,0	3,7	3,3	3,3	3,4	3,2	3,2	4,7	3,7	3,1
pH (agua 1:2,5) (PS)	0-20		6,1	6,1	5,4	6,1	6,1	5,9	6,1	6,0	5,6	6,5	6,1	6,2
Arcilla (PS)	0-20	(%)	27	20	20	33	20,5	21	27	24	22,5	34	29	27
Arcilla (PS)	20-40	(%)	32,5	21,5	26	33	22	23	39,5	28,5	34	43	31	32,5
Arcilla (PS)	40-60	(%)	33,5	24	33	46	26	34	32	37	40	49	42	41,5
Agua disp. (PS)	0-120	(mm)	124	107	120	125	138	186	118	141	103	122	102	125
Agua disp. (R1)	0-120	(mm)	160	177	132	64	208	239	163	158	102	122	82	64
Pp (S-MF)		(mm)	695	539	300	453	539	788	532	780	407	450	543	453
Pp (R1 ± 15 días)		(mm)	249	255	101	75	255	191	236	306	177	116	50	75

son representativos de lo observado en la región en siembras tardías. Las demás variables relacionadas a la fertilidad química, muestran valores usualmente encontrados en la región. En el caso del P, en todas las situaciones se observaron niveles por debajo de los valores considerados críticos. La campaña 2011-2012 puede caracterizarse como húmeda con rango de precipitaciones de siembra a madurez fisiológica de 539 a 788 mm, mientras que la campaña 2012-2013 como una campaña seca, con rango de precipitaciones de siembra a madurez fisiológica de 300 a 543 mm, si se la compara con el promedio histórico de la región (Maltese *et al.*, 2019). En el periodo crítico, también se registraron mayores precipitaciones durante la campaña 2011-2012 que en la campaña 2012-2013. La variabilidad en el agua disponible entre localidades fue mayor en R1 (64-239 mm) que en PS (102-186 mm). En PS no hubo grandes diferencias entre campañas, en cambio en R1, la diferencia fue muy marcada entre campañas. En efecto, la lámina varió entre 158 y 239 mm en la campaña 2011-2012 y entre 64 y 132 mm en la campaña 2012-2013.

## Rendimiento

Considerando todos los sitios, la fertilización nitrogenada incrementó significativamente el rendimiento del cultivo (**Tabla 2**). En los ensayos de MP de la campaña 2011-2012, todos los tratamientos que recibieron N presentaron mayores rendimientos que el testigo ( $P < 0,01$ ). Las diferencias porcentuales respecto al trata-

miento sin fertilizar fueron de 13, 20, 23 y 25% para las dosis de 25, 50, 100 y 150 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. La diferencia entre el máximo rendimiento y el testigo sin el agregado de N fue de 2193 kg ha<sup>-1</sup>. En los ensayos de MP de la campaña 2012-2013, también se registraron aumentos en el rendimiento por el agregado de N en comparación con el testigo ( $P < 0,01$ ); en este caso las diferencias porcentuales para N25, N50, N75 y N150 respecto al N0, fueron de 7, 10, 16 y 20%, respectivamente. La diferencia absoluta entre el máximo rendimiento y el testigo fue de 1219 kg ha<sup>-1</sup>. En los ensayos en franja, considerando ambas campañas, también se encontró un aumento significativo del rendimiento ( $P < 0,01$ ) por el agregado de N. La diferencia entre N100 y N0 fue de 877 kg ha<sup>-1</sup> (11%). La diferencia de N25, N50 y N75 respecto a N0 fueron 7, 10 y 11%, respectivamente.

## Calibración del umbral crítico

La calibración de umbrales críticos se realizó en primer lugar a partir de la relación entre el rendimiento y el Nd en los primeros 60 cm de suelo según el muestreo de PS para el conjunto de los experimentos, por ser este el momento y la profundidad de muestreo más comúnmente utilizados. No hubo asociación significativa entre el rendimiento y el Nd (suelo + fertilizante) en PS ( $P > 0,1$ , para la función lineal-plateau) (**Figura 1**), por lo que se calcularon los parámetros para una función lineal-plateau en cada experimento (**Tabla 3**).

**Tabla 2.** Rendimiento promedio (kg ha<sup>-1</sup>; 14.5%) de los diferentes experimentos en microparcels (MP) y franjas (Fr) en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicada.

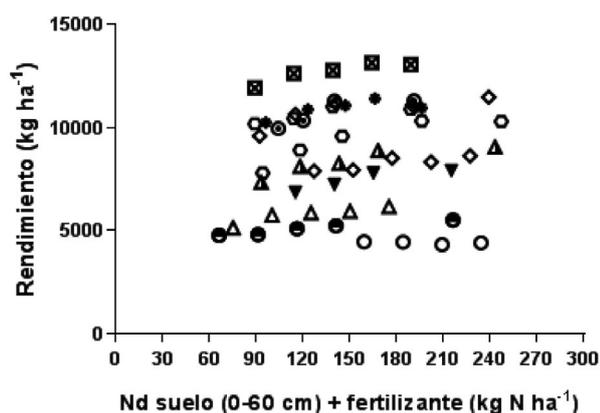
**Table 2.** Average yield (kg ha<sup>-1</sup>; 14.5%) of the different small plot (MP) and strip test (Fr) trials in response to different N rates.

Dosis de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento		
	Campaña 2011-12 (MP) Promedio	Campaña 2012-13 (MP) Promedio	Campañas 2011-12 y 2012-13 (Fr) Promedio
0	8681 C	6053 D	7970 C
25	9763 B	6458 CD	8517 B
50	10381 AB	6671 BC	8768 A
75	Sin Datos	7046 AB	8835 A
100	10692 A	Sin Datos	8847 A
150	10874 A	7272 A	Sin Datos

**Tabla 3.** Parámetros de funciones lineal-plateau que relacionan el rendimiento de cada uno de los diferentes experimentos con el Nitrógeno disponible (Nd, suelo a 0-60 cm + fertilizante) en el muestreo realizado en presiembra (PS), (a) representa la ordenada de origen (kg ha<sup>-1</sup>), (b) la eficiencia de uso del Nd (kg grano ha<sup>-1</sup> por kg N) y (C) es el umbral crítico (kg N ha<sup>-1</sup>).

**Table 3.** Parameters of linear-plateau functions that relates the grain yield of the different experiments with the available nitrogen (Nd, soil 0-60 cm + fertilizer) in pre-sowing. (a) represents the intercept (kg ha<sup>-1</sup>), (b) the N use efficiency (kg grain ha<sup>-1</sup> per kg N) and (C) is the critical threshold (kg N ha<sup>-1</sup>).

Localidad	Campaña	Tipo de ensayo	a	b	C	R <sup>2</sup>	
Gualeguay	2011/2012	Fr	6019	37,1	142	0,98	
Pehuajó Sud	2011/2012	Fr	8741	15,5	139	0,96	
Cerrito	2011/2012	Fr	8005	23,2	135	0,85	
Rincón de Nogoya	2011/2012	Fr	9428	27,8	127	0,92	
G. Galarza	2012/2013	Fr	6185	12,6	181	0,80	
Gualeguaychú	2012/2013	Fr	4645	18,8	173	0,99	
Larroque	2012/2013	Fr	3289	24,6	109	0,92	
Paraná	2011/2012	MP	5379	45,7	128	0,96	
Gualeguay	2011/2012	MP	4614	34,7	164	0,99	
Victoria	2012/2013	MP	5663	19	178	0,96	
Gualeguaychú	2012/2013	MP	4297	6,6	184	0,97	
Larroque II	2012/2013	Fr	No convergencia				



**Figura 1.** Rendimiento en función del nitrógeno disponible (Nd, suelo a 0-60 cm + fertilizante) en presiembra. Diferentes símbolos indican información proveniente de diferentes experimentos.

**Figure 1.** Grain yield in function of the available nitrogen (Nd, soil 0-60 cm + fertilizer) in pre-sowing. Different symbols indicate information from different experiments.

A excepción de la localidad de Larroque II de la campaña 2012-2013 donde no se registró respuesta a N (**Tabla 3**), todos los demás experimentos mostraron buenos ajustes (R<sup>2</sup> entre 0,80 y 0,99). La eficiencia de uso del Nd (kg grano por kg Nd, parámetro b) varió entre 7 y 46 kg grano kg<sup>-1</sup> N aplicado, siendo la media de 24 kg grano kg<sup>-1</sup> Nd. Los valores del parámetro a (rendimiento sin el agregado de N) para los cuartiles superiores (Q1 y Q3) (4614 y 8005 kg ha<sup>-1</sup>) demuestran que existió una variabilidad importante entre localidades (**Tabla 4**). El umbral crítico (parámetro C) varió entre 109 y 184 kg Nd ha<sup>-1</sup>, siendo la media de 151 kg Nd ha<sup>-1</sup> (**Tabla 4**).

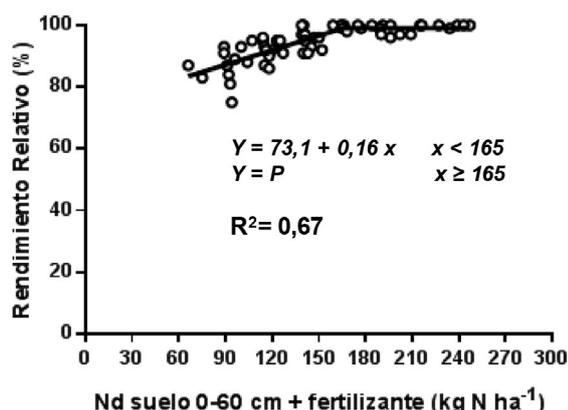
Debido a que todas las localidades, a excepción de Larroque II, mostraron respuesta a aumentos en el Nd, se realizó el análisis de las diferentes localidades en su conjunto considerando

**Tabla 4.** Estadística descriptiva para los parámetros de la función lineal-plateau que relaciona el rendimiento con el Nitrógeno disponible (Nd, suelo a 0-60 cm + fertilizante) en presiembra (PS). D.E Desvío estándar; Mín: Mínimo; Max: Máximo; P (10) Percentil 10; P (90) Percentil 90.

**Table 4.** Descriptive statistics for different parameters of linear-plateau function that relates grain yield with available nitrogen (Nd, soil 0-60 cm + fertilizer) in pre-sowing. D.E Standard Deviation, Min: Minimum; Max: Maximum; P (10) 10 Percentile; P (90) 90 Percentile.

Parámetro	Media	D.E.	Mín.	Máx.	Mediana	Q1	Q3	P (10)	P (90)
a	6024	1945	3289	9428	5663	4614	8005	4297	8741
b	24,2	11,5	6,6	45,7	23,2	15,5	34,7	12,6	37,1
C	151	26	109	184	142	128	178	127	181

el rendimiento relativo en lugar del rendimiento absoluto. Al utilizar un modelo lineal-plateau para explicar la relación entre Nd (suelo a 0-60 cm en PS + fertilizante) y el RR, se mejoró considerablemente el ajuste de la función (**Figura 2**), respecto al ajuste observado sobre el rendimiento absoluto (**Figura 1**), obteniendo un umbral crítico único de 165 kg Nd ha<sup>-1</sup>.



**Figura 2.** Rendimiento relativo en función del nitrógeno disponible (Nd, suelo a 0-60 cm + fertilizante) en presiembr (PS). En la ecuación, Y representa el rendimiento relativo, x los valores de Nd, 165 el umbral crítico de Nd, es el punto a partir del cual no hay respuesta en Y a incrementos de Nd. P (plateau) representa todos los valores de Nd (x) en los cuales Y se torna constante.

**Figure 2.** Relative yield a function of available nitrogen (Nd, soil + fertilizer) at pre-sowing. In this equation, Y represents the relative yield, x the values of Nd, 165 the critical threshold of Nd, is the value where there is no response in Y to Nd increase. P (plateau) represents all the values of Nd (x) in which Y becomes constant.

### Comparación de modelos

Se evaluó para el grupo de datos provenientes de los diferentes experimentos si existían diferencias en el ajuste logrado con el modelo lineal-plateau respecto al cuadrático-plateau, no evidenciándose diferencias significativas entre los parámetros de los modelos ( $P = 0.91$ ), particularmente en el umbral obtenido (165 kg Nd ha<sup>-1</sup>) (**Tabla 5**).

El parámetro c (coeficiente cuadrático) del modelo cuadrático-plateau, que es el parámetro que le da la curvatura al modelo, presentó un valor muy bajo, no significativo ( $P > 0.1$ ). En efecto, el intervalo de confianza para dicho parámetro

fue de -0,0017 a 0,0019. Debido a que la contribución de dicho parámetro no fue significativa y siguiendo el principio de parsimonia, resultó recomendable continuar el análisis utilizando el modelo lineal-plateau, por ser más sencilla e intuitiva su interpretación.

**Tabla 5.** Parámetros para las funciones lineal-plateau y cuadrático-plateau que relacionan el rendimiento relativo (RR) del conjunto de los experimentos con el Nitrógeno disponible (Nd, suelo a 0-60 cm + fertilizante) en PS. En la función lineal-plateau (a) representa la ordenada de origen, (b) cambios en el RR ante cambios en el Nd y (C) es el umbral crítico. En la función cuadrática-plateau (a) representa la ordenada de origen, (b) cambios en el RR ante cambios en el Nd, (c) el coeficiente cuadrático y (C) es el umbral crítico.

**Table 5.** Parameters of linear-plateau and quadratic-plateau functions that relates relative yield (RR) of the different experiments with available nitrogen (Nd, soil 0-60 cm + fertilizer) in pre-sowing. In the linear-plateau function, (a) represents the intercept, (b) RR response to changes in available N (C) the critical threshold. In the quadratic-plateau function, (a) represents the intercept, (b) RR response to changes in available N, (c) the quadratic coefficient, and (C) the critical threshold.

Parámetro	Lineal-Plateau	Cuadrática-Plateau
a	73,1	74,4
b	0,16	0,13
c		0,000099
C	165	165
R <sup>2</sup>	0,67	0,66

### Comparación de momentos y profundidades de muestreo

Utilizando el modelo lineal-plateau, se comparó la calibración de umbrales para distintos momentos y profundidades de muestreo (**Tabla 6**).

Para una misma profundidad de muestreo, el R<sup>2</sup> de las funciones ajustadas con los muestreos en PS fueron mayores que para las funciones cuyos muestreos de suelo se realizaron en V6. En PS, el R<sup>2</sup> para las distintas profundidades de muestreo fue similar, tampoco se verificaron diferencias ( $P > 0,01$ ) en el parámetro b (la respuesta en rendimiento relativo a cambios en Nd) y el a (ordenada de origen). Los resultados obtenidos en PS, muestran diferencias significativas solamente para el parámetro C (umbral crítico) al variar la profundidad de muestreo. Las **Figuras**

**3A y 3B**, muestran los diferentes modelos según la profundidad de muestreo para los momentos de PS y V6.

**Tabla 6.** Parámetros de funciones lineal-plateau que relacionan el rendimiento relativo con el nitrógeno disponible (Nd, suelo + fertilizante) para los distintos momentos de muestreo (presiembr (PS) y V6) y diferentes profundidades de muestreo. Donde (a) representa la ordenada de origen, (b) la respuesta en rendimiento relativo a cambios en la disponibilidad de N y (C) es el umbral crítico.

**Table 6.** Parameters of linear-plateau functions that relate relative yield with available nitrogen (Nd, soil + fertilizer) considering different soil sampling moments pre-sowing (PS) or V6 and different soil samples depths. Where (a) represents the intercept, (b) relative yield response to changes in the available N, and (C) the critical threshold.

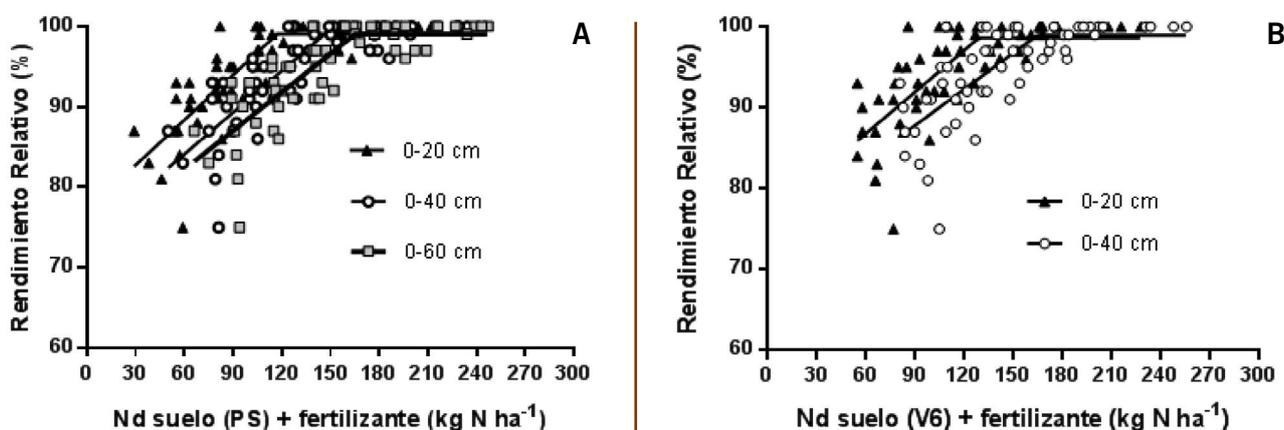
Parámetro	PS			V6	
	0-20 cm	0-40 cm	0-60 cm	0-20 cm	0-40 cm
a	77,2	73,7	72,6	76,5	74,3
b	0,19	0,17	0,16	0,17	0,15
C	117	147	165	129	165
R <sup>2</sup>	0,70	0,69	0,67	0,56	0,53

**Calibración de umbrales por ambiente**

Según el rendimiento del tratamiento NO, que es una medida de todos los factores del ambiente (incluyendo factores edáficos y meteorológicos) cuando no se fertiliza con N, se clasificaron las localidades en 3 rangos de ambientes, *i.e.* ambientes de menos

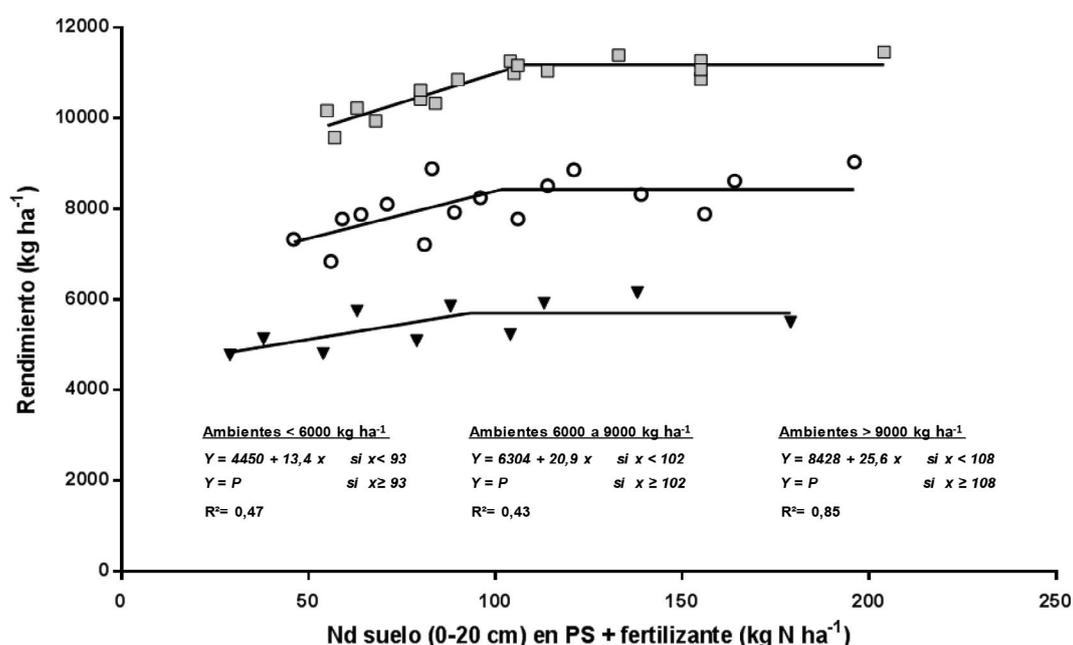
de 6000 kg ha<sup>-1</sup>, de 6000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> y de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup> (Mistrorigo & Valentinuz, 2004). Utilizando el modelo lineal-plateau con los datos del muestreo de PS y la profundidad de 0-20 y 0-60 cm, se procedió a ajustar los modelos. No se incluyeron en el análisis las localidades de Larroque II (campaña 2012-2013) y Rincón de Nogoyá (campaña 2011-2012), la primera porque no se observó respuesta al agregado de N. En el caso de Rincón de Nogoyá, si bien hubo respuesta al agregado de N, el rendimiento obtenido fue muy superior al resto de las localidades que se agruparon como ambientes de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup>, lo que generaba una reducción en el ajuste de la curva. Los modelos para 0-60 cm presentaron menor ajuste que los de 0-20 cm, en especial para los rendimientos menores. Por ello, se propone utilizar los modelos de 0-20 cm.

El modelo generado para ambientes productivos de menos de 6000 kg ha<sup>-1</sup> presentó una menor eficiencia en el uso del Nd (b) y umbral crítico (C) respecto a los otros ambientes (P<0,05), que no difirieron entre sí, P=0,72 para el umbral crítico (C) y P=0,34 para la eficiencia en el uso del Nd (b). Sin embargo, la ordenada al origen (a) fue diferente para los tres ambientes (P<0,05). La **Figura 4** muestra los distintos modelos generados para los tres ambientes a partir del Nd en PS (0-20 cm).



**Figura 3 A y B.** Rendimiento relativo en función del N disponible (Nd, suelo + fertilizante) en el muestreo de presiembr (PS) (a) y en V6 (b) para las distintas profundidades de muestreo (0-20 cm, 0-40 cm y 0-60 cm en PS) y (0-20 cm y 0-40 cm en V6).

**Figure 3 A and B.** Relative yield in function of the available nitrogen (Nd, soil + fertilizer), considering different soil sampling time pre-sowing (PS) and V6 and different soil sample depths (0-20 cm, 0-40 cm and 0-60 cm in PS, Figure a) and (0-20 cm and 0-40 cm in V6, Figure b).



**Figura 4.** Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo a 0-20 cm + fertilizante) en presiembra (PS) para 3 diferentes niveles de rendimiento. Triángulos invertidos negros representan los ambientes menores a 6000 kg ha<sup>-1</sup>, círculos vacíos ambientes entre 6000 y 9000 kg ha<sup>-1</sup> y cuadrados grises ambientes de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup>. También se pueden ver las ecuaciones de la función lineal-plateau para cada ambiente.

**Figure 4.** Yield grain as a function of soil available nitrogen (Nd, soil 0-20 cm, + fertilizer) in pre-sowing (PS), considering different yield potential. Black triangles represent yields less than 6000 kg ha<sup>-1</sup>, white circles 6000 to 9000 kg ha<sup>-1</sup>, and grey squares yields more than 9000 kg ha<sup>-1</sup>.

## DISCUSIÓN

### Respuesta a la fertilización y calibración del umbral crítico

La fertilización nitrogenada produjo incrementos significativos en el rendimiento de los ensayos en MP y Fr (Tabla 2), esto es coincidente con lo reportado en maíces tardíos (Fontanetto *et al.*, 2008; Salvagiotti *et al.*, 2014; Gambin *et al.*, 2016; Coyos *et al.*, 2018; Maltese *et al.*, 2019) y en maíces sembrados en fechas tradicionales (Melchiori *et al.*, 2004; Bianchini *et al.*, 2004; Gregoret *et al.*, 2006; Pagani *et al.*, 2009; Ferraris *et al.*, 2012; Pagani *et al.*, 2012). Tal respuesta es esperable debido a la deficiencia generalizada de N que presentan los suelos de la región pampeana producto de la disminución de los contenidos de MO (Sainz Rozas *et al.*, 2011; Salvagiotti *et al.*, 2011) y a que el N es el nutriente de mayor impacto en el rendimiento de maíz (Pagani *et al.*, 2009; Ferraris *et al.*, 2012; Correndo & García, 2014).

Sin embargo, el ajuste de la función que muestra la respuesta en rendimiento absoluto según

el Nd (suelo 0-60 cm + fertilizante) en PS, considerando todos los experimentos en conjunto, presentó una asociación no significativa cuando se consideraron valores absolutos de rendimiento (Figura 1), a pesar de ser esta la metodología de diagnóstico más difundida para la recomendación de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en la región pampeana (Ruiz *et al.*, 2001; Gregoret *et al.*, 2006; Pagani *et al.*, 2008; Fontanetto *et al.*, 2008; Sánchez & Muñoz, 2008; Salvagiotti *et al.*, 2011). Esto puede ser parcialmente atribuido a la variabilidad encontrada a la respuesta a la aplicación de N y rendimiento alcanzado entre sitios (Tabla 3 y 4). Esta variabilidad se debe a diferentes factores (clima y suelo) y a la interacción de estos con el manejo, que afectan de manera directa o indirecta el nivel de respuesta del cultivo al agregado de N. Dentro de los factores climáticos, el agua es el más importante (Bianchini *et al.*, 2004; Maddonni *et al.*, 2004; Ruiz *et al.*, 2004; Sánchez & Ascheri, 2005; Gregoret *et al.*, 2006; Ferraris *et al.*, 2012; Correndo & García, 2014; Morris *et al.*,

2018), sea por su efecto sobre el crecimiento del cultivo o sobre el ciclo del N en el suelo. En la **Tabla 1**, se puede observar que la variabilidad encontrada en el agua disponible en los primeros 120 cm de suelo fue mayor en R1 que en PS. La menor variabilidad encontrada en PS, podría deberse a la mayor duración del barbecho en maíces tardíos que permite una buena recarga del perfil. La mayor variabilidad encontrada en R1, puede ser atribuida a las precipitaciones ocurridas posteriores a la siembra que fueron diferentes entre sitios, y al diferente consumo de agua por los cultivos según sitio y tratamiento. La campaña 2011-2012, se caracterizó por la abundancia de las precipitaciones durante todo el ciclo. En la campaña 2012-2013, se registró un déficit muy severo, principalmente en el período emergencia-floración y durante el período crítico (**Tabla 1**) que seguramente afectaron los rendimientos del maíz (**Tabla 3**).

Dentro de las variables del suelo que afectan la respuesta a la fertilización nitrogenada, la más importante es el N disponible (Lory & Scharf, 2003; Gregoret *et al.*, 2006; Salvagiotti *et al.*, 2011; Ferraris *et al.*, 2012; Pasuquin *et al.*, 2012; Correndo & García, 2014; Gambin *et al.*, 2016; Coyos *et al.*, 2018; Morris *et al.*, 2018), que cuenta con la ventaja que puede ser fácilmente cuantificable por métodos convencionales de laboratorio previo a la implantación del cultivo, que permiten predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización y, por lo tanto, ser la base de recomendaciones de fertilización (García & Correndo, 2017).

A su vez, existen factores de manejo que también pueden influir en la respuesta observada, como la práctica de la fertilización (Gudelj *et al.*, 2005; Correndo & García, 2014), fuente, dosis, momento de aplicación y ubicación del fertilizante (García & Correndo, 2017), la densidad (Gambin *et al.*, 2016), la decisión de la fecha de siembra (Fontanetto *et al.*, 2008; Coyos *et al.*, 2018) o el nivel de rendimiento (Mistrorigo & Valentinuz 2004; Salvagiotti *et al.*, 2011). Toda esta complejidad de interacciones y factores que afectan la respuesta del cultivo al agregado de N permiten inferir que los patrones de respuesta pueden variar entre lotes y aun en un mismo lote en di-

ferentes campañas. Esto hace que el desarrollo de herramientas de diagnóstico para la fertilización sea un gran desafío (Bianchini *et al.*, 2004). En este sentido, la relativización de los rendimientos absolutos ha sido propuesta como una forma de reducir la variabilidad (Álvarez, 2007). En este trabajo, la transformación de los datos de rendimiento a RR, disminuyó la dispersión (**Figura 2**) lo cual se verificó en el incremento del ajuste del modelo, que pasó de  $R^2=0,06$  a  $R^2=0,67$ .

En el presente trabajo, se consideró la conveniencia de utilizar un modelo lineal-plateau respecto a un modelo cuadrático-plateau. Al evaluar el set de datos provenientes de los diferentes experimentos, no se observaron diferencias en el ajuste de ambos modelos para relacionar el RR con el Nd ( $P=0,91$ ). A su vez, el valor del parámetro que representa la curvatura al modelo lineal-plateau no fue distinto de 0 y tampoco hubo diferencias en el Nd para alcanzar el umbral ( $165 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Por lo cual, a pesar de la críticas hacia el modelo lineal-plateau por carecer de un significado biológico, debido al cambio abrupto de la pendiente en la intersección de ambas rectas (Black, 1993), y a que asume una eficiencia de uso del Nd (parámetro b) constante hasta llegar al umbral (Álvarez, 2007), en esta ocasión por no presentar diferencias estadísticas entre modelos, siguiendo el principio de parsimonia, sería recomendable la utilización de este modelo. El modelo lineal-plateau cuenta con la ventaja que es más sencilla su interpretación, esto podría favorecer la adopción por parte del productor.

El Nd (suelo 0-60 cm + fertilizante) con el cual se llegó al umbral en el modelo lineal-plateau fue de  $165 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Este umbral fue similar al reportado por Mistrorigo & Valentinuz (2004) en maíces tempranos en Entre Ríos utilizando un modelo lineal-plateau, quienes definieron un umbral en  $162 \text{ kg Nd ha}^{-1}$  y superior a los  $126 \text{ kg Nd ha}^{-1}$  reportados por Ruiz *et al.* (2004) para siembras tempranas en Entre Ríos sobre suelos similares, aunque estos últimos autores definen este umbral para alcanzar un RR de 82%. En otras zonas de la región pampeana se han reportado umbrales mayores (Sánchez & Muñoz, 2008; Salvagiotti *et al.*, 2011), aunque es importante destacar que los rendimientos ab-

solos obtenidos en esas redes fueron mayores a los encontrados en este trabajo.

A una misma profundidad de muestreo, el ajuste de los modelos cuyos muestreos se realizaron en PS fue mejor que el de los modelos cuyos muestreos se realizaron en V6 (**Tabla 6**), debido a esto, los resultados de este trabajo sugieren la conveniencia de realizar los muestreos de suelo en PS. El mejor ajuste en PS que en V6, podría deberse a que en PS se encontró menor variabilidad de Nd en el suelo entre lotes. Esta menor variabilidad en PS, podría estar asociada a la diferente capacidad de mineralización de los suelos y a las condiciones meteorológicas durante el periodo entre PS y V6. Igualmente es importante remarcar que, a pesar de que el umbral en V6 fue mayor que el de PS (**Tabla 6**), como los lotes en V6 presentaron una cantidad mayor de Nd en el suelo (**Tabla 1**), los diferentes modelos generados estarían recomendando aplicar una dosis de N similar para ambos momentos de muestreo.

Los ajustes de las funciones en un mismo momento fueron similares independientemente de la profundidad de muestreo (**Tabla 6**). En el caso del muestreo en PS que logró un mejor ajuste, el único parámetro que difirió entre las diferentes profundidades fue el C ( $P < 0,01$ ), que aumentó a medida que se incrementó la profundidad de muestreo (**Tabla 6**), lo cual resulta lógico ya que se considera una mayor profundidad de muestreo y, consecuentemente, la cantidad total de N es mayor (**Tabla 1**). Debido a la presencia de horizontes sub-superficiales arcillosos (B2t) que pueden dificultar el muestreo de suelo, se podría entonces recomendar realizar el diagnóstico partiendo de los 20 cm superficiales. La mayoría de los modelos que relacionan el rendimiento o RR con el Nd en la región Pampeana, consideran el dato de Nd (0-60 cm) en PS, sería interesante verificar los ajustes para modelos que consideren solamente los primeros 20 cm de suelo en esas mismas redes, lamentablemente los mismos han sido escasamente reportados. Los pocos casos reportados de la relación entre el RR y el Nd que consideran el N en los primeros 20 cm de suelo y utilizan un modelo lineal-plateau, también son en Entre Ríos en maíces sembrados en fecha temprana (Melchiori *et al.*, 1996; Mistrorigo *et al.*,

1997). Con el objetivo de establecer la relación entre el RR del sorgo y el Nd, Barbagelata *et al.* (2014), también evaluaron distintas profundidades de muestreo y observaron una estrecha relación entre el Nd 0-60 cm y el Nd 0-20 cm, llegando a una conclusión similar a la de esta investigación *i.e.* que no se mejora la exactitud del modelo por aumentar la profundidad de muestreo. Esta diferencia respecto a otras regiones puede ser atribuida a la presencia del horizonte B textural que no sólo dificulta la tarea del muestreo, sino que también podría limitar el movimiento rápido de nitrato por el suelo (Berardo, 1994; Pasuquin *et al.*, 2012). En años con mayores precipitaciones en el periodo previo al muestreo de suelo podría ser recomendable incrementar la profundidad de muestreo, particularmente en suelos de textura más gruesa que los incluidos en el presente trabajo.

Uno de los inconvenientes que se plantea al utilizar el RR como variable regresora, es la violación de algún supuesto del análisis de la regresión, aunque este punto de vista es bastante discutido. El teorema de Gauss-Markov postula que el mínimo de cuadrados ordinarios (que es lo que se utiliza en regresiones lineales simples o múltiples) es el mejor estimador lineal y éste teorema puede ser aplicado sin considerar la distribución de Y, *i.e.* no hace falta normalidad. No obstante, lo que se requiere es que se cumpla el supuesto de que la elección del modelo de regresión sea correcta, es decir que no se ajuste una recta si la distribución es bilineal (Rencher & Schaalje, 2008). Más allá de las consideraciones en el ámbito estadístico, también hay que analizar las limitantes desde el punto de vista agronómico-económico. Por un lado, puede generar errores en la interpretación de los resultados de experimentos de fertilización (Álvarez, 2007), ya que no existe un umbral único para todos los ambientes (**Tabla 3**), esto constituye una generalización que puede ser útil desde el punto de vista práctico al generar un único umbral, pero que puede llevar a recomendaciones incorrectas al no considerar distintos ambientes de rendimiento. Por el otro, la información generada pierde utilidad para realizar un análisis económico, es por ello que en algunos casos se ha propuesto particionar los resultados

de las redes de ensayos según el rendimiento de los diferentes sitios para contrarrestar el problema de la variabilidad entre localidades presentada al inicio de esta sección. En el presente estudio, se partitionaron los sitios en ambientes de menos de 6000 kg ha<sup>-1</sup>, 6000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> y ambientes de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup> (**Figura 4**), esta partición es similar a la utilizada por Mistrorigo & Valentinuz (2004) en Entre Ríos, quienes utilizaron rendimientos menores a 5500 kg ha<sup>-1</sup>, por considerarlo el rendimiento de indiferencia para el maíz en ese entonces, rendimientos entre 5500 y 9000 kg ha<sup>-1</sup> por ser el rango de rendimientos más frecuentes para la región y de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup> como rendimientos máximos para Entre Ríos, si bien estos parámetros se definieron para maíces tempranos, pueden considerarse similares para maíces tardíos. En otros lugares de la región pampeana que exploran niveles de rendimiento mayor, se ha trabajado con otros rangos de rendimiento (Gregoret *et al.*, 2006; Sánchez & Muñoz, 2008; Salvagiotti *et al.*, 2011).

En este trabajo, el umbral crítico (C) y la eficiencia de uso del Nd (b) aumentaron a medida que lo hizo el nivel de rendimiento del ambiente. En efecto, tanto el umbral crítico (C) como la eficiencia de uso del Nd (b), fueron menores en los ambientes que produjeron menos de 6000 kg ha<sup>-1</sup> que en los ambientes de 6000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> y que en los ambientes de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup>. El valor C, fue 9% y 15% mayor para rendimientos de 6000 a 9000 kg ha<sup>-1</sup> y de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, que en los ambientes de <6000 kg ha<sup>-1</sup> (**Figura 4**). Sánchez & Ascheri (2005) en el sudeste de Córdoba, Gregoret *et al.*, (2006) en la región semiárida de Córdoba y Salvagiotti *et al.*, (2011) en el centro y sur de Santa Fe, también observaron en maíces tempranos que en ambientes de alto rendimiento, el Nd para alcanzar el plateau es mayor, por lo cual se puede inferir que el potencial del ambiente es un factor determinante del umbral de Nd. Los umbrales observados por dichos autores no son comparables con los de este trabajo, debido a que trabajaron con profundidades de muestreo de 0-60 cm, los rendimientos que exploraron fueron mayores y los maíces fueron de fecha de siembra temprana.

Los resultados obtenidos en maíces sembrados en fechas tardías en este trabajo sugieren que la cantidad de Nd (suelo más fertilizante) a partir de la cual el maíz llega al umbral crítico, no es muy diferente al umbral informado en maíces tempranos en Entre Ríos. La diferencia entre maíces tempranos y tardíos en cuanto a dosis recomendadas de fertilización nitrogenada, estaría dada por la mayor cantidad de N en el suelo que usualmente se observa a la siembra de los maíces tardíos (Caviglia *et al.*, 2005; Salvagiotti *et al.*, 2014; Gambin *et al.*, 2016; Coyos *et al.*, 2018; Maltese *et al.*, 2019) y posiblemente por una mejor sincronía entre mineralización y absorción de N en maíces tardíos respecto a los tempranos, por lo cual el N a aplicar con el fertilizante es usualmente menor.

## CONCLUSIONES

A partir del conocimiento de la disponibilidad de N-nitrato en el suelo en PS, se logró ajustar un modelo lineal-plateau que puede ser utilizado como herramienta de diagnóstico para la definición de la dosis de N a aplicar en maíces tardíos en Entre Ríos. No se encontraron mejoras en la predicción del modelo por aumentar la profundidad de muestreo, por lo cual la recomendación es utilizar el modelo que considere el muestreo de los 20 cm superficiales. Según el ambiente esperado para un cultivo limitado por N (inferior a 6000 kg ha<sup>-1</sup>, entre 6000 y 9000 kg ha<sup>-1</sup>, y para ambientes de más de 9000 kg ha<sup>-1</sup>) se definieron tres modelos que permiten definir la cantidad de N aplicar como fertilizante hasta llegar al umbral obtenido.

## AGRADECIMIENTO

Al equipo de MD de Bayer Crop Science.

## BIBLIOGRAFIA

- Álvarez R. (coord.). 2007. Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendaciones en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Barbagelata PA; JM Pautasso & RJM Melchiori. 2014. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada para sorgo en Entre Ríos. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Actas en CD.

- Bardsley CE & JD Lancaster. 1965. Sulfur. In: Black, C:A (Ed), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA, Madison WI: 1102-1116.
- Berardo A .1994. Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la estación experimental INTA Balcarce. INTA EEA Balcarce. Boletín Técnico 128.
- Bert FE; EH Satorre; F Ruiz Toranzo & GH Podestá. 2006. Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems* 88: 180-204.
- Bianchini A; ME Magnelli; D Canova; S Lorenzatti; D Peruzzi; J Rabasa; AS Begnis & F García. 2004. Diagnóstico de fertilización nitrogenada para maíz en siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.
- Black CA. 1993. Soil fertility evaluation and control. C.A Black (ed). Lewis Publisher, USA. 721 pg.
- Bonelli LE; JP Monzón ; A Cerrudo; RH Rizzalli & FH Andrade. 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delayed in sowing date. *Field Crop Research* 198: 215-225.
- Bremmer, JM. 1965. Inorganic forms of nitrogen. In Black, CA (Ed), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA, Madison WI: 1179-1237.
- Caviglia OP; RJM Melchiori & OF Paparotti. 2005. Eficiencia de utilización del nitrógeno de dos híbridos de maíz en fechas de siembra contrastantes. VIII Congreso Nacional de Maíz Rosario 2005. Trabajos presentados y resumen de conferencias: 190-193.
- Cerrato ME & AM Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 82:138-143.
- Correndo A & F García. 2014. Bases de la nutrición del cultivo de maíz. Respuesta a la fertilización con nitrógeno, fosforo, azufre y zinc. Cuadernillo Maíz AACREA.
- Coyos T; L Borrás & BL Gambin. 2018. Site specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown Maize in Central Argentina. *Agronomy Journal* 110: 1-9.
- Ferraris GN; F Mousegne; M Barraco; L Couretot; C Alvarez; H Barosela; A Bojorge; J Cavo; E Cassina; E Lemos; M López de Sabando; G Magnone; A Martin; P Melilli; A Paganini; A Pereyro; R Pontoni; C Scianca; R Sola; M Telleria & L Ventimiglia. 2012. Respuesta a fosforo y nitrógeno en maíz en el norte-centro-oeste de Buenos Aires. Efecto año, tipo de suelo y nivel de rendimiento. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16 – 20 Abril 2012. Mar del Plata, Buenos Aires, Actas en CD.
- Fontanetto H; O Keller; D Giailevra; LM Belotti & C Negro. 2008. Aspectos del manejo del cultivo de maíz de segunda y de la fertilización nitrogenada en la región pampeana norte de la Argentina. XVI Congreso de Aapresid. 12 – 15 agosto de 2008: 217-224. Rosario, Santafé, Argentina.
- Gambin BL; T Coyos; G Di Mauro; L Borrás & L Garibaldi. 2016. Exploring genotype, management, and environment grain yield of late sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems* 146:11-19.
- García FO & F Salvagiotti. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del cono sur de Latinoamérica. En: *Memorias del Simposio Uso Eficiente de Nutrientes presentado por IPNI. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. 16 – 20 noviembre de 2009. San José de Costa Rica.
- García FO & AA Correndo. 2017. Nutrición de plantas para óptimos rendimientos agrícolas. IV Congreso Nacional de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Asunción, Paraguay: 204-212.
- Gil R. 2005. Cálculo del agua edáfica y balance hídrico del cultivo. INTA, curso de capacitación profesional “El funcionamiento físico del suelo y la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmosfera.
- GraphPad Prism, Graphpad Software. 2018. LA Jolla, California, USA. [www.graphpad.com](http://www.graphpad.com)
- Gregoret MC; J Dardanelli; R Bongiovanni & M Diaz Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ciencia del suelo* 24: 147-159.
- Gudelj VJ; PS Vallone; CM Galarza; BL Masiero; OE Gudelj & C Lorenzon. 2005. Momentos de aplicación de nitrógeno en siembra directa de maíz. *Maíz Actualización 2005*. Información para extensión N95. INTA Marcos Juárez.
- Gutierrez Boem FH; G Rubio & R Alvarez. 2013. Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes. En: Alvarez R, Prystupa P, Rodriguez MB, Alvarez CR. *Fertilización de cultivos y pasturas*. Editorial Facultad de Agronomía: 91-99.
- Lory JA & PC Scharf. 2003. Nitrogen Management: Yield Goal versus Delta Yield for Predicting Nitrogen Need in Corn. *Agronomy Journal* 95: 994-999.
- Maddoni GA; JL Mercau; RA Ruiz & EH Satorre. 2004. Esquemas de alta producción de maíz en la región litoral sur de AACREA (Provincia de Entre Ríos). *Revista Científica Agropecuaria* 8: 79-90.
- Maddoni GA. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina- A probabilistic approach. *Theoretical Application Climatology* 107: 325-345.
- Maltese, NE; RJM Melchiori; GA Maddoni; FM Ferreyra & OP Caviglia 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Research*, 231: 40-50.
- Melchiori R; O Paparotti & W Paul. 1996. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada em maíz: nitratos en pre-escar-

- dillada. Serie de Extensión No 11. EE INTA Paraná. Entre Ríos.
- Melchiori RJM; OP Caviglia & AC Kremerer. 2004. Fertilización nitrogenada sobre los componentes del rendimiento en Maíz en el centro-oeste de Entre Ríos. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.
- Mercau JL & ME Otegui. 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. In *Advances in Agricultural System Modeling*, volume 5. ASA, CSSA, SSSA, Madison USA, pp 351-373.
- Mistrorigo D; OR Valentinuz & R De Carli. 1997. Fertilización de maíz en siembra directa en Entre Ríos. Congreso Nacional de Maíz.
- Mistrorigo D & OR Valentinuz. 2004. Fertilización de maíz en siembra directa en suelos molisoles y vertisoles del oeste de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 8: 99-107.
- Morris TF; TS Murrell; DB Beegle; JJ Camberato; RB Ferguson; J Grove; Q Ketterings; PM Kyveryga; CAM Labosky; J Mc Grath; JJ Meisinger; J Melkonian; BN Moebius Clune; ED Nafzinger; D Osmond; JE Sawyer; PC Scharf; W Smith; JT Spargo; H Van Es & H Yang. 2018. Strengths and limitations of nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement. *Agronomy Journal* 111: 1-37.
- Pagani A; HE Echeverría; HR Sainz Rozas & PA Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia de suelo (Argentina)* 26: 183-193.
- Pagani A; HE Echeverría; FG Andrade & HR Sainz Rozas. 2009. Characterization of Corn Nitrogen Status with a Greenness Index under Different Availability of Sulfur. *Agronomy Journal* 101: 315-322.
- Pagani A; HE Echeverría; FH Andrade & HR Sainz Rozas. 2012. Effects of nitrogen and sulfur applications on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *Journal of Plant Nutrition* 35: 1080-1097.
- Pasuquin JM; S Saenong; PS Tan; C Witt & MJ Fischer. 2012. Evaluating N management strategies for hybrid maize in Southeast Asia. *Field Crop Research* 134: 153-157.
- Peech M. 1965. Hydrogen-ion activity. In: Black, C:A (Ed), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA, Madison WI: Madison WI: 914-926.
- Rencher AC & GB Schaalje. 2008. *Linear model in statistics*. John Wiley and Sons.
- Ritchie SW & JJ Hanway. 1982. How a corn plant develops. Spec. Rep. 48. Iowa State University of Science and Technology, Coop. Ext. Serv., Ames, Iowa.
- Ruiz RA; EH Satorre; GA Maddonni; J Carcova & ME Otegui. 2001. Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. En: *Actas VII Congreso Nacional de Maíz*.
- Ruiz RA; GA Maddonni; JL Mercau & EH Satorre. 2004. Bases para la fertilización de maíz en la región litoral sur de AACREA (Provincia de Entre Ríos). XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.
- Salvagiotti F; JM Castellarin; F Ferraguti & HM Pedrol. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29:199-212.
- Salvagiotti F, F Ferragutti; J Enrico & G Prieto. 2014. Respuesta a nitrógeno en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Actas en CD.
- Sanchez MA & LM Ascheri. 2005. Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba CREA monte Buey-Inrville Campañas 2003-2004 y 2004-2005. *INPOFOS Informaciones Agronómicas* 27: 18-20.
- Sanchez MA & SE Muñoz. 2008. Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba. *IPNI Informaciones Agronómicas* 39: 20-22.
- Sainz Rozas H; HE Echeverría & H Angelini. 2011 Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana de Argentina. *IPNI Informaciones Agronómicas* 2: 6-12.
- Saxton KE & WJ Rawls. 2006. Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1569-1578.
- Steinbach H. 2007. Funciones de producción. En: *Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendaciones en la Región Pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Walkley, A. & T.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Waring, S.A. & J. M. Bremner. 1964. Ammonium production in soil under water-logged conditions as an index of soil nitrogen availability. *Nature* 201: 951-952.