

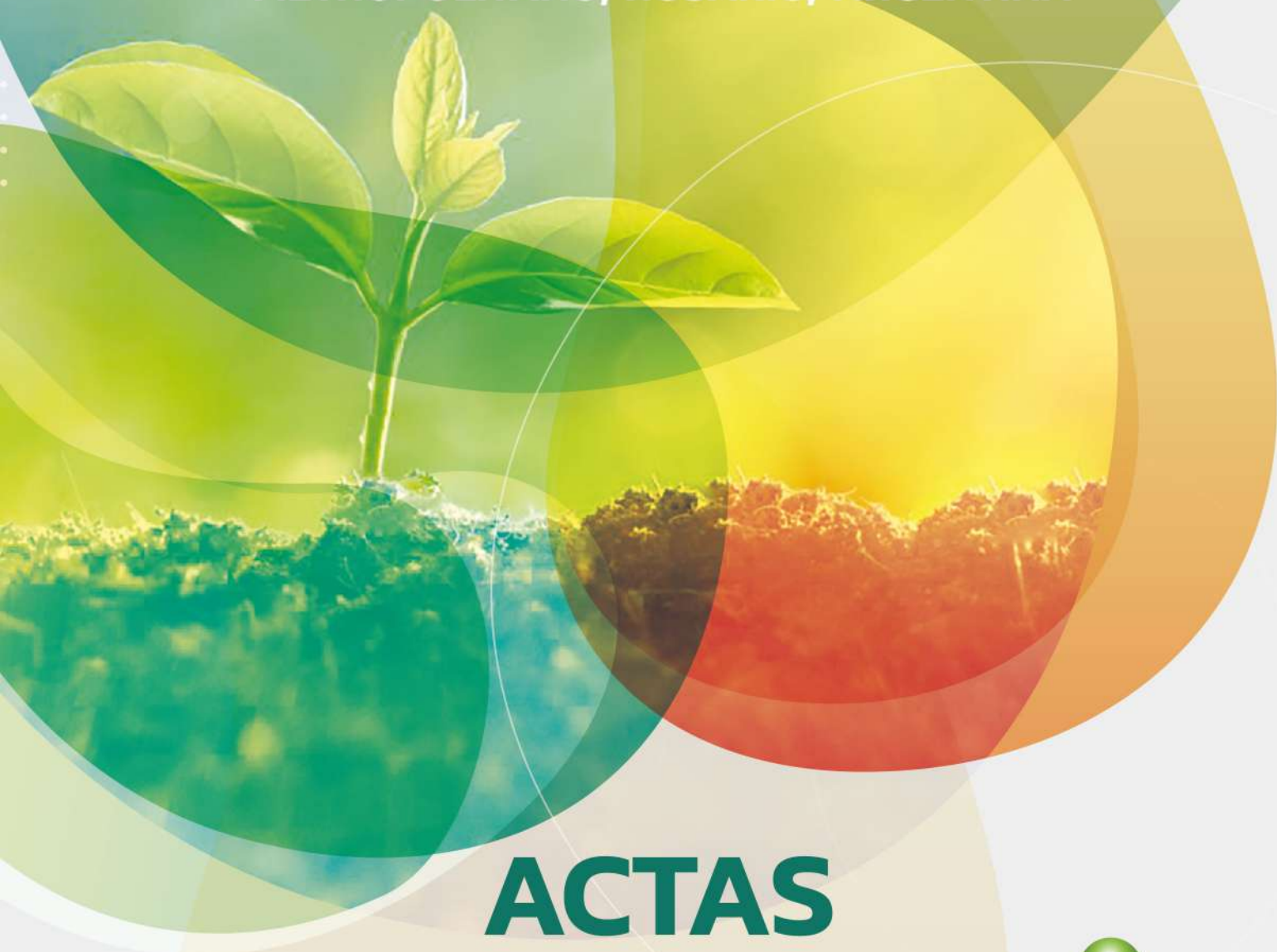


Simposio
Fertilidad 2023

AL GRAN SUELO ARGENTINO ¡SALUD!

10 Y 11 DE MAYO 2023

METROPOLITANO, ROSARIO, ARGENTINA



ACTAS

www.fertilizar.org.ar


FERTILIZAR
ASOCIACION CIVIL

Avances en fertilización nitrogenada en maíz en el NEA

Nicolás I. Stahringer¹, Javier A. Fernández², Suyai Almirón³ y Andrés Madias³

¹ Facultad de Ciencias Agrarias – Univ. Nacional del Nordeste

² University of Queensland, Australia

³ Aapresid – Sistema Chacras

Nota: Trabajo actualizado del original presentado en la Revista de la Red de Nutrición de Cultivos del Norte Argentino – Resultados Campañas 2020/21 y 2021/22.

Introducción

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

El incremento de productividad como respuesta al aumento del N disponible se ajusta a lo que se conoce como respuesta de rendimientos decrecientes (Maddoni et al., 2003). Una forma simplificada de interpretarlo es utilizando un modelo conocido como lineal-plateau. Básicamente, la interpretación de dicho modelo consiste en que se observa un aumento del rendimiento en forma lineal mientras este nutriente limita la producción. Luego, llegado un punto, la respuesta deja de ser lineal al aumento de la dosis de N porque este nutriente deja de limitar la producción que puede llegar a estar limitada por otros recursos (agua, otros nutrientes, etc.). A partir de dicho punto, por más que se continúe incrementando la dosis de N no habrá incremento de productividad y se habrá alcanzado un “techo” que se conoce como “plateau”.

La principal herramienta utilizada en Argentina para el diagnóstico y la posterior recomendación de N en maíz se basa en la disponibilidad de N (Nd). El Nd se obtiene de sumar el N del suelo (Ns), obtenido mediante la determinación del N de nitratos en el suelo en la profundidad de 0-60 cm previo a la siembra, más el N aportado por el fertilizante (Nf). En general, en la región

pampeana se ha observado que el Nd (Ns+Nf) consigue explicar una buena parte de la variación del rendimiento del maíz. Sin embargo, mejores diagnósticos pueden ser obtenidos considerando otras variables como: factores de suelo limitantes, variables climáticas, factores de manejo (plagas, enfermedades, malezas), presencia de napa, disponibilidad de otros nutrientes, aporte de N mineralizado durante el ciclo del cultivo, entre otros (Correndo y García, 2014). No obstante, esta herramienta no está calibrada (ajustada) para los sistemas de producción del noreste argentino (NEA).

Más del 90% del N se encuentra en la materia orgánica (MO) del suelo (Echeverría et al., 2014), razón por la cual la disminución de la MO trae aparejado una reducción de la disponibilidad de N, entre varias consecuencias negativas para el suelo. Estudios realizados en el Norte Argentino muestran pérdidas de aproximadamente 30% de la MO tras los primeros 10 años de agricultura (Villarino et al., 2017). Por otro lado, ha sido demostrado en un estudio reciente que recopiló información de 788 experimentos de N en maíz en Argentina, que cuanto mayor es el rendimiento objetivo del maíz mayor es la demanda del cultivo por este nutriente (Correndo et al., 2021).

En el NEA se ha dado un incremento de los rendimientos del cultivo de maíz en los últimos años, al mismo tiempo que los suelos presentan en general cada vez más años de agricultura (reflejado por ejemplo en menores concentraciones de MO). Esta realidad, de creciente demanda de N por maíces con mayor potencial productivo, en un escenario con caídas de MO y, por ende, de menor oferta de N del suelo, ha llevado a un incremento del uso de la fertilización nitrogenada. No obstante, este avance en

la adopción de esta práctica no ha sido acompañado del desarrollo de modelos de recomendación ajustados a las condiciones de la región.

De esta manera, los objetivos planteados inicialmente en esta Red son: (i) evaluar la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz en el NEA y cuáles son los factores ambientales y de manejo que más la afectan y (ii) calibrar (ajustar) umbrales críticos de N disponible en el suelo para maíz en el NEA.

Materiales y métodos

Ubicación de los experimentos

Se realizaron un total de 26 experimentos en lotes de producción en siembra directa con diferentes historiales de manejo previo, durante las campañas 2020-2021 (12 sitios) y 2021-2022 (14 sitios). Los experimentos se distribuyeron, en las provincias de Santiago del Estero, Chaco, Santa Fe y Salta (Figura 1).

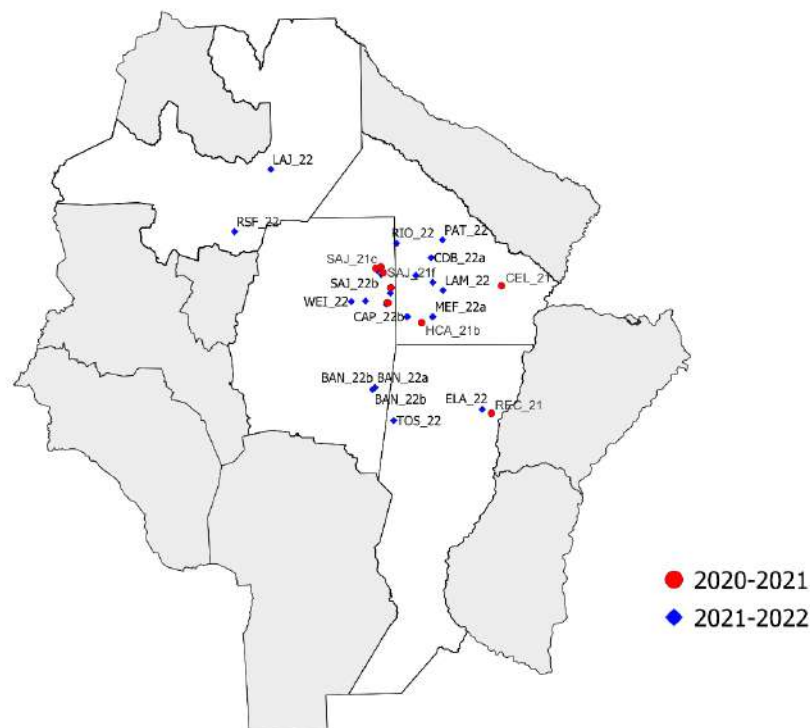


Figura 1. Sitios experimentales en Santiago del Estero, Chaco, Santa Fe y Salta.

Manejo

De los 26 experimentos evaluados en este trabajo, 19 fueron realizados en macroparcelas (MA) y 7 en microparcelas (MI). En la campaña 2020-2021, los ensayos en MI estuvieron ubicados en las localidades de Reconquista (Santa Fe), Colonia Elisa (Chaco), Hermoso Campo (Chaco) y dos en Sachayoj (Santiago del Estero), en cuanto que en la campaña 2021-2022 los únicos dos ensayos en MI se hicieron en Concepción del Bermejo (Chaco). De aquellos realizados en MA en la campaña

2020-2021, los siete que se hicieron estuvieron en localidades de Chaco (1) y Sgo. del Estero (6), mientras que en la campaña 2021-2022 hubo cinco en Chaco y siete en Sgo. del Estero (Tabla 1). Todos los ensayos se condujeron en secano.

En la campaña 2020-2021, las fechas de siembra de todos los ensayos estuvieron concentradas en tres semanas, del 23/12/20 al 13/1/21, mientras que en la campaña 2021-2022 los ensayos fueron sembrados entre el 23/12/21 y el 24/1/22. La mayor ventana de siembra en la última campaña se debió a la falta de lluvias al momento de la siembra en algunos sitios, razón por la cual

algunos ensayos no considerados en este análisis fueron cosechados posterior a la fecha de cierre para recepción de los datos de este año. Por su parte, considerando las dos campañas, las densidades de siembra variaron de 48000 a 75000 pl ha⁻¹, siendo que el promedio se ubicó en 56000 pl ha⁻¹. Se utilizaron diferentes híbridos que fueron definidos por los responsables de cada sitio (Tabla 1).

El antecesor estival predominante fue soja de primera (88% de los sitios), seguido por maíz (8% de los sitios) y algodón (1 sitio). Como antecesor invernal en 54% de los sitios se hizo barbecho, en 31% hubo trigo y en un 15% se hicieron cultivos de servicio (vicia sola o consorciada con triticale).

El control de malezas e insectos se hizo siguiendo el manejo del productor. Hubo tres sitios en los que se tuvo problemas con cogollero (1 en Colonia Elisa y 2 en Concepción del Bermejo), para lo cual se debió reforzar el control con insecticida.

Diseño experimental y tratamientos

Tanto los experimentos en MA cuanto aquellos en MI fueron conducidos con un diseño

en bloques completamente aleatorizados (DBCA) con dos repeticiones como mínimo y tres repeticiones en 65% de los sitios. Las MA tuvieron un ancho mínimo de ocho surcos y un largo mínimo de 150 m, siempre teniendo en cuenta la maquinaria disponible. Muchos ensayos inclusive tuvieron anchos de 20 a 30 m y largos de 200 m (Figura 2).

En la mayoría de los ensayos los tratamientos aplicados fueron 0, 40, 80 y 160 kg N ha⁻¹. A su vez, otras dosis de N en general dentro del mismo rango fueron utilizadas en seis sitios. De acá en adelante todos los tratamientos se denominan colocando la dosis seguido de la letra N (por ej.: 0N, 40N, 80N, 160 N, etc.).

Como fuente de N se utilizaron fuentes sólidas (77% de los sitios) y líquidas (23% de los sitios), siempre adoptando la manera en que habitualmente cada productor emplea para aplicar fertilizantes. Así, las fuentes empleadas fueron Nitrodoble (50% de los sitios), urea (19% de los sitios), UAN Plus (15% de los sitios), Urea

NBPT (8% de los sitios), SolMix (4% de los sitios) y UAN (4% de los sitios). El momento de aplicación de los fertilizantes

fue desde presiembra hasta el estado fenológico de V8 según la escala de Ritchie y Hanway (1982). En el 38% de los ensayos se aplicaron entre presiembra y emergencia, en el 12% entre V2-V3, en el 31% entre V4-V6 y en el 19% entre V7-V8. Las formas de aplicación fueron: al voleo (42% de los sitios), incorporado (31% de los sitios) y chorreado (27% de los sitios). En los casos en que se utilizó urea esta fue incorporada para que no haya riesgo de volatilización (Tabla 1).

En seis experimentos también se evaluó el agregado de azufre (S) y cinc (Zn) en un tratamiento adicional que tenía 160 kg N ha⁻¹, más 20 kg S ha⁻¹ y 0,7 kg Zn ha⁻¹ (este último aplicada vía foliar con Zintrac® como fuente).

Sitio	Fecha de siembra	Densidad de siembra (pl/ha)	Antec. Estival	Antec. Invernal	Genotipo	Fuente N	Momento Aplicación N	Forma Aplicación N
REC_21	6/1/21	50000	Algodón	Barbecho	K 9606 VIP 3	Nitrodoble	V2-V3	Voleo
CEL_21	23/12/20	48000	Soja 1°	Barbecho	NEXT 22.6 PW	Urea	Siembra	Incorporado
SAJ_21a	26/12/20	55000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V7-V8	Voleo
SAJ_21b	26/12/20	55000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V7-V8	Voleo
HCA_21a	2/1/21	50000	Soja 1°	Vicia**	DUO 225 PW	Nitrodoble	V4-V5	Voleo
HCA_21b	2/1/21	50000	Soja 1°	Vicia+Trit.*	DUO 225 PW	UAN	Emergencia	Chorreado
OTU_21a	2/1/21	55000	Soja 1°	Vicia	DK 72-20 VT4P	Urea NBPT	V8	Voleo
OTU_21b	2/1/21	55000	Soja 1°	Vicia	DK 72-20 VT4P	Urea NBPT	V8	Voleo
SAJ_21c	5/1/21	65000	Soja 1°	Barbecho	P 2089 PWU	UAN Plus	V6	Chorreado
SAJ_21d	6/1/21	60000	Soja 1°	Trigo	B 510 PWU	UAN Plus	V6	Chorreado
SAJ_21e	13/1/21	60000	Soja 1°	Barbecho	P 2089 PWU	UAN Plus	V7	Chorreado
SAJ_21f	9/1/21	60000	Soja 1°	Barbecho	P 2089 PWU	UAN Plus	V6	Chorreado
CDB_22a	6/1/22	57000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V6	Voleo
CDB_22b	6/1/22	57000	Soja 1°	Barbecho	B 510 PWU	Nitrodoble	V6	Voleo
BAN_22a	27/12/21	51000	Maíz	Trigo	P 2089	Urea	Pre siembra	Incorporado
WEI_22	5/1/22	63000	Soja 1°	Trigo	DK 7320 VT4	Urea	Siembra	Incorporado
CAP_22a	8/1/22	50000	Soja 1°	Trigo	DK 7220 VT4	Nitrodoble	Pre siembra	Incorporado
CAP_22b	8/1/22	75000	Soja 1°	Trigo	DK 7220 VT4	Nitrodoble	Pre siembra	Incorporado
AER_22a	22/1/22	50000	Soja 1°	Barbecho	DK 7210 VT3	Urea	Siembra	Incorporado
AER_22b	22/1/22	50000	Soja 1°	Barbecho	B 8472 PW	Urea	Siembra	Incorporado
OTU_22a	29/12/22	58000	Soja 1°	Barbecho	Next 25.8	Nitrodoble	V3-V4	Voleo
OTU_22b	29/12/22	63000	Soja 1°	Barbecho	Next 25.8	Nitrodoble	V3-V4	Voleo
SAJ_22a	23/12/22	60000	Soja 1°	Trigo	B 510 PWU	SolMix	V4-V5	Chorreado
RIO_22	24/1/22	50000	Maíz	Barbecho	BRV 8472	Nitrodoble	Siembra	Incorporado
LOR_22	8/1/22	57700	Soja 1°	Trigo	Next 25.8	Nitrodoble	V5-V6	Voleo
COR_22	11/1/22	57700	Soja 1°	Trigo	Next 25.8	Nitrodoble	Siembra	Chorreado

REC = Reconquista. CEL = Cnia. Elisa. SAJ = Sachayoj. OTU = Otumpa. HCA = Hermoso Campo. CDB = Con. del Bermejo. BAN = Bandera. WEI = Weisburd. CAP = Gal. Capdevilla. AER = Aerolito. RIO = Río Muerto. LOR = Loro Blanco. COR = Corzuela. * Dato no informado. ** Cultivo de servicio pastoreado.

Tabla 1. Descripción de las características de manejo adoptadas en los sitios de experimentación.



Figura 2. Ensayos en macroparcelsas en Gral. Capdevilla (Chaco) en lote con un sector de abra, señalado en rojo (CAP_22a) y otro de monte, de la mitad para abajo (CAP_22b). Cada ensayo con tres repeticiones y cinco tratamientos (0N, 40N, 80N, 160N y 160N+S+Zn). **Fotos:** Ing. Agr. Wilson Schultz (HyH) y equipo de Experta (AGD).

Las muestras de suelo se tomaron en momentos próximos a la siembra, en las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm para caracterización de la fertilidad. Para determinar agua útil (AU) se muestreo hasta un mínimo de 1 m y siempre que fuera posible hasta 2 m. Los análisis de suelos se realizaron en su mayoría en el laboratorio Ag Lab (La Carlota, Córdoba).

Respuesta a la fertilización

Para evaluar si hubo o no respuesta significativa a la fertilización nitrogenada se lo hizo utilizando los rendimientos obtenidos, realizando un análisis de varianza en cada sitio con el software Infostat 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

Calibración del umbral crítico

Se realizó la calibración del umbral crítico (UC). Para ello, el UC de N fue determinado al hacer el ajuste del rendimiento y/o del rendimiento relativo (RR) con el N disponible (Nd). El Nd se obtuvo al sumar el N del suelo (N de nitratos de 0-60 cm) disponible a la siembra más el N aportado con el fertilizante que varía según la dosis utilizada en cada tratamiento. El cálculo del rendimiento relativo se hizo empleando la siguiente ecuación (Álvarez et al., 2015):

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

Se ajustó la función lineal-plateau que se define de la siguiente manera:

$$Y = a + b x \quad x < C$$

$$Y = P \quad x \geq C$$

Siendo que:

Y = rendimiento o rendimiento relativo

a = ordenada al origen

b = eficiencia en el uso del Nd (o respuesta del rendimiento o RR a la disponibilidad de N)

x = los valores de Nd

C = umbral crítico de Nd (este valor es el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o RR al incremento de Nd)

P = plateau (son todos los valores de Nd (x) en que Y se vuelve constante)

Resultados

Caracterización de los sitios

En la Tabla 2 se presenta una síntesis de las características ambientales de los sitios donde se condujeron los experimentos en las campañas 2020-2021 y 2021-2022. Existe una gran amplitud de años de agricultura entre los sitios, desde un mínimo de 2 años hasta un máximo de 80 años. El 50% de los lotes tenía entre 14 y 30 años, siendo que el 25% de los lotes más jóvenes tenían menos de 14 años. Entre los suelos que están mapeados hay

principalmente molisoles y en menor medida entisoles y alfisoles. Dos sitios fueron ambientes de abra (OTU_21b y CAP_22a) y el resto monte.

elevadas temperaturas en el NEA, es común encontrar poca cobertura en los lotes. Esto se vio en un 25% de los sitios, en los que la cobertura inicial fue menor al 35%, lo cual hace con que se pierda más rápidamente la humedad, entre varios aspectos negativos. Cabe resaltar que, en general, los lotes donde se condujeron los ensayos en la campaña 2020-2021 tenían menos cobertura (la mitad de los lotes de esa primera campaña tenía entre 10 y 15%) que los lotes de la campaña 2021-2022 (un 75% de los sitios de la segunda campaña tenía como mínimo 56% de cobertura). De esta manera, no solamente se tuvo mayores porcentajes de suelo cubierto al inicio de la campaña 2021-2022, sino que también esta tendencia fue más uniforme entre los diferentes sitios, hecho que se percibe por una menor distribución de los datos en la Figura 3.

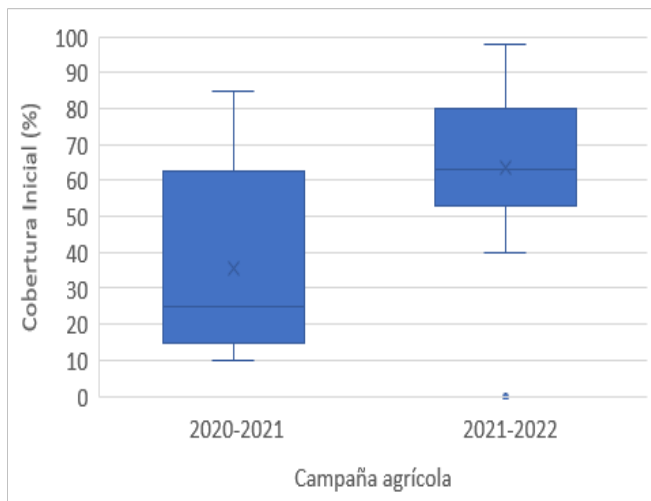


Figura 3. Porcentaje de cobertura inicial observada en los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas.

Considerando ambas campañas, la cobertura inicial varió entre 0 y 98% (Tabla 2). Debido a las

La gran mayoría de los sitios tiene 50% o más de limo, con valores que van de 45 a 79% para este tamaño de partículas. La arena fue el tamaño de partícula que presentó mayor variabilidad entre los sitios, observándose desde 1% como mínimo hasta 37% como máximo. La mitad del total de los sitios tenía una concentración de P (Bray 1) igual o superior a las 39 ppm, indicando que en general los suelos estaban muy bien provistos de P, pero también hubo cuatro lotes con menos de 20 ppm, lo cual es para destacar ya que en general a la región NEA se la considera una zona con buenos niveles de este nutriente. Cuando se utilizaron arrancadores en sitios con bajo P, el N contenido en dichos fertilizantes se sumó al N del suelo.

Los valores de pH estuvieron entre 5,5 y 7,5 (promedio = 6,9), con una tendencia a encontrar menores valores en sitios con más años de agricultura (Figura 4).

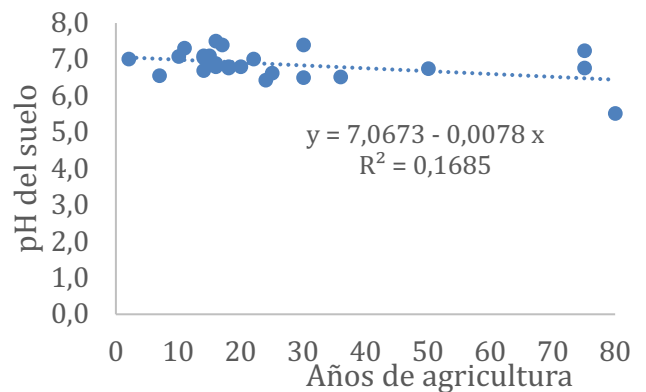


Figura 4. Valores de pH del suelo de los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas, ploteados según los años de agricultura de cada sitio.

Sitio	Años de agricultura	Cob-Inicial (%)	Suelo	Arena (%)	Lim o (%)	Arcilla (%)	pH	SB (%)	MO (%)	P (ppm)	Ns 0-60 (kg ha ⁻¹)	Nan (ppm)	Lluvias (mm)	AU 0-1%	AU 0-2%	Napa
REC_21	25	10	Argiudol acuertico	25	55	20	6,6	65	1	6	45	36	562	80	70	No
CEL_21	80	15	Hapludol típico	10	79	11	5,5	39	1,6	20	118	23	442	60	60	No
SAJ_21a	36	15	Argiudol acuico	26	64	10	6,5	58	2,3	10	135	34	431	55	63	No
SAJ_21b	16	15	Argiudol acuico	34	58	8	6,9	66	3,7	49	139	46	431	55	63	No
HCA_21a	75	85	Durustol típico	18	60	22	7,2	59	2,2	75	59	41	570	40	30	No
HCA_21b	75	35	Durustol típico	34	52	14	6,8	15	1,9	73	82	25	570	40	30	No
OTU_21a	14	70	*	28	63	10	7,1	94	2,9	67	92	47	509	38	18	No
OTU_21b	24	40	*	26	60	14	6,4	77	2,9	27	187	38	509	26	15	No
SAJ_21c	18	*	*	1	68	31	6,8	99	2,6	58	73	37	340	51	40	No
SAJ_21d	10	*	*	*	*	*	7,1	97	3	70	87	44	300	*	*	No
SAJ_21e	20	*	*	3	70	27	6,8	99	2,7	55	83	64	300	*	*	No
SAJ_21f	16	*	*	7	60	33	7,5	99	2,6	29	71	51	324	*	*	No
CDB_22a	7	56	Ustifluent mólico	21	53	27	6,6	99	2,5	51	163	*	432	69	35	No
CDB_22b	14	56	Ustifluent mólico	23	52	25	6,7	100	2,4	41	113	*	432	73	37	No
BAN_22a	30	70	Haplustol típico	21	59	20	6,5	91	2	25	88	*	285	19	38	Si
WEI_22	11	80	*	29	51	20	7,3	69	2,5	19	120	*	303	31	17	No
CAP_22a	50	92	Haplustol Fluventico	14	62	25	6,8	63	2,7	44	30	*	260	61	68	Si
CAP_22b	22	98	Haplustol Fluventico	17	64	19	7	67	2,9	51	48	*	260	76	70	Si
AER_22a	15	80	*	20	60	20	7,1	93	2,2	36	111	*	408	80	64	No
AER_22b	30	80	*	19	60	22	7,4	80	2,1	27	85	*	408	79	69	No
OTU_22a	18	61	Argiustol	22	60	18	6,8	95	4	38	105	*	526	70	52	No
OTU_22b	15	63	Argiustol	18	63	19	6,9	100	3,8	30	97	*	526	46	36	No
SAJ_22a	17	0	*	22	62	16	7,4	100	2,5	39	69	*	450	65	59	No
RIO_22	2	*	*	37	45	18	7	100	2,8	42	297	*	342	44	41	No
LOR_22	14	40	Durustalf	28	53	19	7,1	90	2,3	41	85	*	659	90	52	No
COR_22	16	50	*	*	*	*	6,8	100	2,7	32	56	*	393	*	*	No

REC = Reconquista. CEL = Cnia Elisa. SAJ = Sachayoj. OTU = Otumpa. HCA = Hermoso Campo. CDB = Con. del Bermejo. BAN = Bandera. WEI = Weisburd. CAP = Gral. Capdevilla. AER = Arolito. RIO = Río Muerto. LOR = Loro Blanco. COR = Corzuela. Sitios con 21 son de la campaña 2020-2021 y con 22 de la 2021-2022. AU = agua útil en % de 0-1 m y de 0-2 m. * Dato no informado

Tabla 2. Descripción de las características ambientales de los sitios de experimentación.

Con el transcurrir de los años de agricultura también se percibe una disminución del porcentaje de saturación de bases (SB) (Figura 5) y de la materia orgánica (MO) (Figura 6) en los sitios de los ensayos, hechos que posiblemente estén relacionados con balances negativos de nutrientes (exportación de nutrientes sin o con baja reposición). Sin embargo, también se destacan positivamente algunos sitios con entre 15-20 años de agricultura cuyos suelos se encuentran con 3,7 a 4,0% de MO, producto de un manejo que promueve mejores balances de carbono como la incorporación de cultivos de servicio y mayor porcentaje de gramíneas en la rotación.

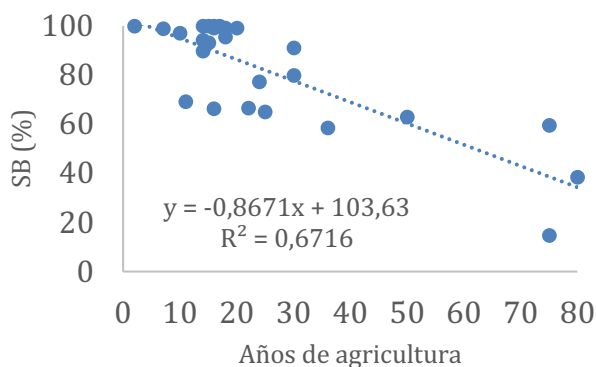


Figura 5. Valores de porcentaje de saturación de bases (SB) de los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas, ploteados según los años de agricultura de cada sitio.

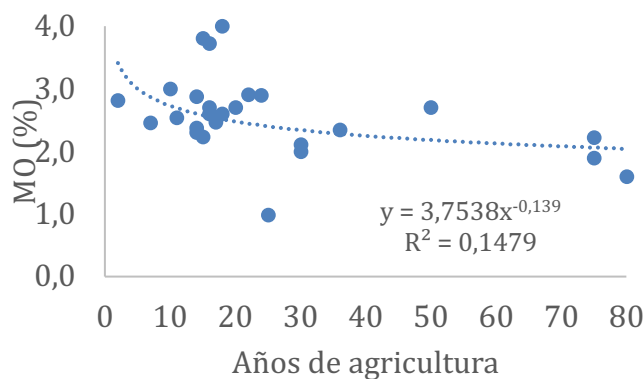


Figura 6. Valores de materia orgánica (MO) de los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas, ploteados según los años de agricultura de cada sitio.

Los niveles de N de nitratos a la siembra ($N_{\text{suelo } 0-60 \text{ cm}}$) fueron muy variables y exploraron un rango de 30 a 297 kg N ha^{-1} considerando todos los sitios de las dos campañas

(Tabla 2). En la Figura 7 se observa que el valor promedio de $N_{\text{suelo } 0-60 \text{ cm}}$ (señalado con una "x" en las cajas) fue similar en ambas campañas (aproximadamente 100 kg N ha^{-1}), pero en la campaña 2020-2021 hubo una tendencia a tener más valores altos en relación a la 2021-2022.

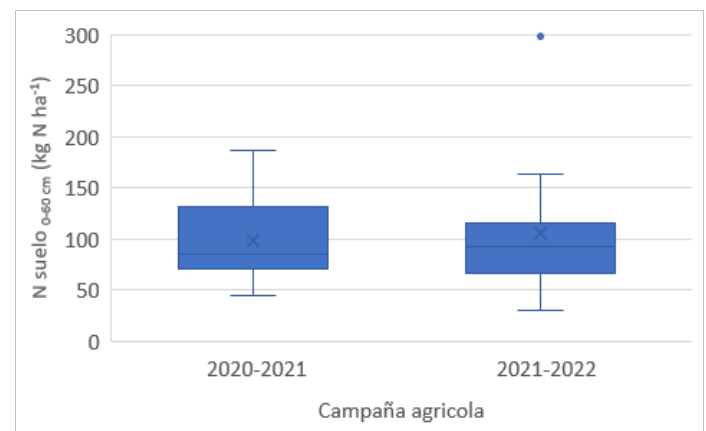


Figura 7. $N_{\text{suelo } (0-60 \text{ cm})}$ a la siembra en los sitios donde se condujeron los experimentos en las dos campañas agrícolas.

A la fecha de esta publicación se disponía solamente de los datos de N_{an} de la primera campaña. Lo que se observa en relación a los valores de N_{an} analizados hasta el momento es que estos exploran un rango de variabilidad que va desde 23 a 64 ppm, con un promedio de 40,5 ppm (Tabla 2).

Teniendo en cuenta las dos campañas agrícolas, las precipitaciones durante el periodo de siembra a cosecha variaron entre 260 y 659 mm. El porcentaje de agua útil (AU%) que había disponible en la mitad de los sitios de la campaña 2020-2021 fue menor en las profundidades de 0-1 m (40-55%) y 0-2 m (30-63%) cuando comparado con la campaña 2021-2022 (0-1 m = 46-76 m; 0-2 m = 37-64%). En cuanto a presencia de napa, solamente tres sitios de la campaña 2021-2022 tenían, y estos se encontraban en Bandera (Sgo. del Estero) y Gral. Capdevila (Chaco) (Tabla 2).

Rendimientos explorados

En la campaña 2020-2021 los rendimientos variaron entre 2631 y 13250 kg ha^{-1} en Reconquista y Sachayoj (SAJ_21b), respectivamente. En esta primera campaña, el rendimiento promedio fue 7675 kg ha^{-1} (Figura 8). Ya en la campaña 2021-2022 el rendimiento promedio fue 8582 kg ha^{-1} , con rendimientos variando entre 3852 y 11688 kg ha^{-1} en Concepción del Bermejo (CDB_22a) y Gral. Capdevila (CAP_22b), respectivamente (Figura 9). De esta manera, se observa que la campaña 2021-2022 tuvo no solamente un rendimiento promedio que superó en 907 kg ha^{-1} a la

anterior, sino que también el “piso de rendimiento” de la segunda campaña fue 1221 kg ha⁻¹ mayor al de la primera. Por lo tanto, los rendimientos explorados en la segunda campaña tuvieron una variabilidad importante, pero dentro

de un rango de rendimientos superior a los obtenidos en la primera campaña.

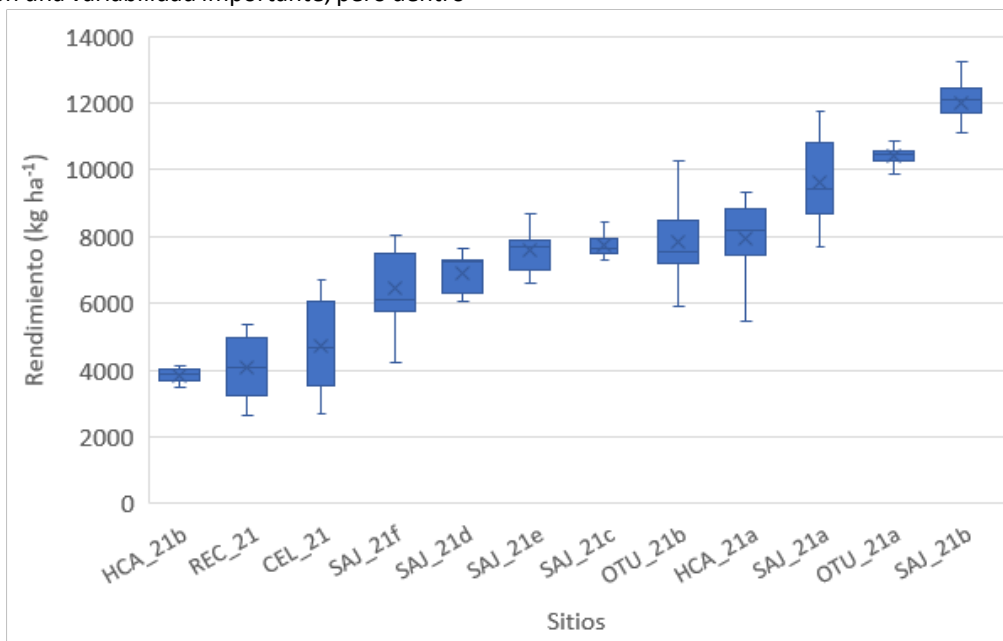


Figura 8. Rendimientos obtenidos en los 12 sitios de la campaña 2020-2021. Las cajas muestran los rendimientos medios y las líneas horizontales (bigotes) los rendimientos extremos de cada sitio.

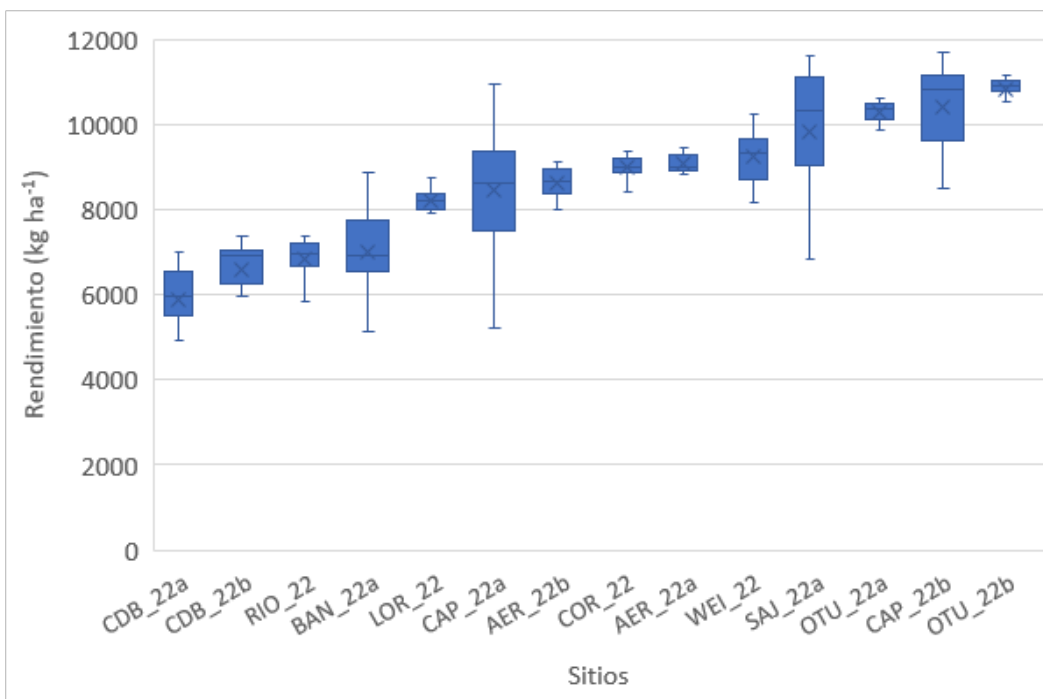


Figura 9. Rendimientos obtenidos en los 14 sitios de la campaña 2021-2022. Las cajas muestran los rendimientos medios y las líneas horizontales (bigotes) los rendimientos extremos de cada sitio.

Respuesta a la fertilización

En la campaña 2020-2021 la fertilización nitrogenada generó un efecto positivo en 3 de los 12 sitios experimentales ($p < 0,05$; Figura 10). Las diferencias significativas de esta campaña se dieron en tres sitios de la

localidad de Sachayoj. Los tres tuvieron como antecesores soja de primera (antecesor estival) y barbecho (antecesor invernal) (Tabla 2). Las respuestas significativas obtenidas variaron entre 1308 kg ha^{-1} (19%) y 2655 kg ha^{-1} (32%) en los sitios SAJ_21e y SAJ_21b, respectivamente.

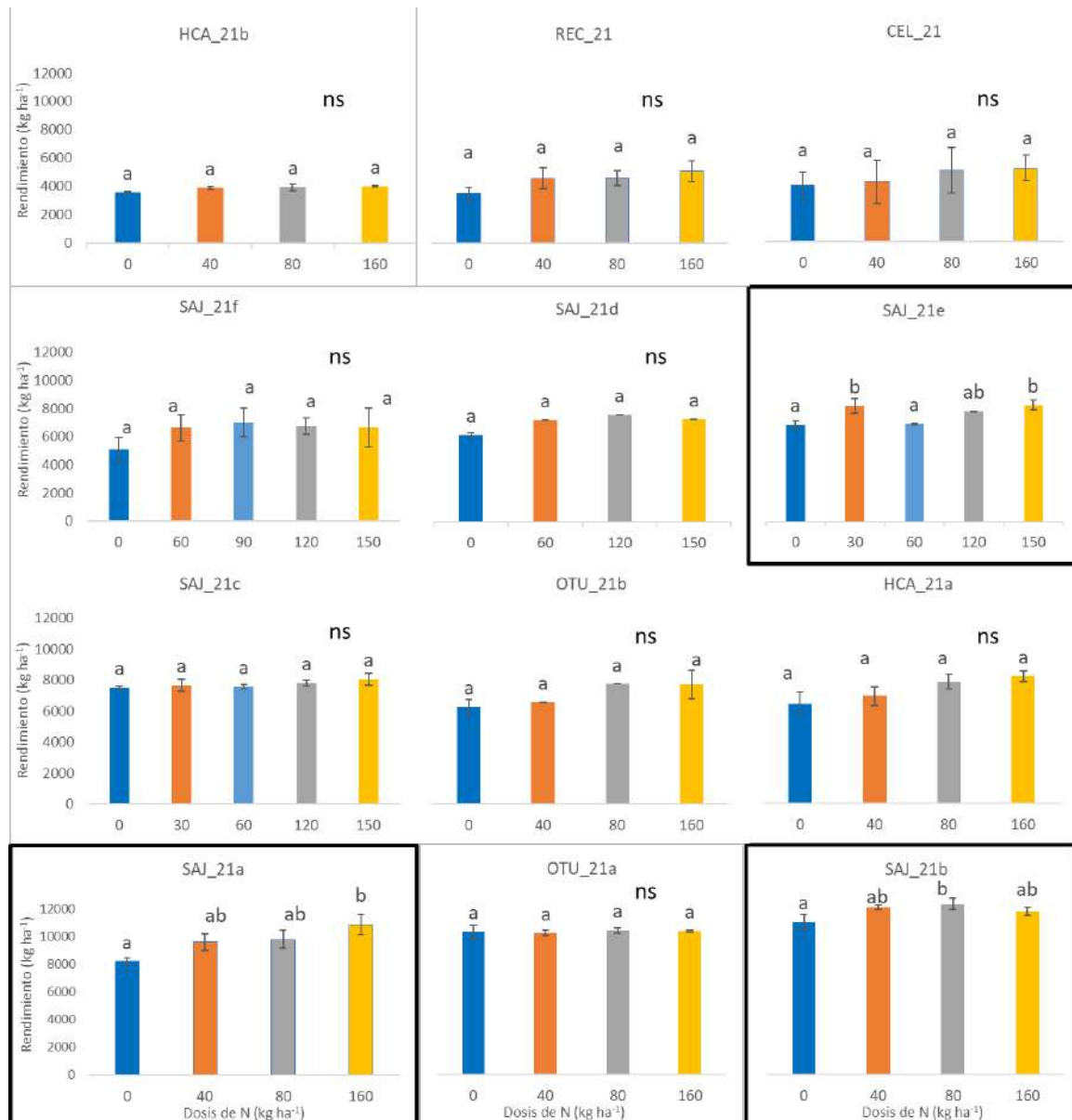


Figura 10. Variabilidad de rendimientos obtenidos en los 12 ensayos de la campaña 2020-2021 en función de las dosis de N aplicadas en cada sitio. Letras distintas entre tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre dosis de N según el test LSD Fisher.

En la campaña 2021-2022 se encontró un aumento significativo del rendimiento en 8 de los 14 sitios ($p < 0,05$; Figura 11). Las diferencias significativas de esta campaña se

obtuvieron todas en sitios con macroparcelas que se encontraban en las siguientes localidades: Gral. Capdevila (CAP_22a y CAP_22b), Corzuela (COR_22), Aerolito

(AER_22b), Weisburd (WEI_22), Sachayoj (SAJ_22a) y Otumpa (OTU_22a y OTU_22b). Los ocho tuvieron como antecesor estival soja de primera y como antecesor invernal en cinco de ellos trigo en cuanto que en tres fue barbecho (Tabla 2). Las respuestas significativas obtenidas variaron

de: 430 kg ha⁻¹ (4%) a 4349 kg ha⁻¹ (61%) en los sitios OTU_22a y SAJ_22a, respectivamente.

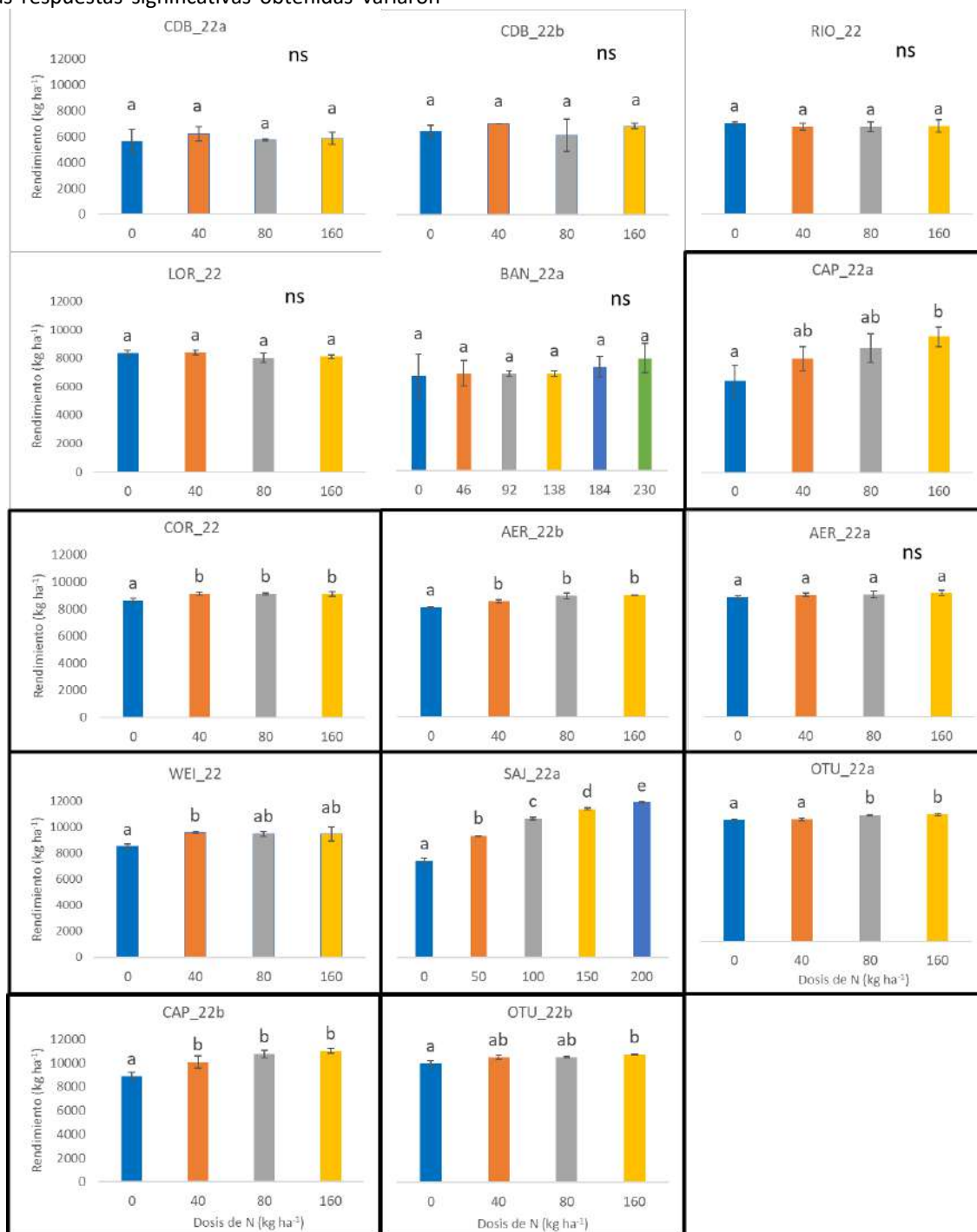


Figura 11. Variabilidad de rendimientos obtenidos en los 14 ensayos de la campaña 2021-2022 en función de las dosis de N aplicadas en cada sitio. Letras distintas entre tratamientos indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre dosis de N según el test LSD Fisher.

Cabe destacar que los sitios con respuesta significativa tuvieron un rendimiento promedio mínimo de 8433 kg ha^{-1} (CAP_22a), siendo que de los nueve sitios por encima de ese rendimiento promedio sólo uno (AER_22a) no tuvo respuesta significativa (Figura 11).

Al comparar ambas campañas queda evidente que en la 2021-2022 hubo un mayor porcentaje de sitios con respuesta significativa (57%) en relación a los que la tuvieron en la 2020-2021 (25%). Esto podría deberse a diferentes motivos tales como: menor cantidad de N en el suelo (0-60 cm) a la siembra y mayor cobertura del suelo en la segunda campaña (Figuras 7 y 3); así como menor cantidad de sitios en ambientes de bajos rindes y mayor cantidad de sitios con mayor porcentaje de agua útil en el suelo a la siembra en la segunda campaña con relación a la primera (Figuras 8 y 9; Tabla 2). Como mencionado anteriormente, en la campaña 2021-2022, los sitios con respuesta significativa estuvieron en ambientes de medios a superiores, lo cual lleva a pensar que en algunos sitios con bajos rendimientos es probable que haya otras variables de manejo que se deban ajustar antes que la fertilización. Un ejemplo de ello son los sitios de Concepción del Bermejo (CDB_22a y CDB_22b), en los cuales la utilización de un material susceptible al cogollero (refugio) posiblemente haya comprometido los rindes por el ataque de dicha plaga. Situación similar a esta se observó en Colonia Elisa (CEL_21) en la primera campaña donde el rendimiento se vio comprometido por el ataque de la misma plaga, así como una fuerte seca y problemas con spiroplasma. Aspectos como estos son algunas de las dificultades bióticas y abióticas que se presentan a menudo en ensayos en el NEA, motivo por el cual requieren un adecuado manejo con los debidos cuidados para controlar estas posibles complicaciones. Además, es un motivo por el cual, siempre que sea posible, se recomienda que se hagan tres repeticiones en lugar de dos.

La elección del material más adecuado para cada sitio también podría afectar la probabilidad de respuesta significativa de un ensayo de fertilización nitrogenada. En este sentido, llama la atención que, en los sitios ubicados en Aerolito, los cuales estuvieron uno a la par del otro, un ensayo tuvo respuesta significativa (AER_22b) y el otro no (AER_22a), siendo que la única diferencia entre ambos fue el híbrido utilizado. En la región Pampeana, por ejemplo, se ha observado diferencia de respuesta a la fertilización

nitrogenada según genotipos (Gambin et al., 2016 citado por Coyos et al., 2018).

Otra práctica de manejo que también puede influir en la probabilidad de tener respuesta o no, es elegir la densidad de siembra adecuada para cada híbrido, en cada ambiente, y prestar especial atención también a la uniformidad de siembra. Con relación a este aspecto, por ejemplo, vale mencionar que en ensayos donde se cruzaron dosis crecientes de N por distintas densidades de siembra, realizados en la Chacra Sachayoj en la campaña 2020-2021, se observó que en general densidades mayores a 60000 pl ha^{-1} mostraron una elevada tendencia al quebrado del material allí utilizado (datos no presentados, Morand comunicación personal). Todo lo comentado anteriormente lleva a tener muy presente el hecho de que la nutrición del cultivo es apenas uno de los aspectos importantes a manejar adecuadamente para lograr elevados rendimientos.

En los seis experimentos donde se evaluó adicionalmente un tratamiento con agregado S y Zn ($160\text{N}+\text{S}+\text{Zn}$) no se encontró efecto significativo del mismo ni en su interacción con el sitio ($p > 0,05$).

Calibración del umbral crítico

Inicialmente la calibración del umbral crítico se hizo con el conjunto de datos de rendimiento relativo en función del Nd (N suelo 0-60 cm + N fertilizante), considerando todos los sitios de las dos campañas, ajustando un umbral crítico por campaña (Figura 12; Tabla 3).

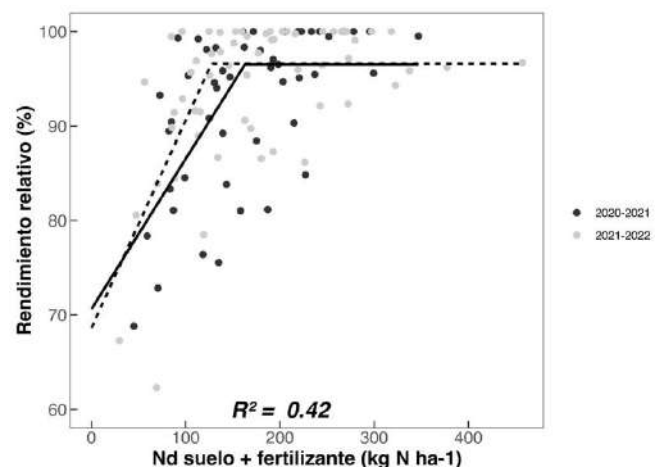


Figura 12. Rendimiento en función del nitrógeno disponible a la siembra ($N_d = N_{\text{suelo } 0-60 \text{ cm}} + N_{\text{fertilizante}}$) de los sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

Año	Parámetro	Valor	D.E.	P valor
2020-2021	a	70,6	4,3	<0,001
	b	0,16	0,04	<0,001
	C	163	15,4	<0,001
2021-2022	a	68,6	5,1	<0,001
	b	0,22	0,05	<0,001
	C	127	11,6	<0,001

Tabla 3. Parámetros de las funciones lineal-plateau entre nitrógeno disponible a la siembra ($N_d = N_{\text{suelo } 0-60 \text{ cm}} + N_{\text{fertilizante}}$) y rendimiento relativo (%) para 12 sitios de la campaña 2020-2021 y los 14 sitios de la campaña 2021-2022.

Sin embargo, al ajustar un modelo, considerando todos los sitios de ambas campañas agrícolas, se observa que el R^2 obtenido es levemente inferior (Figura 13) al que se obtuvo cuando se separó el set de datos por campaña (Figura 12). Así fue posible llegar a un único umbral crítico de $147 \text{ kg Nd ha}^{-1}$ con los datos de los primeros dos años de la Red (Tabla 4). En la Tabla 4 se presentan los parámetros del modelo ajustado en la Figura 13. El desvío estándar (D.E.) del parámetro C nos indica que el rango crítico de N disponible o intervalo de confianza está entre 137 y $157 \text{ kg Nd ha}^{-1}$.

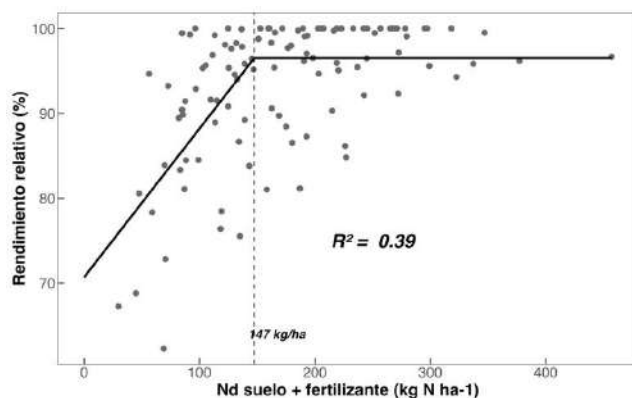


Figura 13. Rendimiento relativo en función del nitrógeno disponible a la siembra ($N_d = N_{\text{suelo } 0-60 \text{ cm}} + N_{\text{fertilizante}}$) para 26 sitios durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

Parámetro	Valor	D.E.	P valor
a	70,7	3,25	<0,001
b	0,18	0,03	<0,001
C	147	10,1	<0,001

Tabla 4. Parámetros de la función lineal-plateau entre nitrógeno disponible a la siembra ($N_d = N_{\text{suelo } 0-60 \text{ cm}} + N_{\text{fertilizante}}$) y rendimiento relativo (%) para 26 sitios durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

En la búsqueda de obtener umbrales críticos por ambientes, se procedió a clasificar los sitios en tres rangos de ambientes que fueron: ambientes de rendimiento menor a 6000 kg ha^{-1} , ambientes con rendimientos de 6000 a 9000 kg ha^{-1} y ambientes cuyos rendimientos fueran superiores a 9000 kg ha^{-1} . Segmentación de ambientes por franjas de rendimientos como la mencionada anteriormente han sido utilizadas por Mistrorigo & Valentinuz (2004) y por Díaz Valdez et al. (2020) en Entre Ríos. Según lo expresado por algunos productores y ensayistas que participaron de esta Red de Ensayos, en la región los rindes de indiferencia para maíz con fertilización nitrogenada están aproximadamente entre 5000 y 7000 kg ha^{-1} , dependiendo del lugar, con lo cual considerar un límite inferior de 6000 kg ha^{-1} (promedio de los rindes de indiferencia) se justifica por este motivo al igual que fue planteado por los autores de los trabajos realizados en Entre Ríos. Al igual que se consideró en el trabajo de Díaz Valdez et al. (2020), el rendimiento utilizado como criterio para clasificar en estos rangos de ambientes fue el promedio obtenido en los tratamientos ON (testigo) de cada sitio, considerando que el mismo es una medida de todos los factores ambientales (edáficos y climáticos) cuando no se aplica N.

En la Figura 14 se muestra la relación entre los rendimientos absolutos y el N_d para los 26 sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022, separados por ambientes ($< 6000 \text{ kg ha}^{-1}$; $6000-9000 \text{ kg ha}^{-1}$; $> 9000 \text{ kg ha}^{-1}$). El ajuste de los modelos lineal-plateau que se obtuvieron para los tres ambientes fueron muy buenos ($R^2 = 0,70$), mejor inclusive que el obtenido utilizando RR y sin separar por ambientes (Figura 13).

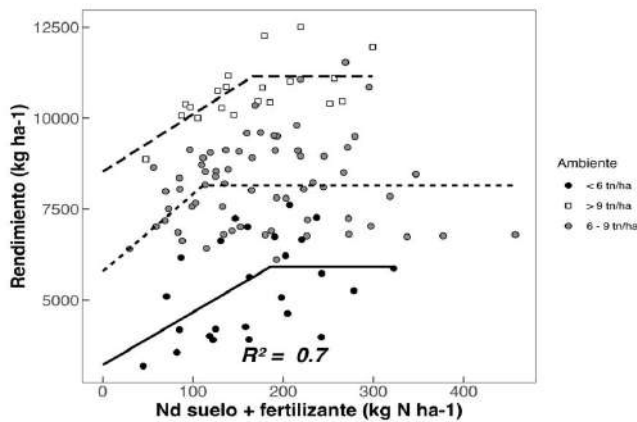


Figura 14. Rendimiento en función del nitrógeno disponible a la siembra ($Nd = N \text{ suelo}_{0-60 \text{ cm}} + N \text{ fertilizante}$) para 26 sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022, separados en tres ambientes.

Al hacer esta estratificación, los umbrales críticos obtenidos fueron de 186, 111 y 166 kg Nd ha^{-1} para los ambientes: $< 6000 \text{ kg ha}^{-1}$, $6000-9000 \text{ kg ha}^{-1}$ y $> 9000 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente. En el ambiente de menor potencial es probable que los sitios considerados hasta el momento tengan otras limitantes más importantes que el N. En lo que se refiere a la eficiencia de uso del N ($\text{kg grano por kg Nd}$; parámetro b), esta variable fue significativa únicamente para el ambiente $> 9000 \text{ kg ha}^{-1}$ con un valor de 15,8 $\text{kg grano kg Nd}^{-1}$ (Tabla 5). Sin embargo, la variabilidad de los datos y la no significancia de las pendientes (parámetro b) observada en los ambientes con rendimientos menores a 9000 kg ha^{-1} señalan que se requiere un mayor análisis de los datos y ampliar el set de datos con dos campañas más, la pasada (2022-2023) que también fue seca, y la próxima (2023-2024) que según los pronósticos sería más húmeda. Probablemente la variabilidad observada puede deberse a la calidad de los sitios, la historia de los mismos (años de agricultura) y a la mineralización.

Ambiente	Parámetro	Valor	D.E.	P valor
< 6000 kg ha^{-1}	a	3218	1082	<0.01
	b	14,5	8,7	ns
	c	186	52,9	<0.01
6000-9000 kg ha^{-1}	a	5788	1212	<0,001
	b	21,25	14,5	ns
	C	111	26,1	<0,001
> 9000 kg ha^{-1}	a	8527	812	<0,001
	b	15,8	7,1	<0,05

Tabla 5. Parámetros de la función lineal-plateau entre nitrógeno disponible a la siembra ($Nd = N \text{ suelo}_{0-60 \text{ cm}} + N \text{ fertilizante}$) y rendimiento relativo (%) para 26 sitios de las campañas 2020-2021 y 2021-2022, separados en tres ambientes.

El aporte de N por mineralización puede ser contemplado para mejorar los ajustes de los modelos incorporando para ello un estimador de la mineralización que es el Nan. Datos preliminares de esta Red de Nutrición del Norte Argentino presentados en el Congreso 2022 de Aapresid han mostrado para el análisis exclusivo de los sitios de la campaña 2020-2021 que hubo una mejora en el ajuste de los modelos. Para el próximo informe de esta Red, ya con los datos de Nan de las dos campañas, se podrá evaluar, en el total del conjunto de datos obtenidos hasta la fecha, cómo evoluciona el ajuste del modelo cuando se tiene en cuenta también el N aportado por mineralización a lo largo de la campaña (comúnmente llamado “la película”) sumado al N determinado en el suelo a la siembra (la “foto inicial”; Reussi Calvo et al, 2020).

Por último, cabe destacar que este es un análisis preliminar con los primeros datos obtenidos en dos campañas de esta Red de Nutrición. Las respuestas y los umbrales obtenidos hasta el momento deben ser considerados aún exploratorios. La continuación del proyecto con información de las dos próximas campañas (2022-2023 y 2023-2024) proporcionará un número de evaluaciones y un mayor rango de variación en condiciones ambientales.

Consideraciones finales

- Se analizó la respuesta a N en 26 sitios de maíz durante las campañas 2020-2021 y 2021-2022.
- Los rendimientos variaron entre 2631 y 13250 kg ha^{-1} .
- Hubo una respuesta significativa a la fertilización en 11 sitios, que se concentraron principalmente en la campaña 2021-2022.
- Las respuestas se dieron en sitios con antecesor invernal trigo o barbecho, principalmente con mayores porcentajes de cobertura y agua útil a la siembra.
- Preliminarmente se observa un umbral crítico único de Nd de $137-157 \text{ kg N ha}^{-1}$

Agradecimientos

A los Dres. Fernando O. García y Nahuel I. Reussi Calvo por su apoyo constante y sus aportes desde el principio de esta Red y hasta la actualidad.

A todos los ensayistas y contratistas por su dedicación y trabajo para llevar adelante los ensayos de esta Red.

A las empresas Yara y Experta (AGD) por la financiación de esta Red.

Bibliografía

- Álvarez, R.; F. Gutiérrez Boem; G. Rubio. 2015. Diagnóstico de la fertilidad y recomendación de fertilización. En: Álvarez R. Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana. 1a Ed. Editorial Facultad de Agronomía: 263-274.
- Correndo, A. & F. García. 2014. Bases de la nutrición del cultivo de maíz. Respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo, azufre y zinc. IPNI Cono Sur. Capítulo 6. Maíz. Manual CREA.
- Correndo A.; F. Gutiérrez Boem; F.O. García, et al. 2021. Attainable yield and soil texture as drivers of maize response to nitrogen: A synthesis analysis for Argentina. *Field Crops Research* 273.
- Coyos, T.; L. Borrás & B.L. Gambin. 2018. Site-specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown maize in Central Argentina. *Agron. J.* 110 (4), 1544–1553.
- Díaz Valdez, S.T.; F.O. García & O.P. Caviglia. 2020. Calibración de umbrales críticos de nitrógeno disponible en el suelo para maíz tardío en Entre Ríos. *Ciencia del Suelo* 38(1):106-120.
- Di Rienzo, J.A.; F. Casanoves; M.G. Balzarini; L. González; M. Tablada; C.W. Robledo. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Echeverría, H.E.; H.R. Sainz Rozas & P.A. Barbieri. 2015. Maíz y sorgo. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2da Edición. Cap. 14.
- Gambin, B.L., T. Coyos, G. Di Mauro, L. Borrás & L.A. Garibaldi. 2016. Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agric. Syst.* 146:11–19.
- Maddonini, G.A.; R.A. Ruiz; P. Villariño & I. García de Salomon. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: Producción de granos: bases funcionales para su manejo, Eds.: Satorre et al. Capítulo 19. 783 p.
- Mistrorigo, D. & O.R. Valentinuz. 2004. Fertilización de maíz en siembra directa en suelos molisoles y vertisoles del oeste de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 8: 99-107.
- Reussi Calvo, N.I.; N. Diovisalvi; A. Berardo; F.O. García. 2020. Del paper al lote. ¿Cuándo, cómo y por qué debería fertilizar mis maíces? Laboratorio FERTILAB, FCA-INTA Balcarce, CONICET.
- Ritchie, S.W. & J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. *Spec. Rep.* 48. Iowa State University of Science and Technology, Coop. Ext. Serv., Ames, Iowa.
- Salvagiotti, F.; H. Pedrol; J. Castellarin; J. Capurro; J.C. Felizia; A. Gargicevich & N. Trentino. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I - Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para Mejorar la Producción. INTA Oliveros. 20:67-70.
- Villarino, S.H.; G.A. Studdert; P. Baldassini; M.G. Cendoya; L. Ciuffoli; M. Mastrángel & G. Piñeiro. 2017. Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina, *Sci Total Environ.* 575:1056-1065.



FERTILIZAR

ASOCIACION CIVIL



FERTILIZAR.ORG.AR