



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE PRODUCIBILIDAD DE SEMILLA HÍBRIDA EN LINEAS ENDOCRIADAS DE MAÍZ (*ZEAMAYS*, L.): CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA.

Ramos ME¹; Torrent I¹; Lorea RD^{2,3}

¹Bayer Crop Science, Pergamino, Buenos Aires, Argentina

²Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, INTA, Buenos Aires, Argentina

³Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Pergamino, Buenos Aires.

Evaluation of Hybrid Seed Producibility Potential in Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines: Phenotypic Characterization.

Global maize production is based primarily on single-cross hybrids, or F1 varieties, which maximize the exploitation of hybrid vigor, or heterosis. This phenomenon is associated with increases in organ size, growth and development rates, biomass accumulation, and grain yield in the F1 offspring compared to the parent lines from which they originated. This study aimed to characterize the genotypic and phenotypic variability of a panel of 170 inbred lines belonging to the temperate maize breeding program of the INTA Pergamino Experimental Station. Phenotyping was performed during the 2021/22 growing season in four environments within the core maize-producing region of Argentina, allowing for the identification of the best female and male parents in terms of hybrid productivity. Based on the evaluations, 17 superior lines were selected as female parents and 16 outstanding lines as male parents. For the selection of female parents, priority was given to the traits REND, PMS, ALTE, ALTP, TAP, EXP, E50D, and P50D, while for the male parents, the main traits considered were TAP, EXP, E50D, P50D, and ALTP.

Palabras Clave: maíz, líneas endocriadas, producibilidad, selección

Keywords: maize, inbred lines, producibility, selection

Introducción

La producción mundial de maíz se sustenta principalmente en híbridos simples o de primera generación filial (F1), en los cuales se maximiza la expresión del vigor híbrido o heterosis. Este fenómeno se manifiesta mediante incrementos en el crecimiento, la acumulación de biomasa y el rendimiento en grano de la descendencia F1 respecto de las líneas endogámicas que les dieron origen (Duvick, 2005).

La depresión por endocria reduce el rendimiento de las líneas parentales y aumenta los costos de producción de semilla, mientras que la obtención continua de nuevos híbridos requiere desarrollar y evaluar un elevado número de líneas endogámicas mediante ensayos de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE).

En este contexto, la selección de parentales no debe basarse exclusivamente en el rendimiento de los híbridos producidos. En las líneas femeninas, la productividad constituye un atributo determinante para maximizar la producción de semilla híbrida, mientras que en las líneas masculinas adquieren especial importancia los caracteres relacionados con la producción y liberación de polen. La morfología de la panoja, particularmente su tamaño, arquitectura y grado de excursión, influye directamente



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

sobre la cantidad de polen disponible y sobre la eficiencia de la fecundación. Sin embargo, los programas de mejoramiento han tendido a seleccionar indirectamente panojas de menor tamaño debido a su asociación negativa con el rendimiento en grano, lo que puede comprometer la producción comercial de semilla híbrida.

Otro aspecto fundamental es la sincronía floral entre ambos parentales. El conocimiento de los ciclos de floración, junto con la capacidad de producción y liberación de polen de las líneas masculinas, permite diseñar esquemas de siembra y relaciones de surcos que optimicen la polinización, mejoren el rendimiento en semilla híbrida y favorezcan la pureza genética del producto final.

En este trabajo se define la producibilidad de semilla híbrida como la aptitud de una línea endogámica para participar eficientemente en la producción comercial de híbridos, considerando de manera integrada su productividad, estabilidad y desempeño reproductivo durante los cruzamientos. Con base en este enfoque, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar fenotípicamente un panel de líneas endogámicas pertenecientes al programa de mejoramiento de maíz templado de la EEA INTA Pergamino e identificar aquellas con mayor potencial como parentales femeninos y masculinos para la producción de semilla híbrida.

Materiales y Métodos:

Se evaluaron 170 líneas endocriadas de maíz templado pertenecientes al programa de mejoramiento de maíz de la EEA INTA Pergamino, correspondientes a más de 40 orígenes diferentes. Los ensayos tuvieron un diseño en bloques completos aleatorizados con 2 repeticiones; los mismos se realizaron en las localidades de Hughes (Provincia de Santa Fe), Chacabuco, Pergamino y Rojas (Provincia de Buenos Aires), durante la campaña 2021/22 (Tabla 1). La unidad experimental fue de 2 surcos de 5 m de largo con una distancia entre hileras de 0,52 m, la densidad de plantas fue de 110.000 plantas por hectárea (pl/ha).

Localidad	Coordenadas		FS	FC
Chacabuco	-34.4784	-60.1673	11/11/2021	23/04/2022
Hughes	-33.8082	-61.4413	02/12/2021	11/05/2022
Pergamino	-33.8652	-60.6729	09/11/2021	20/04/2022
Rojas	-34.1569	-60.9121	23/11/2021	25/04/2022

Tabla 1: Coordenadas geográficas, fecha de siembra (FS) y fecha de cosecha (FC) de las localidades donde fueron realizados los ensayos de evaluación de 170 líneas de maíz.

Las variables recolectadas en cada uno de los ensayos se dividieron en:

a.- Variables preponderantes para la calificación de parentales femeninos:

Floración:

- 50% de estigmas (**E50D**), días desde siembra al momento en que el 50% de las plantas de la parcela tengan desarrollo de estigmas visibles.

Post-Floración:

- Altura de la espiga en cm (**ALTE**) y altura de planta en cm (**ALTP**).

Cosecha:

- Rendimiento (**REND**) expresado como kg/unidad de superficie y peso de mil semillas (**PMS**) expresado en gramos.



b.- Variables preponderantes para la calificación de parentales masculinos:

Floración:

- 50% de polen (**P50D**): días desde siembra al momento en que el 50% de las plantas de la parcela tengan desarrollo de polen fértil; y excursión de panoja (**EXP**): cuando el 50% de las plantas están liberando polen (P50D) se evaluó según escala la excursión o despegue de las panojas por encima de las hojas aplicando una escala de 1 a 9 donde: 1: panoja claramente por encima de las hojas superiores, sin área foliar cubriendo la misma, 5: panoja visible, 1 o 2 hojas alrededor de las ramificaciones, 9: panoja escondida en el cogollo (figura 1, en casos intermedios se asignaron valores de 3, 5 y 7).



Figura 1: Comportamiento para **EXP** con valores de 1, 5, y 9 de izquierda a derecha.

- Tamaño de panoja (**TAP**): se observó cuando el 50% de las plantas estaban liberando polen (P50D). Ponderamos el tamaño de la panoja, la cantidad de ramificaciones y la cantidad de flores sobre las ramificaciones y el raquis central. Se utilizó la siguiente escala de 1 a 9 (figura 2, en casos intermedios se asignaron valores de 3, 5 y 7): 1: panoja bien desarrollada con buen tamaño de raquis principal, 5: panoja con tamaño intermedio, 9: panoja con escaso crecimiento.



Figura 2: Comportamiento para **TAP** 1, 5, y 9 de izquierda a derecha.

Post-Floración:

- Intervalo antesis-silking (**ASI**) en días, se calculan los días desde siembra al momento en que el 50 % de las plantas de la parcela tengan desarrollo de polen fértil a lo cual se le resta los días desde siembra al momento en que el 50 % de las plantas de la parcela tengan desarrollo de estigmas visibles. Entendiendo como silking a la aparición de estigmas visibles en la punta de la espiga.

El análisis de los datos se realizó a través la implementación de modelos lineales mixtos, en el que los genotipos se consideraron como efecto aleatorio, mientras que los ambientes y la interacción GxA también se ajustaron como efectos aleatorios.

La normalidad de los residuos se verificó mediante la prueba de Shapiro–Wilks (1965), utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo, 2017). A partir del modelo ajustado se obtuvieron los BLUPs (Best Linear Unbiased Predictions, Mejor Predicción Lineal Insesgada) para los efectos de genotipos, ambientes y sus interacciones, los cuales se utilizaron como estimadores insesgados bajo el enfoque de modelos mixtos.

Para la estimación de la heredabilidad en sentido amplio (H^2) de los caracteres evaluados para cada ambiente y a través de los ambientes se utilizó el método descripto por Holland et al. (2003): $H^2 = \sigma^2G / [\sigma^2G + (\sigma^2GE/e) + \sigma^2 e / re]$

Resultados:

El análisis mediante modelos lineales mixtos evidenció que los efectos de genotipo, ambiente y de la interacción genotipo $\times$ ambiente ($G \times E$) fueron significativos para la mayoría de los caracteres evaluados, indicando la existencia de variabilidad fenotípica entre las líneas endogámicas y respuestas diferenciales frente a las condiciones ambientales de evaluación (Tabla 1). Estos resultados justifican el análisis conjunto y por ambiente de los caracteres relacionados con la producibilidad de semilla híbrida. Con el propósito de profundizar en el comportamiento de las líneas, se estimaron los componentes de varianza y los valores de heredabilidad para cada ambiente y a través de los ambientes, permitiendo cuantificar la contribución relativa de los efectos genéticos, ambientales y de su interacción sobre la variación fenotípica observada.

EFEECTO	E50D	ALTE	PMS	REND	P50D	ALTP	TAP	EXP
GENOTIPO	14,478	11,752	789,470	0,901	11,750	297,770	0,541	0,729
AMBIENTE	5,281	4,446	235,020	0,160	4,450	223,200	0,210	0,418
INTERACCIÓN	1,212	1,095	34,840	0,284	1,100	59,940	0,295	0,549
RESIDUAL	1,543	1,387	287,540	0,297	1,390	118,920	0,397	0,517

Tabla 2: Componentes de variancias obtenidos para todas las variables.

En cuanto a los efectos que regulan los caracteres E50D, P50D, TAP, EXP, ALTP, REND, las estimaciones de H^2 fueron de 0,439, 0,441, 0,426, 0,15, 0,335, 0,489, indicando que el 43,9%, 44,1%, 42,6%, 51,5%, 33,5%, 48,9% y % respectivamente, de la variabilidad encontrada se debe a efectos genéticos entre las líneas evaluadas.

Posteriormente, a partir de los valores BLUP obtenidos del modelo mixto, se realizó la comparación de medias ajustadas de los genotipos, lo que permitió identificar líneas con desempeño superior como potenciales parentales femeninos y masculinos para la producción de semilla híbrida. En base a los BLUPs obtenidos, se calcularon las medias ajustadas para las variables estudiadas de los genotipos a través de los ambientes y por ambiente. Se detallan en la figura 3 las líneas que de acuerdo con sus características se destacan como progenitores femeninos.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

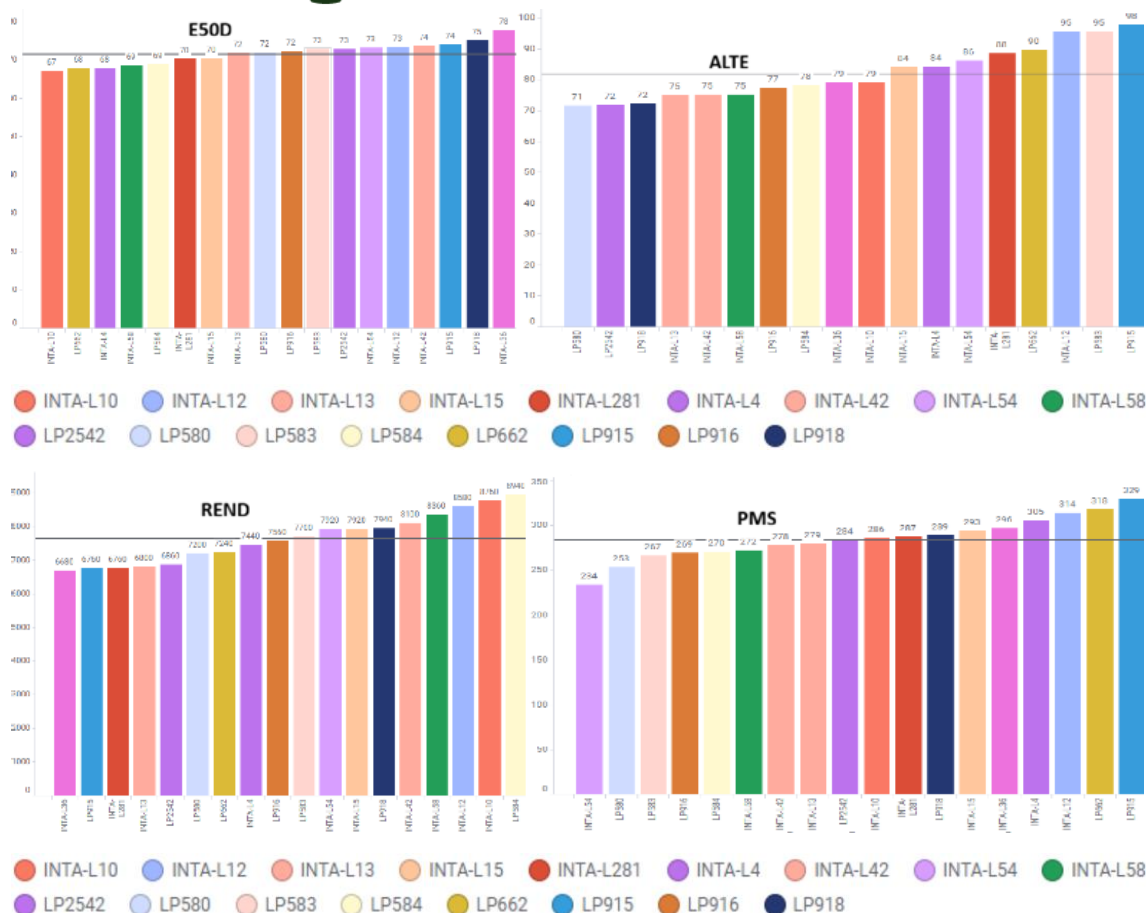


Figura 3: Medias ajustadas para las variables estudiadas de los genotipos destacados como progenitores femeninos a través de los ambientes **E50D**= 50% de floración femenina **ALTE**= Altura de espiga **PMS**= Peso de mil semillas **REND**= Rendimiento.

En base a los BLUPs obtenidos del modelo lineal mixto implementado, se calcularon las medias ajustadas para las variables estudiadas de los genotipos a través de los ambientes y por ambiente. Se detallan en la figura 4 las líneas que se destacan de acuerdo con sus características como progenitores masculinos.

Con el objetivo de profundizar la comprensión de las relaciones entre los caracteres evaluados y su implicancia en la selección de parentales, se realizó un análisis de correlaciones fenotípicas entre las variables agro-morfológicas medidas en el panel de líneas (Tabla 2). Este enfoque permitió identificar asociaciones directas entre caracteres claves, complementando la información obtenida a partir de los modelos lineales mixtos.



50 AÑOS
PENSANDO
EL FUTURO

XIII
CONGRESO
NACIONAL
DE MAÍZ

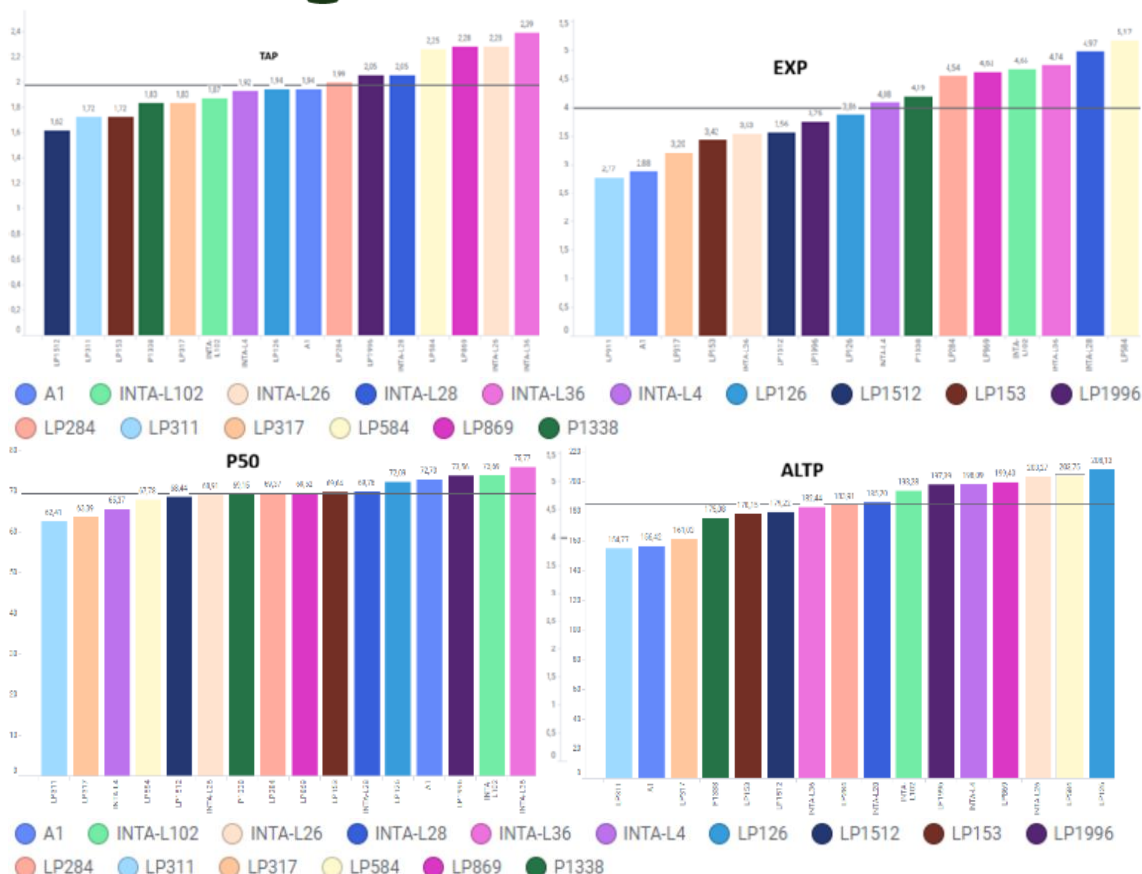


Figura 4: Medias ajustadas para las variables estudiadas de los genotipos destacados como progenitores masculinos a través de los ambientes. **P50D**= 50% de floración masculina **ALTP**= Altura de planta **TAP**= Tamaño de panoja **EXP**= Excursión de panoja.

	E50D	P50D	EXP	TAP	ALTE	ALTP	REND	PMS
E50D	1,00	0,00	1,8E-07	1,1E-03	6,8E-08	0,75	4,2E-03	0,31
P50D	0,87	1,00	0,01	0,54	2,8E-09	0,60	0,30	0,60
EXP	0,15	0,07	1,00	1,3E-04	6,2E-05	0,21	5,8E-04	0,03
TAP	-0,09	-0,02	0,11	1,00	0,04	1,00	8,0E-12	0,01
ALTE	0,15	0,16	0,11	-0,06	1,00	0,00	0,63	1,4E-04
ALTP	0,01	0,01	0,03	-1,7E-04	0,70	1,00	6,7E-08	0,08
REND	-0,08	0,03	0,10	0,19	0,01	0,15	1,00	1,2E-05
PMS	-0,03	-0,01	-0,06	-0,07	-0,11	-0,05	0,13	1,00

Tabla 2: Coeficientes de correlación de Pearson de los caracteres agro-morfológicos en el panel de 170 líneas en estudio: **E50D**= 50% de floración femenina **P50D**= 50% de floración masculina **EXP**= excursión de panoja **TAP**= tamaño de panoja **ALTE**= Altura de espiga **ALTP**= Altura de planta **REND**= Rendimiento **PMS**= Peso de mil semillas

Discusión:

En el conjunto de genotipos evaluados como potenciales parentales femeninos se identificaron materiales con elevado desempeño productivo, aunque con diferencias en atributos morfo-reproductivos que podrían condicionar su utilización en esquemas comerciales de producción de semilla híbrida. Estos resultados ponen de manifiesto que la aptitud de una línea como progenitor femenino depende de la integración de múltiples caracteres y no exclusivamente de su rendimiento.

Las líneas LP584 e INTA-L10 se destacaron por presentar uno de los mayores rendimientos del panel, acompañado de un intervalo antesis-estigmas (ASI) negativo de 1 a 1,5 días. Esta característica es de relevancia para tener en cuenta el riesgo de autofecundación y planificar las operaciones de despanojado durante la producción de híbridos. No obstante, una asincronía floral excesiva también podría limitar la eficiencia en la multiplicación de la propia línea parental, comprometiendo la disponibilidad de semilla base para campañas sucesivas (Hallauer, 2010).

De manera similar, las líneas LP916 y LP564 combinaron un comportamiento productivo favorable con alturas de planta relativamente reducidas (150–160 cm). Si bien esta característica puede contribuir a disminuir el riesgo de vuelco, también podría limitar la eficiencia del despanojado mecánico e incrementar la necesidad de intervenciones manuales, con el consecuente aumento de los costos de producción (Duvick, 2005). Los materiales como INTA-L12 y LP583 presentaron alturas superiores a los 245 cm, reflejando un elevado vigor vegetativo. Sin embargo, un porte excesivo puede dificultar las labores de despanojado, incrementar el riesgo de vuelco e incluso afectar la eficiencia operativa durante la producción de semilla híbrida (Hallauer, 2010).

En conjunto, estos resultados evidencian que la selección de parentales femeninos debe contemplar simultáneamente la productividad, la sincronía floral y la arquitectura de planta, ya que todos estos atributos determinan la eficiencia del proceso de producción de semilla híbrida (Annicchiarico, 2002).

El 15 % de las líneas evaluadas alcanzó rendimientos superiores a 6.500 kg ha⁻¹, valores altamente competitivos para materiales endogámicos destinados a la producción de semilla parental. Este desempeño evidencia el progreso alcanzado por el programa de mejoramiento y confirma la existencia de germoplasma con elevado potencial para su incorporación en esquemas comerciales de producción de híbridos.

Entre los atributos de mayor relevancia para la selección de parentales masculinos se encuentran el tamaño y la excursión de la panoja, la altura de planta y la sincronía floral, todos ellos estrechamente relacionados con la capacidad del parental masculino para aportar polen en cantidad y momento adecuados. Sobre la base de estos criterios se identificó un conjunto de 16 líneas con elevado potencial como parentales masculinos. Sin embargo, el análisis detallado de sus características evidenció que algunos materiales presentaron atributos que podrían limitar su utilización en esquemas comerciales de producción de semilla híbrida.

En relación con la ALTP, las líneas LP311, A1 y LP317 presentaron valores de 125,05; 128,24 y 137,10 cm, respectivamente. Si bien un porte reducido puede conferir mayor estabilidad frente al vuelco, también podría dificultar una adecuada dispersión del polen cuando estos materiales se utilizan como parentales masculinos, especialmente en esquemas de producción donde la diferencia de altura respecto del parental femenino condiciona la eficiencia de la polinización.

El análisis de correlaciones permitió identificar grupos de caracteres funcionalmente relacionados, aportando una base sólida para la interpretación conjunta de los resultados y para la definición de criterios de selección de parentales femeninos y masculinos en programas de mejoramiento. Para los atributos de floración femenina y masculina se observó una alta correlación positiva entre E50D y P50D, lo que confirma la estrecha relación entre ambas floraciones y valida el uso de ambos caracteres como indicadores consistentes del ciclo fenológico, tal como ha sido ampliamente

documentado en maíz (Hallauer, 2010; Liu, 2016). Asimismo, E50D y P50D mostraron asociaciones positivas con la ALTP y ALTE, indicando que los genotipos de ciclo más largo tendieron a presentar un mayor desarrollo vegetativo, en concordancia con lo reportado en estudios fisiológicos y de mejoramiento del cultivo (Duvick, 2005).

El REND presentó correlaciones positivas moderadas con el PMS del 13 % lo que sugiere que una mayor eficiencia en el llenado de grano y un uso más eficiente de la semilla contribuyen de manera directa a incrementos en la productividad, tal como ha sido reportado previamente en maíz (Hallauer, 2010).

Los caracteres reproductivos masculinos, la EXP y el TAP mostraron una correlación positiva del 11 %, indicando que una mayor excursión suele estar asociada a panojas de mayor tamaño. Estos rasgos resultan deseables para asegurar una provisión eficiente de polen en esquemas de cruzamientos controlados y en campos de producción de semilla híbrida, en concordancia con lo reportado para la morfología y funcionalidad de la panoja en maíz (Duvick, 2005; Hallauer, 2010).

Conclusiones:

La evaluación fenotípica realizada en múltiples ambientes permitió demostrar la existencia de variabilidad genética para los principales caracteres asociados a la producibilidad de semilla híbrida, así como cuantificar la influencia del ambiente y de la interacción genotipo $\times$ ambiente sobre su expresión. Las estimaciones de heredabilidad obtenidas indicaron que varios de estos caracteres presentan un adecuado potencial de respuesta a la selección.

La evaluación conjunta de atributos productivos, fenológicos y morfo-reproductivos permitió identificar líneas con elevado potencial como parentales femeninos y masculinos, evidenciando que la selección no debe basarse exclusivamente en el rendimiento, sino en un conjunto de caracteres que determinan la eficiencia del proceso de producción de semilla híbrida. En consecuencia, los criterios propuestos constituyen una base objetiva para la selección temprana de parentales dentro de programas de mejoramiento de maíz orientados a la producción de híbridos.

Bibliografía:

- Annicchiarico, P. (2002). Genotype x environment interactions: challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations.
- Bonell, M. L., Crepy, M. A., Conde, M. B., Fontana, M. L., & Pachecoy, M. I. (2021). Estabilidad del rendimiento de cultivares comerciales y líneas promisorias del programa de mejoramiento INTA-FLAR.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Duvick, D. N. (2005). The contribution of breeding to yield advances in maize (*Zea mays* L.). *Advances in agronomy*, 86, 83-145.
- Hallauer, A. R., Carena, M. J., & Miranda Filho, J. D. (2010). *Quantitative genetics in maize breeding* (Vol. 6). Springer Science & Business Media.
- Holland, J. B., Nyquist, W. E., Cervantes-Martínez, C. T., & Janick, J. (2003). Estimating and interpreting heritability for plant breeding: an update. *Plant breeding reviews*, 22(9-112).
- Liu, N., Du, Y., Warburton, M. L., Xiao, Y., & Yan, J. (2021). Phenotypic plasticity contributes to maize adaptation and heterosis. *Molecular Biology and Evolution*, 38(4), 1262-1275.