

FACTORES AMBIENTALES Y DE MANEJO DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ EN LA REGIÓN CENTRO-NORTE DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA

Emilio H. Satorre^{1, 2,*}, Esteban Tronfi³, César Costamagna³, Tomas Iturrez³ y Agustín Arinci³

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Cátedra de Cerealicultura, Buenos Aires, Argentina

² CONICET, Universidad de Buenos Aires, Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura (IFEVA), Buenos Aires, Argentina

³ RAVIT, Red Agropecuaria de Vigilancia Tecnológica, Córdoba, Argentina

* E-mail: satorre@agro.uba.ar

Recibido: 20/05/2021
Aceptado: 27/09/2021

RESUMEN

Identificar los factores determinantes del rendimiento de maíz puede ayudar a ajustar las decisiones y el manejo de los cultivos en una región. Con esta finalidad se relevaron 171 unidades permanentes de muestreo en lotes comerciales durante las campañas 2018 y 2019 en el centro-norte de la provincia de Córdoba. En cada lote, se establecieron unidades de 0,78 has para llevar a cabo determinaciones en presiembra, establecimiento, floración y madurez de los cultivos. En cada unidad de muestreo se relevaron múltiples variables incluyendo información edáfica, climática, biológica y de manejo del cultivo para analizar su impacto e importancia como determinante de la variabilidad de los rendimientos observados. El impacto sobre el rendimiento de cada una de 105 variables se determinó utilizando un proceso secuencial de selección en cada período de observación a través de análisis de regresión utilizando el procedimiento "stepwise" y un nivel de aceptación o rechazo de cada variable = $p < 0,15$. Se identificaron ocho variables significativas en un rango de $p < 0,10$ – $p < 0,0001$: (i) lluvias totales (mm) entre el 1/11 y 29/4; (ii) potasio en suelo en presiembra (0-20 cm; meq 100g^{-1}); (iii) nitrógeno en suelo a la siembra (0-60 cm; kg ha^{-1}); (iv) fecha de siembra (días desde el 1/11); (v) densidad (pl m^{-2}); (vi) fertilizante fosfatado aplicado ($\text{kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$); (vii) porcentaje (%) de plantas quebradas en pre cosecha; (viii) porcentaje (%) de plantas con daño de *Heliothis* sp. en espiga; determinando en promedio incrementos de rendimiento de (i) $12,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, (ii) $755 \text{ kg ha}^{-1} \text{ meq}^{-1}$; (iii) $10,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ kg N}^{-1}$; (v) $460 \text{ kg ha}^{-1} \text{ pl}^{-1}$; (vi) $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ y reducciones de rendimiento de (iv) 58 kg día^{-1} ; (vii) $91,8 \text{ kg ha}^{-1} (\%)^{-1}$; y (viii) $7,8 \text{ kg ha}^{-1} (\%)^{-1}$, respectivamente. El modelo de regresión que las integra explicó el 52 % de la variabilidad total de los rendimientos de los cultivos en ambos años.

Palabras clave: determinantes del rendimiento, manejo del cultivo, rendimiento de maíz, *Zea mays* L.

ENVIRONMENTAL AND MANAGEMENT FACTORS DETERMINING MAIZE CROP YIELDS IN THE CENTRAL-NORTHERN REGION OF CORDOBA PROVINCE, ARGENTINA

SUMMARY

Maize crop management decisions may be improved by properly identifying key yield determining variables within a region. With such an objective, 171 sample areas in maize commercial fields were surveyed during 2018 and 2019 in the central Northern region of Córdoba Province in Argentina. In each field, 0.78 ha permanent sample plots were established and numerous variables registered during pre-sowing time, maize establishment, flowering and crop maturity. Climate, soil, crop, pest and diseases management together with pre-harvest crop conditions were determined. Their impact and relative importance on maize yield variability in the studied region was analyzed. The relevance among 105 variables was determined using a sequential process to select key variables at each survey time using a stepwise regression procedure and acceptance or rejection criteria equal to $p < 0.15$. Eight variables were identified that significantly ($p < 0.10$ – $p < 0.0001$) explain maize yield along the dataset. They were: (i) total rainfall (mm) between 11/1 and 4/29; (ii) soil potash content (0-20 cm; meq 100g^{-1}); and (iii) soil nitrogen at pre-sowing (0-60 cm; kg ha^{-1}); (iv) sowing date (as days from 11/1); (v) crop density (pl ha^{-1}); (vi) phosphate fertilizer applied ($\text{kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$); (vii) percentage of stem-broken maize plants at pre-harvest; and (viii) percentage of plants with *Heliothis* sp. damage on ears. Identified variables determined a yield increase of (i) $12.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, (ii) $755 \text{ kg ha}^{-1} \text{ meq}^{-1}$; (iii) $10.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ kg N}^{-1}$; (v) $460 \text{ kg ha}^{-1} \text{ pl}^{-1}$; (vi) $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ and yield penalties of (iv) $58 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}$ of delay⁻¹; (vii) $91.8 \text{ kg ha}^{-1} (\%)^{-1}$; y (viii) $7.8 \text{ kg ha}^{-1} (\%)^{-1}$, respectively. The regression model explained 52% of maize yield variability within the 2 million ha region surveyed during two years.

Key Words: yield determinants, crop management, maize yield, *Zea mays* L.

INTRODUCCIÓN

Las determinantes reales de las variaciones de rendimiento del cultivo de maíz entre años o entre lotes de una misma región pueden estar asociadas a múltiples causas. Sin embargo, frecuentemente unos pocos factores del ambiente, el funcionamiento y el manejo del cultivo pueden explicar gran parte de esas variaciones. Su identificación, sin dudas debería contribuir a que los productores incorporen decisiones y tecnologías que aumenten los rendimientos y la eficiencia en el uso de los recursos y reduzcan el riesgo de sus producciones atenuando los efectos negativos de esos factores o capitalizando sus efectos positivos (Byerlee y Heisey, 1996; Zanon *et al.*, 2016).

En múltiples trabajos alrededor del mundo (e.g. reunidos en Andrade y Sadras, 2000; Satorre *et al.*, 2003) se estudió la importancia de condiciones ambientales y decisiones de manejo particulares sobre el resultado de cultivos de maíz. En muchos casos, también se analizó la influencia de múltiples factores. A modo de ejemplo, diversos estudios y aproximaciones han buscado entender los determinantes de los rendimientos del maíz en las distintas regiones del mundo incorporando una multiplicidad de factores (Gowon *et al.*, 1978; Kaylen y Koroma, 1991; Schlenker y Roberts, 2006; Grassini *et al.*, 2009, 2011; Urban *et al.*, 2012). Usualmente, estos trabajos integraron conocimientos agronómicos y variables climáticas como la temperatura y la precipitación relacionándolos con los rendimientos obtenidos. En algunos casos, autores como Kaufmann y Snell (1997) ajustaron un modelo para los rendimientos del maíz en regiones de los Estados Unidos, incorporando una diversidad de variables climáticas, agronómicas y también sociales y económicas. Más recientemente, los modelos matemáticos de simulación, tales como el Ceres-Maize (Hoogenboom *et al.*, 1994; Jones *et al.*, 2003) permitieron explorar las interacciones entre variables agronómicas (genética, fecha de siembra, densidad y fertilización) y ambientales (climáticas y edáficas) en la determinación del rendimiento de maíz y evaluar el impacto sobre el rendimiento a escala regional incluyendo el efecto de la variabilidad climática y su interacción con un reducido número de variables de manejo (e.g. Liu *et al.*, 1989; Grassini *et al.*, 2009; Maddonni, 2012; Casali *et al.*, 2018).

En distintas regiones productivas de la Argentina se exploró la relevancia de factores ambientales (del clima y suelo) y de manejo en maíz a partir de ensayos en condiciones de campo, incorporando una

amplia variabilidad de situaciones locales. Así, en condiciones de producción de secano de la Argentina, se analizaron los factores ambientales, climáticos y edáficos simultáneamente, señalándolos como fuertes determinantes de los resultados de cultivos de maíz (Zaffanella y Zaffanella, 1960; De la Casa, 1992; Maddonni, 2012; Andrade y Satorre, 2015; Gambin *et al.*, 2016; Casali *et al.*, 2018; Vitantonio-Mazzini *et al.*, 2020).

Estudios recientes de los factores determinantes del rendimiento de maíz en condiciones de secano (Gambin *et al.*, 2016; Vitantonio-Mazzini *et al.*, 2020) mostraron la influencia de la oferta ecológica natural en el sitio de producción (suelo y clima) y de las variables de manejo clave sobre el cultivo en la región central productiva del centro y sur de Santa Fe, sur de Córdoba y norte de Buenos Aires. Asimismo, Casali *et al.* (2018) puso en evidencia la importancia de las variables clave en la determinación del rendimiento de maíz en cultivos del Gran Chaco Argentino. Sin embargo, no se conocen aproximaciones semejantes tendientes a identificar aspectos claves de la determinación del rendimiento del cultivo en la región centro-norte de la provincia de Córdoba.

Identificar factores clave en la determinación del rendimiento a partir de datos obtenidos en situaciones de producción a campo puede proveer a los productores de información localmente valiosa para ajustar sus tecnologías y mejorar la productividad de sus cultivos. Sin embargo, la identificación de las variables determinantes del rendimiento de maíz a partir de resultados de lotes de producción son escasas y recientes (Casali *et al.*, 2018), aunque, resultados de campo se usaron exitosamente para identificar variables clave en la determinación del rendimiento y variabilidad de resultados del cultivo en girasol (Mercau *et al.*, 2001) y trigo (Andrade y Satorre, 2015) y ajustar el uso de herramientas de apoyo a la toma de decisiones de manejo en maíz (Satorre *et al.*, 2014) para su uso en amplias regiones de la Argentina. Con pocas excepciones (e.g. Vitantonio-Mazzini *et al.*, 2020), en general, las bases de datos usadas a partir de este tipo de fuentes contaron con un reducido número de variables de manejo y de condiciones de sitio debido al limitado registro de información en los cultivos a campo por parte de los productores (e.g. Casali *et al.*, 2018). Por ello, es posible que variables de sitio y aspectos de manejo menos explorados pasen inadvertidos y puedan explicar las diferencias de rendimiento que experimentan productores en una

región. Para reducir esa posibilidad, este trabajo se llevó a cabo explorando un amplio número de variables determinadas cuidadosamente en lotes bajo condiciones reales de producción del centro-norte de la provincia de Córdoba, Argentina. Los objetivos del trabajo fueron (i) identificar factores clave ambientales y de manejo por su impacto sobre la variabilidad del rendimiento de maíz en la región y (ii) establecer un modelo explicativo simple de la variabilidad de los rendimientos de maíz que resulte útil como base para la toma de decisiones en aspectos del manejo de los cultivos del norte de la provincia de Córdoba, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como parte de la Red Agropecuaria de Vigilancia Tecnológica (RAVIT) se llevó a cabo un relevamiento de datos en 78 y 93 parcelas circulares espacialmente homogéneas de 100 m de diámetro (USI, unidades de seguimiento intensivo) ubicadas en lotes de producción de maíz de la región centro-norte de Córdoba durante 2018 y 2019, respectivamente. La red de relevamientos cubrió un área de dos millones de hectáreas e involucró la participación de 50 productores de esa región. Para seleccionar los lotes relevados, el área se dividió en grillas de 40.000 ha dentro de las cuales se distribuyeron las parcelas en las que se hicieron sistemáticamente determinaciones sobre numerosas variables siguiendo un procedimiento uniforme (protocolo) para cada una de ellas (Figura 1). Los lotes en los que se establecieron las unidades de seguimiento fueron manejados por el productor de acuerdo a los criterios de decisión y tecnología frecuente en la región.

En cada campaña y de cada parcela se cuantificaron en promedio 120 variables de clima, suelo, manejo

y planta a lo largo de cuatro momentos del ciclo de maíz. A partir de la información de algunas de ellas se estimaron otras variables hasta alcanzar una base de datos constituida por 145 variables mayormente cuantitativas y 171 unidades de seguimiento intensivo. Luego de un proceso de consolidación y verificación de estructura de la matriz, esta quedó constituida para el análisis con 105 variables cuantitativas que tenían un amplio rango de variación, incluyendo unas pocas variables cualitativas (Cuadro 1).

Las precipitaciones correspondieron a registros diarios obtenidos en las localidades centrales más cercanas de cada grilla. En los cultivos, se llevaron a cabo determinaciones en cuatro momentos distintos (i) presiembra del cultivo de maíz; (ii) implantación de maíz (V4-V6; Ritchie y Hanway, 1982); (iii) floración (R1) y (iv) madurez de cosecha. Las determinaciones incluyeron variables ecológicas, de manejo y de condición del cultivo según el estado fenológico del cultivo (Cuadro 1) combinando una completa evaluación a campo del cultivo bajo la tecnología del productor en cada USI. Las variables de suelo fueron determinadas en laboratorio a partir de muestras obtenidas en presiembra del cultivo con sacabocados en tres posiciones distintas de cada USI. En 2019, se tomaron además muestras de suelo, para la determinación de nitrógeno (N) anaeróbico (NAN). Las determinaciones en implantación del cultivo tanto de estructura del cultivo (densidad y uniformidad espacial y temporal) como de daño de plagas o enfermedades se obtuvieron a partir de observaciones individuales de cada planta de maíz en parcelas lineales de 21 plantas contiguas en 2 surcos diferentes dentro de cada USI. Las determinaciones en R1 se llevaron a cabo sobre 20 plantas contiguas en un surco cercano al centro de cada USI.

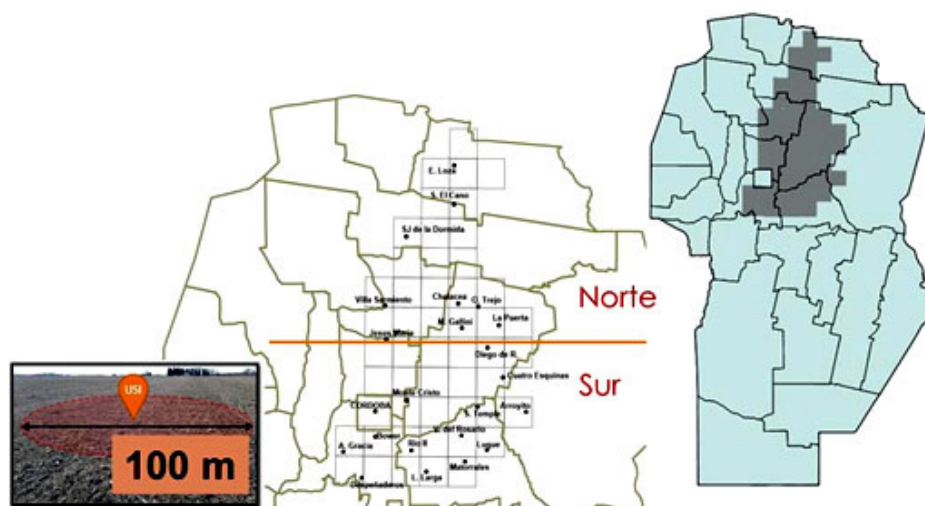


Figura 1. Mapa del área relevada en la región centro-norte de la provincia de Córdoba y su ubicación del área de estudio dentro de la provincia de Córdoba. Foto de la distribución de grillas en las que se ubicaron las parcelas (Unidades de seguimiento intensivo, USI) en lotes comerciales. La línea horizontal de color naranja señala en el mapa las zonas norte y sur consideradas en el trabajo.

Cuadro 1. Variables determinadas en cada parcela muestral (USI) del cultivo de maíz y calculadas a partir de las observaciones realizadas. Se indica el número de orden para su identificación posterior y el número de observaciones y el rango (máximo y mínimo) de cada variable en los dos años de estudio. Los valores de riego (mm) y nutrientes en hoja corresponden a determinaciones realizadas durante 2018 y, los de nutrientes en grano y suelo a cosecha, durante 2019. El N-absorbido se estimó a considerando un índice de cosecha de $N = 0,66$; el N-mineralizado aparente se estimó ($N\text{-mineralizado aparente} = N\text{-residual suelo} + N\text{-absorbido planta} - N\text{-alcanzado en el suelo} + \text{fertilizante}$); R1 se refiere al estado de floración según la escala de Ritchie y Hanway (1982).

Momentos	Variable	N° de orden	N	Rango
Determinaciones previas a la siembra	Arena (%; 0-20 cm)	1	171	8,4-63,3
	Arcilla (%; 0-20 cm)	2	171	5,7-32,1
	Limo (%; 0-20 cm)	3	171	24,1-68,7
	Agua útil (mm; 0-120 cm)	4	171	147-176
	Materia orgánica (%; 0-20 cm)	5	171	1,3-4,8
	N orgánico total (%; 0-20 cm)	6	171	0,06-0,29
	pH	7	171	5,4-8,8
	CIC (meq/100 g)	8	171	9,4-30,9
	Suma bases (meq/100 g)	9	171	8,3-28,7
	Saturación de bases (meq/100 g ⁻¹)	10	171	47-100
	Na Intercambiable (%)	11	171	0,26-17,9
	Na (meq/100 g ⁻¹)	12	171	0,05-3,10
	CE (mS cm ⁻¹)	13	171	0,05-0,49
	N suelo (kg ha ⁻¹ ; 0-60 cm)	14	171	15-351
	NAN (ppm)	15	171	15,5-52,0
	P (ppm; 0-20 cm)	16	90	6-116
	S (ppm; 0-20 cm)	17	171	25-160
	K (meq 100 g ⁻¹ ; 0-20 cm)	18	171	0,81-3,31
	Mg (meq 100 g ⁻¹ ; 0-20 cm)	19	171	1,4-7,0
	Ca meq 100 g ⁻¹ ; 0-20 cm)	20	171	5,4-25,0
	Relación Ca/Mg	21	171	1,4-12,3
	Relación K/Mg	22	171	0,29-1,18
	Zn (ppm; 0-20 cm)	23	171	0,29-3,9
	B (ppm; 0-20 cm)	24	171	0,23-3,9
	Co (ppm; 0-20 cm)	25	171	0,67-2,00
	Cu (ppm; 0-20 cm)	26	171	0,98-5,00
	Fe (ppm; 0-20 cm)	27	171	42-448
	Mn (ppm; 0-20 cm)	28	171	55-400
	Mo (ppm; 0-20 cm)	29	171	0,38-1,00
Lluvias	Lluvias totales (entre 1/11 y 29/4; mm)	30	171	381-798
	Lluvias vegetativo (mm)	31	171	229-526
	Lluvias período crítico (mm)	32	171	3-146
	Lluvias llenado (mm)	33	171	0-193
	Lluvias reproductivo/total	34	171	0,11-0,49
Determinaciones en establecimiento	Riego (mm)	35	171	0-60
	Genética (VIP= 1 o BT no VIP= 0)	36	78	0-1
	Cobertura de rastrojo (%)	37	171	0-100
	Días desde siembra - Establecimiento	38	171	16-51
	Fecha de siembra (días desde el 1/11)	39	171	14-83
	N-fertilizante (kg ha ⁻¹)	40	171	0-129
	P-P2O5 fertilizante (kg ha ⁻¹)	41	171	0-69
	N-alcanzado (Nsuelo + Nfert; kg ha ⁻¹)	42	171	15-409
	P-alcanzado (ppm)	43	171	6-116
	Densidad (pl m ⁻²)	44	171	4,31-7,55
	Desuniformidad espacial - DEP (cm)	45	171	4,0-38,4

Momentos	Variable	N° de orden	N	Rango
Determinaciones en establecimiento	CV DEP (%)	46	171	13-129
	Desvío estándar N° de hojas	47	171	0-12
	Incidencia <i>Dichelops</i> (%)	48	171	0-83
	Incidencia <i>Spodoptera</i> (%)	49	171	0-98
	Severidad <i>Dichelops</i> (escala 0-5)	50	171	0-3
	Severidad <i>Spodoptera</i> (escala 0-5)	51	171	0-3
	Número de hojas (N°)	52	171	3,0-13,0
Determinaciones en floración (R1)	Fungicida (CON= 1 o SIN=0)	53	171	0-1
	Insecticida (CON= 1 o SIN=0)	54	171	0-1
	Días siembra - Floración (días)	55	171	50-76
	Incidencia de Roya (%)	56	171	0-100
	Incidencia de Tizón (%)	57	171	0-90
	Incidencia de <i>Cercospora</i> (%)	58	171	0-90
	Incidencia de Green SNAP (%)	59	171	0-10
	Incidencia de Mal Río IV (%)	60	171	0-0
	Severidad de Roya (%)	61	171	0-8
	Severidad de Tizón (%)	62	171	0-3
	Severidad de <i>Cercospora</i> (%)	63	171	0-19
	Severidad de Mal Río IV (%)	64	171	0-0
	Condición de floración (escala 1-5)	65	171	1-5
	N-Hoja (%)	66	78	2,29-5,63
	P-Hoja (%)	67	78	0,17-0,50
	K-Hoja (%)	68	78	1,29-2,55
	S-Hoja (%)	69	78	0,07-0,18
	Ca-Hoja (ppm)	70	78	0,15-1,13
	Mg-Hoja (%)	71	78	0,08-0,30
	Mn-Hoja (ppm)	72	78	21-109
	Zn-Hoja (ppm)	73	78	8,0-86,0
	B-Hoja (ppm)	74	78	0,6-57,8
	Mo-Hoja (ppm)	75	78	0,7-3,0
	Cu -Hoja (ppm)	76	78	14,5-44,4
	Fe-Hoja (ppm)	77	78	57-3158
Determinaciones en pre cosecha comercial	Días entre siembra y cosecha (días)	78	171	86-187
	Plantas volcadas (%)	79	171	0-7
	Plantas quebradas (%)	80	171	0-42
	Valor PUSH Test (%)	81	171	0-58
	Incidencia de <i>Heliothis</i> en Espiga	82	171	0-100
	Incidencia de <i>Spodoptera</i> en Espiga	83	171	0-100
	Densidad a cosecha (pl m ⁻²)	84	171	2,8-7,75
	N° de espigas planta ⁻¹	85	171	0,6-1,4
	N° de espigas m ⁻²	86	171	3,74-8,63
	N° de granos planta ⁻¹	87	171	237-681
	Peso espiga (g)	88	171	69-253
	Peso 1000 granos (g)	89	171	233-413
	N° de granos estimado (N° m ⁻²)	90	171	983-4008
	Rendimiento (t ha ⁻¹)	91	171	2,59-16,20

Momentos	Variable	N° de orden	N	Rango
Determinaciones en precosecha comercial	N-residual en suelo (0-60 cm; kg ha ⁻¹)	92	171	7,0-98,4
	N-absorbido estimado (kg ha ⁻¹)	93	90	77-404
	N-mineralizado aparente (kg ha ⁻¹)	94	90	4-307
	N-Grano (%)	95	90	1,16-3,06
	P-Grano (%)	96	90	0.16-0.47
	K-Grano (%)	97	90	0.10-0,31
	Ca-Grano (ppm)	98	90	255-765
	Mg-Grano (%)	99	90	0.08-0,18
	Mn-Grano (ppm)	100	90	3,8-13,6
	Zn-Grano (ppm)	101	90	5,6-28,3
	B-Grano (ppm)	102	90	2,1-5,9
	Mo-Grano (ppm)	103	90	1,1-2,9
	Cu-Grano (ppm)	104	90	4,8-14,5
	Fe-Grano (ppm)	105	90	1,8-339

En este estado, sólo durante 2019, la condición de crecimiento del cultivo se determinó mediante la apreciación subjetiva del observador en una escala de 1= mala a 5= muy buena. Durante 2018, se extrajeron hojas de la espiga de plantas al azar hasta completar una muestra de aproximadamente 200 g de cada USI, la que fue llevada a laboratorio para la determinación de macro y micronutrientes. A madurez de los cultivos, se cosecharon 30 espigas de plantas contiguas en tres surcos de cada USI y se determinó el daño de plagas. Luego se trillaron las espigas y se pesaron los granos para la determinación del rendimiento expresado a humedad comercial (14,5%).

Posteriormente, se determinó el peso de los granos y, sólo durante 2019, una muestra de granos se remitió a laboratorio para la determinación de macro y micronutrientes. En las plantas de los mismos surcos se determinó a su vez el porcentaje de plantas volcadas, con inclinación >45° y quebradas, con presencia de tallo quebrado bajo el nudo de la espiga. Asimismo, en tres hileras de cada USI se realizó la evaluación de Push Test aplicando un golpe moderado a 15 plantas de cada hilera y registrando aquellas cuyo tallo se quebraba producto del golpe. En 2019, se tomaron muestras de suelo con sacabocado a la cosecha para la determinación de N y el cálculo de mineralización aparente durante el cultivo (Cuadro 1). Finalmente, los datos de cada variable se consolidaron en una planilla; previo a su análisis la base de datos fue sometida a evaluaciones de consistencia para evitar la introducción de errores de carga que sesgaran los resultados.

Es posible aplicar muchas formas de análisis a la matriz de datos conformada. Por simplicidad y atendiendo

a los objetivos del trabajo, el rendimiento de maíz se utilizó en el análisis como única variable de respuesta. En cada año, el análisis se llevó a cabo siguiendo un orden secuencial, acompañando la fenología del cultivo e identificando las variables clave de cada estado del maíz usando el procedimiento "stepwise" del programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2008) y un criterio de aceptación o rechazo de cada variable de $p < 0,15$. En una primera etapa y en cada año individualmente, a través del procedimiento "stepwise" se identificaron las variables independientes que mostraban mayor correlación con la variable de respuesta en cada momento de observación. De este modo, entre las posibles variables parcialmente correlacionadas entre sí, sólo aquellas estadísticamente significativas ($p < 0,10$) y que explicaban la variabilidad del rendimiento en mayor medida eran aceptadas como predictoras en el modelo. Secuencialmente, las variables significativas de un momento de observación se incluían en la base de análisis del siguiente momento de observación en el ciclo del cultivo. De este modo, el modelo de regresión final incorporaba las variables claves identificadas y sostenidas como determinantes del rendimiento del cultivo en la campaña por el procedimiento analítico.

El valor de r^2 y la significancia estadística del modelo final se usaron como medidas de calidad de ajuste (Mead y Curnow, 1983), mientras que el valor de significancia de la prueba de T se utilizó para evaluar cada variable.

Una vez identificados los factores determinantes según las observaciones llevadas a cabo en cada año, se utilizaron sólo las variables determinadas en ambos años y significativas en al menos alguno de ellos para calcular su relevancia y parámetros en un único

modelo de regresión múltiple usando nuevamente el procedimiento "stepwise" del programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2008). El fósforo aplicado como fertilizante fue incluido en esta etapa del análisis a raíz de observaciones preliminares. Así, el impacto cuantitativo sobre el rendimiento de maíz de todas las variables clave seleccionadas en el análisis parcial de cada año y de la variable adicionada, sobre los resultados de ambos años, se estimó a partir del ajuste de ese modelo usando los 171 datos de rendimiento de la base. Se estimaron también las correlaciones Pearson (Infostat, Di Rienzo *et al.*, 2008) entre las variables clave identificadas y todas las variables cuantitativas evaluadas durante los dos años con finalidad de identificar si alguna de ellas aparecía asociada a variables puntuales de la base de datos. Por simplicidad, sólo se presentan las variables cuyos "r" exceden el valor de $\pm 0,20$ ($p < 0,05$).

Consultas realizadas a profesionales de la región sugirieron la existencia de dos subregiones (Norte y Sur) atribuible a algunas variables ambientales y a diferencias en el manejo técnico de los cultivos. Para determinar la posible heterogeneidad ecológica y de manejo en la región relevada, se evaluó la diferencia estadística de los valores medios de las principales variables relevadas en las dos subzonas. En esta instancia se determinaron dos regiones (Norte y Sur del centro-norte de Córdoba; Figura 1) y los datos de ambos años se compararon a través de análisis de varianza (ANOVA). Posteriormente, los resultados observados en cada subregión se ajustaron con los estimados a partir del modelo general con dos años previamente obtenido. Se utilizó para ello un ajuste lineal forzado por el origen y se estimaron los intervalos de predicción con el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2008).

A fin de determinar en función de la variabilidad ambiental y de manejo el efecto de posibles rangos de decisión sobre el rendimiento del cultivo, los valores observados de cada variable clave en cada subregión se agruparon en terciles de rango superior, medio e inferior. Debido a la potencial importancia de la genética en los resultados del cultivo y a que la elevada dispersión de híbridos en los datos no permitió su inclusión en el modelo general, con fines descriptivos en esta etapa se incluyó una variable genética: híbridos con evento VIP= 1; híbridos sin evento VIP= 0 (Cuadro 1) y los valores de daño de *Heliothis* sp. asociados a cada rango de condición. De este modo, los productores podrían determinar el valor de sus variables clave y, a partir del modelo ajustado, estimar de manera simple el impacto

y la brecha posible de rendimiento esperable bajo sus condiciones ambientales y de manejo.

RESULTADOS

Del total de variables relevadas, sólo 15 resultaron inicialmente significativas ($p < 0,10$) y determinantes del rendimiento de maíz. De ellas, siete lo fueron en ambos años, mientras que cinco fueron significativas sólo en 2018 y tres sólo en 2019 (Cuadro 2). Con estos factores, los ajustes obtenidos explicaron el 73 y 64% de la variabilidad del rendimiento en 2018 y 2019, respectivamente. Los parámetros del ajuste de aquellas variables que resultaron significativas en ambos años son una medida de la incidencia de ese factor sobre el rendimiento del cultivo. Estos parámetros, mantuvieron sus signos y difirieron levemente en magnitud, a excepción de la incidencia de *Heliothis* en espiga que tuvo signo negativo en 2018 y positivo en 2019 (Cuadro 2). Entre las variables que sólo fueron significativas en algún año, la concentración de P-foliar y la cobertura de rastrojo, medidas sólo en 2018, fueron las de mayor impacto ($p < 0,01$) en el primer año de observaciones, mientras que la condición del cultivo en floración ($p < 0,001$) lo fue en 2019 (Cuadro 2).

El análisis de aquellas variables que habían sido significativas en alguna de las dos campañas (Cuadro 2), permitió identificar un conjunto de ocho variables independientes significativas que explicaron el 52% (R^2 , $p < 0,001$) de la variabilidad de los resultados de maíz de dos campañas en una región de algo más de dos millones de hectáreas (Figura 1; Cuadro 3). El 69% de la varianza del modelo ajustado correspondió a variables ambientales climáticas: lluvias totales acumuladas en el ciclo (mm) entre el 1/11 y el 29/4; y de suelo: contenido de K (meq 100 g^{-1} de 0-20 cm) y N a la siembra (kg ha^{-1} en 0-60 cm). En tanto, el 19% de la varianza se explicó por decisiones relacionadas con la estructura del cultivo: fecha de siembra, expresada en días desde el 1/11 y densidad de plantas logradas (pl m^{-2}); el 2% por el manejo de la nutrición del cultivo: P- P_2O_5 del fertilizante expresado en kg ha^{-1} ; y el 10% restante por el manejo de la protección y estado a cosecha del cultivo: porcentaje de incidencia de *Heliothis* en espiga y de plantas quebradas en precosecha.

Las correlaciones lineales entre las variables clave y las restantes variables fueron en general de baja magnitud, como era esperado (Cuadro 4). Sólo tres variables mostraron un coeficiente de correlación superior a 0,5; Las lluvias del ciclo se correlacionaron

Cuadro 2. Factores determinantes del rendimiento del cultivo de maíz en el centro-norte de la provincia de Córdoba en dos años. Se indica la significancia y el parámetro de las variables que resultaron significativas en el ajuste del modelo (sd= sin datos). Las unidades se refieren a los parámetros ajustados del modelo de regresión lineal múltiple para cada variable clave identificada.

Variables clave	2018		2019		Unidades
	Significancia	Parámetro	Significancia	Parámetro	
Lluvias total (entre 1/11 y 29/4)	p<0,05	7	p<0,01	5,2	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
K (meq 100 g ⁻¹ ; 0-20 cm)	p<0,01	1693	p<0,05	770	kg ha ⁻¹ meq ⁻¹
N suelo (kg ha ⁻¹)	p<0,10	4	p<0,001	10,9	kg ha ⁻¹ N ⁻¹
Fecha de siembra (días desde	p<0,001	-69	p<0,01	-47	kg ha ⁻¹ día ⁻¹
Incidencia <i>Spodoptera</i> (%)	p<0,05	-13	p<0,001	32	kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
Plantas quebradas (%)	p<0,05	-82	p<0,10	-69	kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
Densidad (pl m ⁻²)	p<0,05	650	p<0,001	900	kg ha ⁻¹ pl ⁻¹
Cobertura de rastrojo (%)	p<0,01	13	p>0,10		kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
Riego (mm)	p<0,10	27	sd		kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
Incidencia de Green SNAP (%)	p<0,10	-65	p>0,10		kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
Incidencia de <i>Heliothis</i> en espiga (%)	p<0,10	-7	p>0,10		kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
P-Hoja (%)	p<0,01	2755	p>0,10		kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
S (ppm; 0-20 cm)	p>0,10		p<0,05	-19	kg ha ⁻¹ ppm ⁻¹
Genotipo VIP3 (0= No; 1= Sí)	sd		p<0,05	731	kg ha ⁻¹ valor ⁻¹
Condición de floración (escala 1-5)	sd		p<0,001	598	kg ha ⁻¹ valor ⁻¹
R ² y significancia del modelo	0,73 (p<0,001)		0,64 (p<0,001)		

Cuadro 3. Factores determinantes del rendimiento del cultivo de maíz en el centro-norte de la provincia de Córdoba. El modelo selecciona entre 14 variables (ver Cuadro 2) con 171 datos relevados en dos años para cada variable. Se indica el parámetro de las variables seleccionadas en el procedimiento stepwise del ajuste del modelo, el error estándar (E.E.), los límites inferior (LI) y superior (LS) del intervalo de confianza de cada parámetro, la significancia, el factor de inflación de la varianza (FIV) y las unidades de los parámetros ajustados son presentados. Además, se incluyen el R² y significancia del modelo.

Variable	Parámetro	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	Significancia	FIV	Unidades
Lluvias total (entre 1/11 y 29/4; mm)	12,6	1,2	10,3	15,0	<0,0001	1,09	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
K (meq 100 g ⁻¹ ; 0-20 cm)	755	257	248	1263	<0,001	1,12	kg ha ⁻¹ meq ⁻¹
N suelo (kg ha ⁻¹)	10,5	2,4	5,8	15,1	<0,0001	1,14	kg ha ⁻¹ kg N ⁻¹
Fecha de siembra (días 1/11)	.58	9	-77	-40	<0,0001	1,41	kg ha ⁻¹ día ⁻¹
Densidad (pl m ⁻²)	460	140	180	750	<0,001	1,40	kg ha ⁻¹ pl ⁻¹
P-P2O5 fertilizante (kg ha ⁻¹)	16	9	-1	34	<0,10	1,27	kg ha ⁻¹ kg P ⁻¹
Plantas quebradas (%)	-91,8	25,9	-143,1	-40,6	0,001	1,17	kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
Incidencia de <i>Heliothis</i> en espigas (%)	7,8	3,1	-13,9	-1,7	<0,05	1,19	kg ha ⁻¹ (%) ⁻¹
R ² y significancia de modelo	0,52 (p<0,0001)						

positivamente con las ocurridas durante el período vegetativo de los cultivos ($r= 0,72$), el contenido de K en los suelos en presembrado con la relación K/Mg de los mismos ($r= 0,66$) y los valores de N-suelo con los de N-alcanzado ($r= 0,82$; Cuadros 1 y 4). Muchas de las variables clave identificadas aparecieron significativa ($p<0,05$) aunque débilmente asociadas, en primer lugar,

a la condición de sitio en presembrado y, en segundo lugar, a enfermedades o plagas (Cuadro 4).

Al reunir el total de los datos relevados durante los dos años del estudio según subregiones (Figura 1) se pudo analizar adecuadamente la existencia de diferencias intrarregionales en diferentes variables en el área relevada. La subzona Norte y la Sur de la región

Cuadro 4. Valores del coeficiente de correlación (r) de Pearson entre las variables clave identificadas en el modelo general (Cuadro 3) y todas las variables determinadas en ambos años del estudio. Se presentan sólo las variables cuya correlación excede el valor de $\pm 0,20$ ($p < 0,05$). Se indica el momento de determinación de las variables y su número de orden según lo referido en el Cuadro 1. Lluvias: lluvias totales (entre 1/11 y 29/4; mm); K-Suelo: K (meq 100 g^{-1} ; 0-20 cm); N-Suelo: N Suelo (kg ha^{-1}); F-Siembra: fecha de siembra (días 1/11); Densidad: densidad (pl m^{-2}); P-Fert: P- P_2O_5 fertilizante (kg ha^{-1}); PI-Queb: plantas quebradas (%); Inc-Hel: incidencia de *Heliothis* en espiga (%).

Momentos	Variables clave															
	Lluvias		K-Suelo		N-Suelo		F-Siembra		Densidad		P-Fert		PI-Queb		Inc-Hel	
	N°	r	N°	r	N°	r	N°	r	N°	r	N°	r	N°	r	N°	r
Presiembra			8	0,27	5	0,35	2	0,32	16	-0,31	7	-0,29	17	0,28		
			9	0,40	9	0,21	13	0,28	24	-0,23	10	-0,28	20	0,24		
			16	0,32	13	0,26	16	0,24	25	-0,27	16	-0,22	21	0,24		
			19	0,49	16	0,29	17	0,27			17	-0,26				
			20	0,26	17	0,24	24	0,38			24	-0,28				
			21	-0,26	23	0,25	25	0,25								
			22	0,66	24	0,23	27	-0,23					49			
			26	0,45									51			
Establecimiento	48	0,26			42	0,82	45	0,21	40	0,36	40	0,37			49	0,36
							48	-0,22	45	-0,38					51	0,35
							49	0,24								
Floración	56	0,29	59	-0,24	58	0,29	57	0,38	61	0,22	57	-0,23	59	0,49		
	61	0,21					61	-0,31			62	-0,24				
Lluvias	31	0,72														
	32	0,38														
	33	0,31														

Cuadro 5. Promedio de distintas características ambientales, de manejo y del rendimiento y sus componentes en cultivos de maíz de dos subregiones del área relevada. Se presenta la diferencia estadística de la prueba de F en el ANOVA; Unas pocas variables no significativas (ns; $p > 0,10$) son incluidas.

Variables	Subzonas		
	Sur	Norte	Significancia
Rendimiento (kg ha^{-1})	9947	8676	$p < 0,01$
N° granos estimado ($\text{N}^{\circ} \text{m}^{-2}$)	2933	2591	$p < 0,01$
Peso 1000 granos (g)	336,5	332,1	ns
Lluvias totales (entre 1/11 y 29/4; mm)	645	582	$p < 0,01$
Materia orgánica (%; 0-20 cm)	2,3	3,1	$p < 0,01$
CIC ($\text{meq}^{-1} 100 \text{ g}^{-1}$)	22,2	21,8	ns
N Suelo (kg ; 0-60 cm)	72	112	$p < 0,01$
P (ppm; 0-20 cm)	27	41	$p < 0,01$
K ($\text{meq}^{-1} 100 \text{ g}^{-1}$; 0-20 cm)	1,69	1,64	ns
S (ppm; 0-20 cm)	55,3	73,3	$p < 0,01$
Arena (%; 0-20 cm)	21,9	18,3	$p < 0,01$
Arcilla (%; 0-20 cm)	17,5	21,7	$p < 0,01$
Fecha de siembra (días 1/11)	44	53	$p < 0,01$
Cobertura de rastrojo (%)	72	70	$p < 0,01$
Uso genética VIP (%)	18	38	
Densidad (pl m^{-2})	5,98	5,54	$p < 0,01$
N-Fertilizante (kg ha^{-1})	54	25	$p < 0,01$
P- P_2O_5 fertilizante (kg ha^{-1})	14	3	$p < 0,01$
N-alcanzado (N suelo + N fert; kg ha^{-1})	125	137	ns
Uso fungicida (%)	28	21	ns
Uso insecticida (%)	28	36	ns

relevada presentaron diferencias significativas ($p < 0,10$) en el promedio de los años en varias características ambientales y de manejo (Cuadro 5).

Ante la existencia de diferencias entre las variables de las zonas Norte y Sur se evaluó y verificó si el modelo general (Cuadro 3) describía adecuadamente el conjunto de datos en cada región. El modelo general ajustó significativamente ($p < 0,0001$) los rendimientos de maíz de cada zona por separado a partir de las variables independientes clave relevadas en cada sitio en ambas zonas. Los valores de la pendiente de ajuste forzada por el origen alcanzaron 0,95 y 0,99 con un error estándar de 0,02 en ambos casos, en las subzonas Norte y Sur de la región centro-norte de Córdoba, respectivamente (Figura 2 a y b).

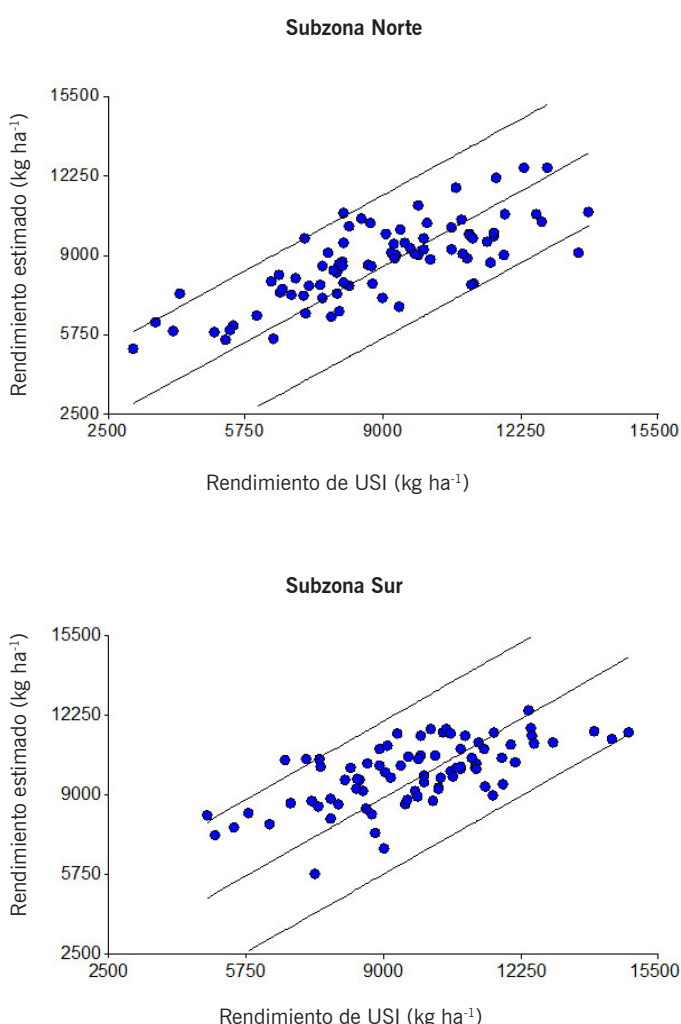


Figura 2. Relación entre el rendimiento (kg ha^{-1}) de las parcelas muestrales (USI) y los estimados a partir de los parámetros del modelo general de regresión (Cuadro 3) para los valores de sitio y manejo claves de cada lote en las subzonas Norte y Sur. Las bandas externas corresponden al intervalo de predicción de 95% de seguridad. La banda central corresponde al modelo de ajuste $y = 0,95x$ y $y = 0,99x$ obtenido para las subzonas Norte y Sur, respectivamente.

DISCUSIÓN

Los rendimientos del cultivo de maíz en la región centro-norte de la provincia de Córdoba presentaron marcadas diferencias intrarregionales en ambas campañas (Cuadro 1). De acuerdo con este trabajo, esa variabilidad sería el producto de diferencias en el régimen de las lluvias, los parámetros edáficos y las decisiones de manejo de los cultivos de maíz que, a su vez, determinan variaciones en los cultivos no sólo en el rendimiento y sus componentes sino en indicadores del estado nutricional relevados en planta a floración y a cosecha (Cuadro 1). A pesar de ello, una gran parte de la variabilidad de rendimientos fue explicada por un grupo reducido de variables, que representan el 13 y 11% del total de las variables analizadas en 2018 y 2019, respectivamente (Cuadro 2).

En maíz es reconocida la influencia que tienen sobre el rendimiento las condiciones del cultivo durante un breve período alrededor de floración (Andrade y Sadras, 2000). En condiciones de secano, las precipitaciones y la disponibilidad de agua en el suelo se encuentran entre los principales factores limitantes de la producción de maíz en las áreas productivas de la Argentina (Hall *et al.*, 1992; Andrade y Satorre, 2015). En correspondencia con estos trabajos, en este estudio las lluvias totales del ciclo explicaron una parte importante de la variabilidad de los resultados del maíz junto con unas pocas variables de sitio (Cuadros 2 y 3) mostrando un efecto medio sobre el rendimiento de $12,6 \text{ kg maíz ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Resultó llamativo que las precipitaciones alrededor del período de floración no fueran determinantes significativas del rendimiento a diferencia de lo observado por Casali *et al.* (2018) en la región subhúmeda del Chaco a partir de resultados de lotes y ensayos en condiciones de campo. Estos autores encontraron incrementos de $21,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de lluvias durante febrero, cercanas al período crítico de los cultivos en la región. En este trabajo, la textura franco-limosa dominante de los suelos y su elevada y poco variable capacidad de almacenaje de agua útil en los primeros 120 cm del suelo, particularmente en prefloración del cultivo (Cuadro 1, Cuadro 4), podrían haber contribuido a atenuar el impacto puntual de períodos sin lluvias y su relevancia en el período crítico del cultivo para la determinación del rendimiento a cosecha.

La elevada respuesta a la fertilización nitrogenada ha sido documentada en muchos trabajos de la Argentina y el mundo (e.g. Maddonni *et al.*, 2003). La variable asociada a este nutriente que explicó una parte de la

variabilidad del maíz en el estudio fue el contenido de N en los suelos previo a la siembra (Cuadro 2 y 3) a diferencia de otros trabajos semejantes en la Argentina en los que la variable clave identificada fue el N disponible a la siembra (N suelo + N fertilizante) (Gambín *et al.*, 2016; Vitantonio-Mazzini *et al.*, 2020) aunque es relevante destacar que ambas variables estuvieron fuerte y positivamente correlacionadas (Cuadro 4). Es posible que el contenido de N en los suelos refleje diferencias en su actividad biológica y capacidad de mineralización (Cuadro 1; valor medio y desvío estándar de mineralización aparente 150 ± 67 kg N ha⁻¹); De hecho, el contenido de N en suelo estuvo débil pero positivamente asociado a su contenido de materia orgánica (Cuadro 4) y fue mayor en las USI con antecesor leguminosa invernada (garbanzo) que en aquellas con antecesor trigo (datos no presentados). De manera semejante, es posible que la participación del contenido de K en el suelo como predictor esté explicando diferencias ambientales (Cuadro 4) antes que la existencia de limitaciones en la dotación del nutriente en los suelos de la región, ya que los mínimos niveles corresponden a dotaciones de alta disponibilidad para los cultivos (Cuadro 3; Sumner, 2000). Sin embargo, no es posible descartar un efecto directo a partir de este análisis. Es reconocido que la dinámica del K es compleja y que en muchas regiones el nivel de K disponible y la capacidad de reposición de los suelos puede haber disminuido por años continuos de agricultura (Pinochet *et al.*, 2005).

Los lotes de cultivos de maíz relevados se sembraron en un amplio período entre la primera quincena de noviembre y la segunda de enero, con un valor promedio de siembra en mediados de diciembre. Si bien las siembras tardías reducen el potencial daño de stress hídrico durante el período crítico de determinación del rendimiento (Otegui *et al.*, 2002) en este trabajo el retraso en la fecha de siembra sugiere mermas de rendimiento cercanas a 58 kg día⁻¹ en el período analizado (Cuadro 3). En trabajos semejantes realizados en la región núcleo productiva (Vitantonio-Mazzini *et al.*, 2020) se detectaron mermas en rendimiento de maíz por el retraso de la fecha de siembra en cultivos tardíos. Es esperable que, dentro del período de siembra explorado en la región, las siembras más tempranas permitan explorar un ambiente fototérmico más favorable para la determinación del número y peso de los granos. Esto junto con la densidad de siembra constituyen importantes moduladores del aprovechamiento de los recursos (Mercau, 2017) y de

las diferencias de rendimiento medio entre las subzonas delimitadas (Cuadro 5).

Los suelos de la región presentaron en general altos niveles de fósforo extractable (Cuadro 1), con algo más del 75% de las situaciones relevadas con contenido de P en suelo superior a 14 ppm (datos no presentados). A pesar de ello, el agregado de fósforo de fertilizante fue identificado como factor clave a ser incluido en el modelo general (Cuadro 3). En cultivos de maíz temprano, Vittantonio-Mazzini *et al.* (2020) en un análisis de ensayos a campo en múltiples sitios del área central productiva también encontraron influencia de la fertilización fosfatada sobre el rendimiento de maíz; Sin embargo, estos autores identificaron sólo influencia del fósforo del suelo en cultivos tardíos, a diferencia de lo observado en este trabajo. Es reconocido que los suelos franco limosos tienen baja capacidad de retención quedando una fracción importante del fósforo aplicado fácilmente disponible para el cultivo. Quintero (2002) sugiere que la fracción fácilmente disponible alcanza valores cercanos al 40-50% en la clase textural que domina la región relevada en este trabajo, lo que incrementaría la captura del nutriente y el desarrollo de raíces (Rubio, 2002). La respuesta del rendimiento a la mayor concentración de fósforo foliar en floración obtenida durante 2018 (Cuadro 2) parece reforzar la idea que la fertilización fosfatada contribuiría a incrementar el desarrollo radical y el aprovechamiento de recursos, entre ellos los nutrientes de baja movilidad en el suelo, tales como el fósforo y potasio, y a mejorar la condición fisiológica de las plantas del cultivo en la región, especialmente en etapas críticas de determinación del rendimiento de maíz (Uhart y Echeverría, 1998).

Dos factores ligados a la protección y manejo de los cultivos fueron identificados como clave en la determinación del rendimiento de maíz en la región. Uno de ellos aparece directamente ligado a la dinámica y manejo de la plaga *Heliothis* sp. La larva de esta plaga ejerce un daño directo por ingestión de granos en las espigas del cultivo, con marcadas diferencias entre genotipos transgénicos (Yang *et al.*, 2019) como los sembrados por los productores y relevados en este trabajo. Los niveles de incidencia en espiga fueron variables, detectándose niveles máximos de hasta 100% de incidencia. En el modelo este factor explicaría pérdidas de hasta 8 kg ha⁻¹ por cada porcentaje de incidencia, es decir, valores de pérdida de 800 kg ha⁻¹ en promedio con los máximos niveles de incidencia determinados en lotes productivos (Cuadro 1 y 5). Estos

resultados se encuentran dentro del rango reportado por Yang y colaboradores (2019) en Estados Unidos y Ermácora (comunicación personal) en la Argentina. Por otra parte, el porcentaje de plantas quebradas en precosecha también explicaría una parte de las variaciones de rendimiento del cultivo. A diferencia de la incidencia de una plaga, el quebrado de las plantas puede responder a múltiples factores e integrar el efecto de distintas decisiones de manejo, tales como la elección del genotipo, la densidad y la fecha de siembra y alteraciones en la condición fisiológica debido a la nutrición, enfermedades o plagas del cultivo. En alguno de los lotes relevados se determinó un máximo de 42% de plantas quebradas, lo que supone un marcado efecto de esta variable sobre el rendimiento en esa situación (Cuadro 1).

Tomando en cuenta la distribución total de valores observados de estas variables críticas para la determinación del rendimiento de maíz en la región, cada una de ellas se ordenó de forma creciente y se dividieron en terciles a fin de establecer rangos de condición (regular, media o buena) en cada subzona frente al impacto sobre el rendimiento (Cuadro 6). En un contexto agronómico, un productor o técnico de cualquier subzona de la región centro-norte podría considerar estos valores como referencia de diagnóstico para calificar cualitativamente su situación y tomar decisiones evaluando a partir del modelo general el impacto de las mismas sobre el rendimiento esperable del cultivo de maíz en su lote dentro del rango de variabilidad y rendimientos explorados de la región (Cuadros 5 y 6; Figura 2).

Cuadro 6. Límites y rangos de condición para factores clave en la determinación del rendimiento de maíz de dos subzonas del centro-norte de la provincia de Córdoba. Los valores corresponden a los límites y rangos de terciles de la distribución empírica de todas las determinaciones a lo largo de dos años.

SUBREGIÓN SUR		Condición		
Variable	Unidades	Regular	Media	Buena
Lluvias ciclo	(mm; 1/11-29/4)	<400	400-700	>700
K suelo	(meq ⁻¹ 100 g ⁻¹)	<1,3	1,3-2,1	>2,1
Nitrógeno en suelo	(kg N ha ⁻¹ en 0-60 cm)	<50	50-90	>90
Genotipo VIP3	(0= No; 1= Sí)	0	0	1
Fecha de siembra	(días desde 1/11)	>53 (>23-dic)	53-44 (23- 14-dic)	<44 (< 14-dic)
Fósforo aplicado	(kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	0-26	>26
Densidad lograda	(pl ha ⁻¹)	<55.000	55-63.000	>63.000
PI quebradas a cosecha	(%)	>2	0-2	0
PI dañadas en esp.	(%; sin VIP)	>80	50-80	<50
	(%; con VIP)	0	0	0
SUBREGIÓN NORTE		Condición		
Variable	Unidades	Regular	Media	Buena
Lluvias ciclo	(mm; 1/11-29/4)	<400	400-700	>700
K suelo	(meq ⁻¹ 100 g ⁻¹)	<1,3	1,3-2,1	>2,1
Nitrógeno en suelo	(kg N ha ⁻¹ en 0-60 cm)	<70	70-130	>90
Genotipo VIP3	(0= No; 1= Sí)	0	0	1
Fecha de siembra	(días desde 1/11)	>62 (> 1-ene)	62-50 (31- 19-dic)	<50 (< 19-dic)
Fósforo aplicado	(kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	0-26	>26
Densidad lograda	(pl ha ⁻¹)	<50.000	50-59.000	>59.000
PI quebradas a cosecha	(%)	>2	0-2	0
PI dañadas en esp.	(%; sin VIP)	>80	50-80	<50
	(%; con VIP)	0	0	0

CONCLUSIONES

El trabajo incorporó un cuidadoso proceso de relevamiento de múltiples variables a lo largo del ciclo de los cultivos establecidos bajo condiciones ambientales

y de manejo frecuentes de productores de la región centro-norte de la provincia de Córdoba. El análisis identificó unas pocas variables responsables de una gran parte de la variación del rendimiento encontrada

a lo largo de dos años en esa región y brindó rangos de referencia a partir de condiciones locales para evaluar la condición tecnológica o de estado de esas variables. La aproximación analítica utilizada no consideró las posibles interacciones entre las variables identificadas y el rendimiento de los cultivos, los que podrían explicar una gran parte de la varianza residual del modelo ajustado. A pesar de ello, el trabajo mostró que las condiciones ambientales, lluvias, nitrógeno y potasio en el suelo a la siembra del cultivo, tuvieron gran importancia explicando la variabilidad de los rendimientos de maíz en la región. Si bien las lluvias en el ciclo del cultivo no se pueden manejar, las condiciones de suelo en el sitio podrían ser evaluadas en análisis tempranos (presiembrado) y contribuir a diferenciar situaciones frente a la planificación o manejo del cultivo. Por otra parte, la elección de la densidad y la fecha de siembra tuvieron un impacto importante sobre los rendimientos. El manejo de la fertilización y la protección del cultivo, especialmente vinculada al impacto y manejo de una plaga y de enfermedades en conjunto explicaron

el 12% de la varianza de los resultados estimados a partir del modelo general simple propuesto. De estos, el porcentaje de plantas quebradas sería el de mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo, por cuanto el análisis orientado a moderar su incidencia en los cultivos merecería mayor atención por parte de productores, investigadores y genetistas. Si bien es necesaria más información para confirmar los resultados obtenidos, las diferencias de manejo de la estructura de los cultivos entre las subzonas consideradas sugiere la necesidad de profundizar la investigación de estas variables de sitio y manejo para transitar un camino que permita aumentar la productividad de los cultivos regionales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a UPL Argentina por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, los autores agradecen a los dos evaluadores anónimos y a la editora asociada por sus valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar varias secciones de la versión original del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F. H. y Sadras, V. (2000). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Argentina: Editorial Médica Panamericana.
- Andrade, F. H., Sadras, V. O., Vega, C. R. C. y Echarte L. (2005). Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean: Their application to crop management, modelling and breeding. En: M. Kang (Ed.). *Genetic and production innovations in field crop technology: new developments in theory and practice*. Binghamton, Nueva York, Estados Unidos: Haworth Press/CRC Press, pp. 51-101.
- Andrade, F. H. y Satorre, E. H. (2015). Single and double drop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, 177, 137-147.
- De la Casa, A. (1992) Modelo estadístico de pronóstico de rendimiento de maíz para la región semiárida de Córdoba basado en datos pluviométricos reales. *Agriscientia*, 9 (2), 87-96.
- Byerlee, D. y Heisey, P. W. (1996). Past and potential impacts of maize research in sub-Saharan Africa: a critical assessment. *Food Policy*, 21 (3), 255-277.
- Casali, L., Rubio, G. y Herrera, J. M. (2018). Drought and temperature limit tropical and temperate maize hybrids differently in a subtropical region. *Agronomy for Sustainable Development*, 38-49.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. I. (2008) *Infostat*. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Gambin, B. L., Coyos, T., Di Mauro, G., Borrás, L. y Garibaldi, L. A. (2016). Exploring genotype, management, and environmental variables influencing grain yield of late-sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems*, 146, 11-19.
- Gowon, D. T., Andersen J. C. y Biswas B. (1978). An economic interpretation of impact of phenologically timed irrigation on corn yield. *Western Journal of Agricultural Economics*, 3 (2), 145-156.
- Hall, A. J., Rebella, C. M., Ghersa, C. M. y Culot, J. Ph. (1992). Field-crop systems of the Pampas. En: C. J., Pearson (Ed.) *Field Crop Ecosystems series: Ecosystems of the world*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Sci. Publishers B.V., pp. 413-450.
- Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Batchelor, W. D., Bowen, W. T., Hunt, L. A., Pickering, N. B., Singh, U., Godwing, D. C., Baer, B., Boote, K. J., Ritchie, J. T. y White, J. W. (1994). Crops models. En: G. Y., Tsuji, G., Uehara y S., Balas (Eds.). *DSSAT*, 3 (2-2). Honolulu, Hawaii: University of Hawaii, pp. 95-244.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J. y Ritchie, J. T. (2003). DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265.
- Kaufmann, R. y Snell, S. E. (1997). A biophysical model of corn yield: integrating climatic and social determinants. *American Journal of Agricultural Economics*, 79 (1): 178-190.
- Kaylen, M. S. y Koroma, S. S. (1991). Trend weather variables and the distribution of U.S. corn yields. *Review of Agricultural Economics*, 13, 249-258.
- Liu W. T. H., Botner, D. M. y Sakamoto C. M. (1989). Application of CERES-Maize Model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45 (3-4), 299-312.

- Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 325-345.
- Maddonni, G. A., Ruíz, R. A., Vilariño, P. y García Salamone, I. (2003). Fertilización de los cultivos de grano. En: E. H., Satorre, R. L., Benech Arnold, G. A., Slafer, E. B., de la Fuente, D. J., Miralles, M. E., Otegui y R., Savin (Eds.). *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía.
- Mead, R. y Curnow, R. N. (1983). *Statistical methods in agriculture and experimental biology*. Londres, Nueva York, Chapman and Hall.
- Mercau, J. (2017). Fecha de siembra y eficiencia en el uso de recursos. En: L., Borrás y S., Uhart (Eds.). *El mismo maíz, un nuevo desafío*. Argentina: Dow Agrosience, pp. 46-52. Libro digital pdf.
- Mercau, J. L., Sadras, V. O., Satorre, E. H., Messina, Balbi, C., Uribe Larrea, M. y Hall, A. J. (2001). On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agricultural Systems*, 67, 83-103.
- Otegui, M. E., Mercáu, J. L. y Menéndez, F. J. (2002). Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. En: E. H., Satorre (Ed.). *Guía Dekalb del cultivo de maíz*. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario, pp. 171-184.
- Pinochet, D. T., Azúa, P. G. y MacDonald, R. H. (2005). Dinámica del potasio en un transecto de suelos derivados de materiales volcánicos y metamórficos. *INPOFOS Informaciones agronómicas*, 25, 1-4.
- Quintero, C. E. (2002). Dosificación del fósforo según tipo de suelos. INPOFOS Edición especial del Simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosfórica" XVIII Congreso Argentino de la ciencia del suelo. *INPOFOS, Informaciones agronómicas*, 16, 8-10.
- Ritchie, S. W. y Hanway J. J. (1982). How a corn plant develops. Iowa State University special report N° 48.
- Rubio, G. (2002). Conectando el fósforo del suelo con la planta. INPOFOS Edición especial del Simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosfórica" XVIII Congreso Argentino de la ciencia del suelo. *INPOFOS, Informaciones agronómicas*, 16, 19-23.
- Satorre, E. H., Benech Arnold, R. L., Slafer, G. A., de la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui, M. E. y Savin, R. (2003). *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía, 783 pp.
- Satorre, E. H., Micheloud, J. y Calp, D. (2014). Maicero V2- Herramienta auxiliar del proceso de toma de decisiones en los planteos productivos de la región maicera Argentina. Convenio AACREA - Profertil, Unidad Organizacional de Investigación y Desarrollo, AACREA.
- Schlenker, W. y Roberts, M. J. (2006). Nonlinear effects of weather on corn yields. *Review of agricultural economics*, 28 (3), 391-398.
- Sumner, E. M. (2000). Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. Presentado en el VIII Congreso Argentino de Siembra Directa, AAPRESID. Mar del Plata, 16-18 de agosto de 2000, 16 pp. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/2549DCC5177210A303257967007E015C/\\$FILE/AA%205.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/2549DCC5177210A303257967007E015C/$FILE/AA%205.pdf)
- Uhart, S.A. y Echeverría, H. E. (1998). El rol del nitrógeno y el fósforo en la producción de maíz. Morgan-Mycogen (Ed.). *Boletín Técnico Morgan-Mycogen*. Buenos Aires, Argentina, 48 pp.
- Urban, D., Roberts, M. J., Schlenker, W. y Lobell, D. B (2012). Projected temperature changes indicate significant increase in interannual variability of U.S. maize yields. *Climatic Change*, 112, 525-533.
- Vitantonio-Mazzini, L. N., Borrás, L., Garibaldi, L. A., Pérez, D. H., Gallo, S. y Gambin, B. L. (2020). Management options for reducing maize yield gaps in contrasting sowing dates. *Field Crops Research*, 251, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107779>
- Yang, F., González, J. C. S., Williams, J., Cook, D. C., Gilreath, R. T. y Kerns, D. L. (2019). Occurrence and ear damage of *Helicoverpa zea* on transgenic *Bacillus thuringiensis* maize in the field in Texas, U.S. and its susceptibility to vip3a protein. *Toxins (Basel)*, 11(2), 102. DOI: 10.3390/toxins11020102.
- Zaffanella, M. J. y Zaffanella M. G (1960). Rendimientos decrecientes del maíz en relación con factores edafoclimáticos. *Revista IDIA*, 150, 33-43.
- Zanon, A. J., Streck, N. A. y Grassini, P. (2016). Climate and management factors influence soybean yield potential in a subtropical environment. *Agronomy Journal*, 108 (4), 1447-1454.