



MAÍZIFICANDO CONCIENCIA

XII CONGRESO NACIONAL DE MAÍZ

Eje

Genética y mejoramiento

8, 9 y 10 de Noviembre
Pergamino, BA
UNNOBA



Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Ministerio de Economía
Argentina

20
22





ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD FENOTÍPICA EN LÍNEAS ENDOCRIADAS DE MAÍZ CON MECANISMOS DE PLASTICIDAD VEGETATIVO-REPRODUCTIVA

Lutz, S.A.^{1,2,a}; Galizia, L.A.^{1,3,b}; López, C.G.^{4,5,c}; Maddonni, G.A.^{1,2,d}; Eyherabide, G.^{7,e}; D'Andrea, K.E.^{1,4,f}.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453, C1417DSE Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

² Instituto de Fisiología y Ecología Vinculado a la Agricultura, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IFEVA-CONICET), Av. San Martín 4453, C1417DSE Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

³ INTA Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, Av. Frondizi (Ruta 32) km 4.5, B2700, Pergamino, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

⁵ Universidad Nacional de Lomas De Zamora (UNLZ). Camino de Cintura km. 2, (1832) Lomas de Zamora, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

⁶ Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA). Monteagudo 2772, Pergamino, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

a slutz@agro.uba.ar; b galizia.luciana@inta.gob.ar; c cesarglopez63@yahoo.com.ar;

d maddonni@agro.uba.ar; e guillermo.eyherabide@gmail.com; f kdandrea@agro.uba.ar

ANALYSIS OF PHENOTYPIC VARIABILITY IN MAIZE INBRED LINES WITH VEGETATIVE-REPRODUCTIVE PLASTICITY MECHANISMS

Abstract

The combination of late sown and low planting density in maize has been adopted in restrictive environments. However, little is known about the most suitable genotype for these environments, which would promote the production of more than one fertile ear per shoot (prolificacy) and/or ears from secondary shoots (tillers). The existence of genotypic variability in these attributes is one of the most important aspects to start a breeding program. The objective of this work was to analyze the variability of traits related to vegetative-reproductive plasticity in a group of inbred lines from INTA Pergamino. For this, two late sown field trials were carried out with 13 inbreds at a planting density of 2 plants m⁻². Phenotypic variability for grain filled ears per plant was observed among inbreds, finding prolific and prolific-tillering genotypes. Grain yield and grain number also varied among inbreds, being these attributes lower in the second experimental year due to unfavorable environmental conditions. This data demonstrates the presence of phenotypic variability in vegetative-reproductive traits, suggesting the importance of gene control studies of these mechanisms.

Palabras claves

Maíz, Líneas endocriadas, Variabilidad fenotípica, Plasticidad vegetativo-reproductiva

Keywords

Maize, Inbred lines, Phenotypic variability, Vegetative-reproductive plasticity



Introducción

La producción de maíz en la Argentina se triplicó en la última década debido a la expansión del área cosechada (Maddonni et al., 2021). Este incremento en el área puede ser explicado por el desplazamiento de la frontera agrícola hacia ambientes más restrictivos, caracterizados como semiáridos (norte, oeste y suroeste de la Pampa ondulada) y que se encuentran fuera de la zona núcleo de altos rendimientos (Maddonni et al., 2021). En estos ambientes de menor potencialidad, limitados principalmente por el régimen pluviométrico y/o limitaciones edáficas para el almacenamiento o la extracción de agua por los cultivos, se han implementado diversas prácticas de manejo orientadas a generar estabilidad y rentabilidad en la producción, como la siembra tardía, la disminución de la densidad de siembra y el bajo aporte de nutrientes por fertilización (Rotili et al., 2019). En estos planteos productivos los agricultores suelen adoptar una estrategia de manejo defensiva para disminuir la probabilidad de pérdidas (Rotili et al., 2020). Si bien la combinación de fecha tardía y baja densidad de siembra ha sido adoptada exitosamente, poca o nula información se ha generado sobre la elección del genotipo más adecuado para aquellos ambientes de baja potencialidad. Las bajas densidades utilizadas promueven la producción de múltiples espigas por planta, sustentadas por más de una espiga fértil por vástago (prolificidad; Parco et al., 2020, 2022) y/o espigas de vástagos secundarios (macollos; Rotili et al., 2020). Ambos mecanismos han sido tenidos en cuenta escasamente por el mejoramiento, siendo una fuente de plasticidad vegetativo-reproductiva que podría resultar de interés en este enfoque productivo. En el marco del grupo de estudio y trabajo “Red de Ultra Baja Densidad en Maíz” se comenzaron a realizar estudios de las variaciones fenotípicas del macollaje en conjunto con la prolificidad en híbridos comerciales y su efecto sobre el rendimiento del cultivo de maíz en ambientes restrictivos (Rotili et al., 2019 y 2020; Parco et al., 2020 y 2022; D’Andrea et al., 2022). Sin embargo, la existencia de variabilidad genotípica en estos atributos de interés para dichos ambientes es uno de los aspectos más importantes para la elaboración de un plan de mejoramiento genético. Aún no se han abordado trabajos de esta naturaleza, que hayan evaluado dicha variabilidad en fuentes de germoplasma útiles (e.g., poblaciones de mapeo, líneas endocriadas e híbridos derivados en ensayos dialélicos) para estudios más detallados de control génico de estos caracteres que confieren plasticidad.

El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad de la plasticidad vegetativo-reproductiva (macollaje y prolificidad) en un grupo de líneas endocriadas de maíz del INTA Pergamino, para la posterior selección de líneas contrastantes y el desarrollo de híbridos que expresen los distintos patrones de plasticidad fenotípica (i.e., macolladores, prolíficos, macolladores-prolíficos y no macolladores-no prolíficos).

Materiales y métodos

Se llevaron a cabo dos ensayos a campo en la EEA Pergamino del INTA, Buenos Aires, Argentina (33°56’S, 60°34’W) durante las campañas 2020/21 (Exp.1) y 2021/22 (Exp.2). El material genético estuvo constituido por un conjunto de 13 líneas endocriadas desarrolladas por el programa de mejoramiento del INTA Pergamino (L1233, L1571, L3556, LP179, LP2542, LP4703, LP923, Protog., LP1044, LP598, Mac-1, Mac-2, LP1212). Las líneas fueron elegidas a priori por sus características contrastantes de plasticidad vegetativo-reproductiva (macolladoras, prolíficas, macolladoras-prolíficas y no macolladoras ni prolíficas) en condiciones de densidad de siembra normal. La línea Mac-2 fue evaluada solamente durante el Exp.1, la misma fue reemplazada por la



línea LP1044, durante el Exp.2. Se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados con 2 (Exp.1) y 3 (Exp.2) repeticiones. La densidad de siembra utilizada fue de 2 plantas m⁻² y las fechas de siembra fueron el 13 y el 11 de noviembre para el Exp.1 y Exp.2, respectivamente. Las parcelas constaron de tres surcos de 5,5 m de largo, separadas a 70 cm. Los ensayos fueron conducidos en seco sobre un suelo Argiudol Típico, fertilizados con N, P y S, y mantenidos libres de malezas, plagas y enfermedades. Se registró, diariamente, a lo largo del ciclo del cultivo la temperatura media y máxima del aire, la radiación solar global incidente y las precipitaciones, con una estación meteorológica ubicada en el sitio del ensayo. El registro de las temperaturas permitió calcular el índice de estrés térmico como la sumatoria de temperaturas máximas por encima de 35 °C.

Dentro de cada parcela, en toda la población de plantas, se cuantificó a madurez fisiológica (i) el número de espigas granadas, (ii) el número de granos, (iii) el peso individual de los granos y (iv) el rendimiento, discriminando por tipo de vástago y espiga (espigas apicales, sub-apicales y espigas de macollos). Adicionalmente, en 10 plantas marcadas por parcela, se registró la fecha de antesis del vástago principal y de macollos, como también la floración femenina de cada una de las espigas del vástago principal y de macollos. Los atributos fueron evaluados mediante análisis de la varianza (ANVA) para determinar la existencia de (i) variabilidad entre genotipos y (ii) interacción entre el genotipo (G) y el año experimental (A) utilizando el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2019). Asimismo, se realizaron análisis de regresión lineal para establecer las relaciones entre las variables analizadas.

Resultados

Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas resultaron contrastantes entre años. La temperatura media del aire durante la etapa vegetativa (V3-V14) fue más elevada en el Exp.2 (23.2 °C) que en el Exp.1 (21.9 °C). Esto se acentuó durante el periodo crítico (V14-R2), en el cual la temperatura media fue 2.5 °C más alta en el Exp.2 (25.4 °C) que en el Exp.1 (22.9 °C). En dicho período, durante el Exp.2, se registraron 12 días (40% del periodo) con valores de temperatura máxima mayores a 35 °C; llegando algunos días a registrar picos de 7 °C por encima de esta temperatura. En contraste, en el Exp. 1 hubo solo 4 días con temperaturas máximas por encima de 35 °C, las cuales estuvieron ubicadas fuera del período crítico y con menor magnitud (Fig. 1A). Así, las temperaturas máximas resultaron mayores en el Exp.2 (32.9 °C) que en el Exp.1 (29.9 °C). En este sentido, las temperaturas del Exp.2 fueron especialmente desfavorables para la línea más precoz (L1233) que para las líneas de floración más tardía (LP1044, LP598, MAC-1, LP1212), registrándose un importante índice de estrés térmico durante los 15 días previos y hasta la floración (Fig. 1A).

La radiación incidente, en cambio, fue similar entre años (en promedio, 26.5 MJ m⁻² d⁻¹) y para ambas etapas (etapa vegetativa y periodo crítico) (Fig. 1B). La precipitación acumulada desde la siembra en ambas campañas fue similar hasta aproximadamente los 70 días, momento en el cual en el Exp.2 comienzan a evidenciarse progresivamente mayores precipitaciones hasta llegar a los 600 mm, mientras que en el Exp.1 se acumularon 200 mm menos de precipitación al final del ciclo (Fig. 1B).

Patrones de expresión fenotípica. Rendimiento y componentes numéricos

Los resultados del presente estudio mostraron que la expresión de la plasticidad vegetativo-reproductiva varió significativamente entre años ($P < 0.05$) y entre las líneas analizadas



($P < 0.01$), con excepción del número de espigas apicales granadas que fue similar (≈ 1 espigas pl^{-1}) entre genotipos y años experimentales (Tabla 1). Así, para todos los rasgos analizados, la mayor variación observada (i.e., $>CV$) corresponde a las espigas provenientes de macollos y la menor variación a las espigas apicales.

En el Exp.1 las líneas presentaron dos patrones marcados de expresión fenotípica de plasticidad vegetativo-reproductiva: 6 con fenotipo prolífico (Mac-2, L3556, LP2542, LP598, L1233 y LP1212) y 6 con fenotipo prolífico-macollador (LP179, L1571, LP4703, Protog., LP923 y Mac-1) (Fig. 2A), con marcadas diferencias en número de espigas debidas a las espigas sub-apicales y/o de macollos (Tabla 1). En contraste, se evidenció una reducción en la cantidad de espigas granadas totales por planta en el Exp.2, atribuidas principalmente al menor número de espigas sub-apicales y de macollos (Tabla 1; Fig. 2B).

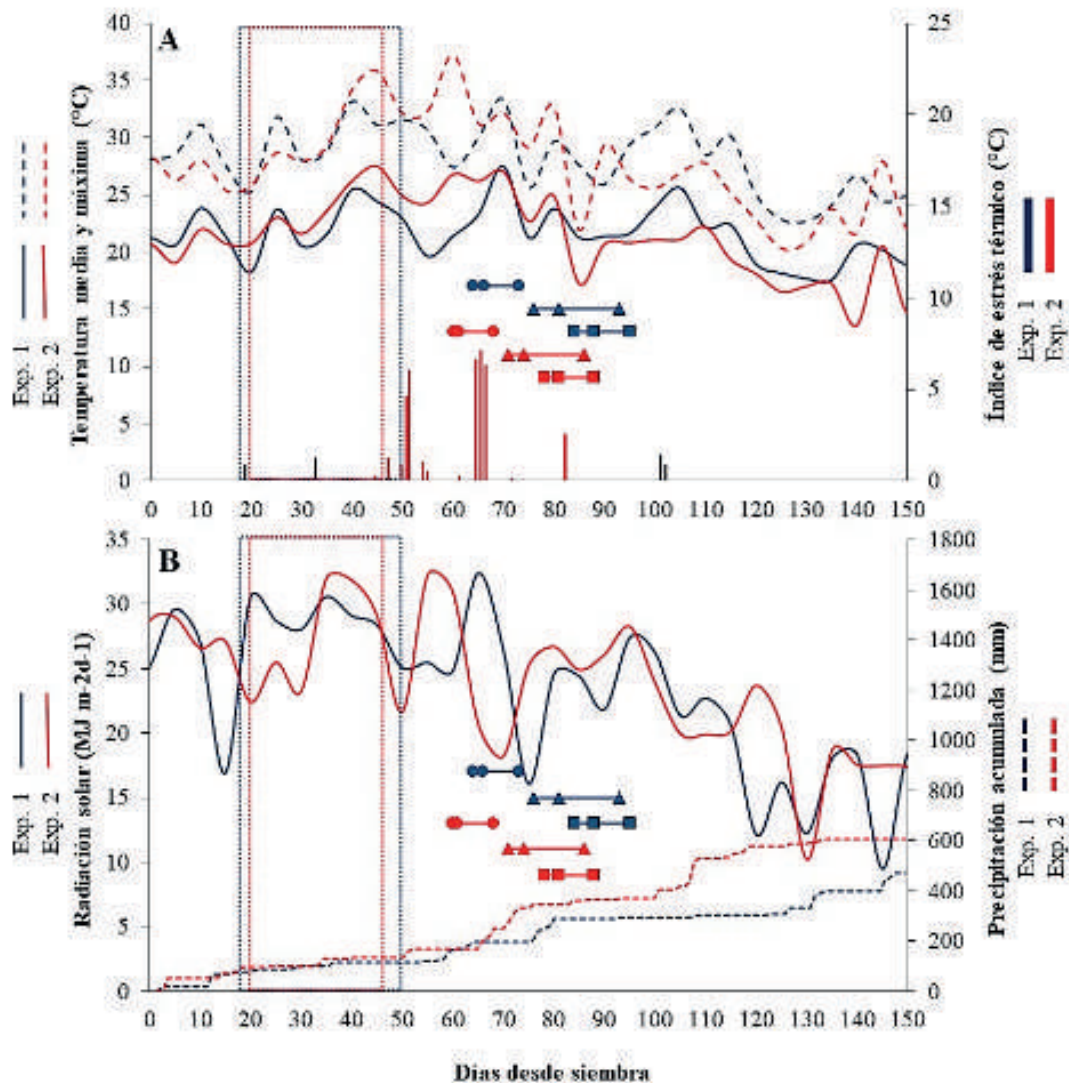


Figura 1: Valores de temperatura media y máxima e índice de estrés térmico (A) y valores de radiación y precipitación acumulada (B) para los 2 experimentos analizados (Exp.1, en azul y Exp.2, en rojo). Los símbolos en las líneas horizontales indican la fecha de floración de la espiga apical (izquierda), sub-apical (centro) y de macollos (derecha) de las líneas endocriadas de floración temprana (círculos; L1233), intermedia (triángulos; L1571, L3556, LP179, LP2542, LP4703, LP923, Protog) y tardía (cuadrados; LP1044, LP598, MAC-1, LP1212). Los rectángulos de líneas punteadas señalan el período V3-V14 para Exp 1 (azul) y Exp. 2 (rojo).



Al igual que para el número de espigas granadas, se registró una reducción en el número de granos y el rendimiento por planta en el Exp.2 (Fig. 3). Dicha reducción fue principalmente debida a la disminución en el aporte de granos de espigas sub-apicales (63% en número de granos y rendimiento), y en menor medida de apicales y de macollos (46% en número de granos y rendimiento para cada tipo de espiga). En cuanto al peso individual de los granos, el mismo no varió significativamente entre años (datos no mostrados). En este sentido, se encontró una relación estrecha ($R^2 > 0.93$; $P < 0.001$) entre el rendimiento y el número de granos de los distintos tipos de espigas (Fig. 4); observándose, en promedio, una mayor fijación de granos y mayor peso individual de los granos provenientes de la espiga apical ($E1=250$ mg), en contraposición con la menor fijación y peso de los granos de las espigas de macollos ($Mac=217$ mg).

FACTOR		Genotipo				Año	G×A
		Exp.1		Exp.2			
		P	CV	P	CV		
Espigas granadas (espigas pl^{-1})	Apical	0.62	3.0	0.38	5.1	0.10	0.75
	Subapical	<0.001	12.1	0.001	31.2	<0.001	0.04
	Macollos	0.002	77.4	<0.001	75.9	0.03	0.02
	Total	0.001	13.6	<0.001	15.8	0.001	0.08
Rendimiento (g pl^{-1})	Apical	<0.001	8.7	<0.001	33.0	<0.001	0.01
	Subapical	<0.001	9.9	<0.001	41.4	<0.001	<0.001
	Macollos	<0.001	66.9	<0.001	116.0	0.03	0.09
	Total	<0.001	9.2	<0.001	28.1	<0.001	0.001
Número de Granos (granos pl^{-1})	Apical	<0.001	8.9	0.008	32.4	<0.001	0.001
	Subapical	<0.001	9.3	<0.001	40.8	<0.001	<0.001
	Macollos	<0.001	59.9	<0.001	147.3	0.02	0.10
	Total	<0.001	9.6	<0.001	30.8	<0.001	<0.001

Tabla 1: Valores de probabilidad P de los cuadrados medios del efecto del genotipo (G), del Año (A) y de la interacción G×A., y coeficientes de variación (CV) para los rasgos analizados en las 13 líneas endocriadas de maíz.

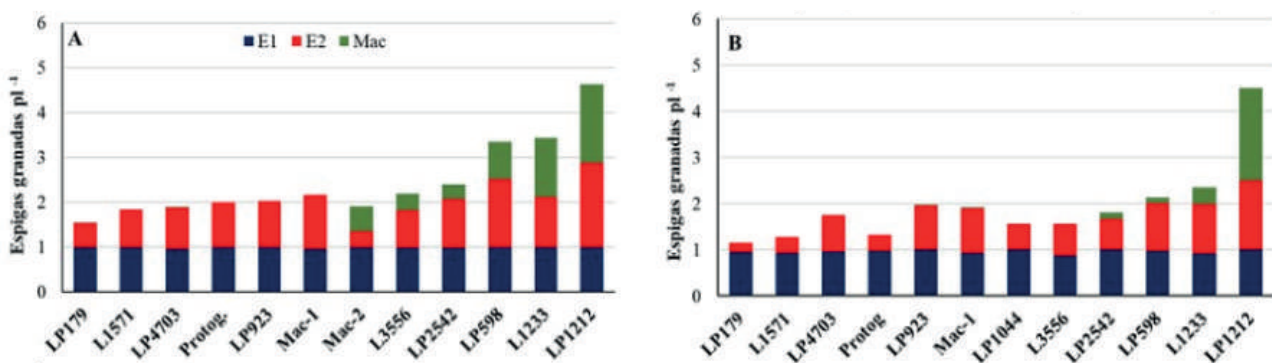


Figura 2: Espigas granadas por planta discriminadas por tipo de espiga: apical (E1), sub-apical (E2) y de macollos (Mac) de 13 líneas endocriadas de maíz evaluadas durante la campaña 2020/21 (A) y 2021/22 (B). El ordenamiento de las líneas de menor a mayor número de espigas por plantas durante la campaña 2020/21 se respetó para la campaña 2021/22.



En cuanto a la variabilidad genotípica encontrada, se destacan las líneas LP923 como prolífica y LP1212 como prolífica-macolladora. Ambas lograron los mayores rendimientos y números de granos en cada tipo de espiga, independientemente del año considerado (Fig. 3). Para esta caracterización no se encontraron los fenotipos solo macolladores y no macollador-no prolíficos. También se analizó la interacción G×A, siendo esta significativa para todos los atributos, a excepción del número de espigas apicales y totales, así como el número de granos y el rendimiento de macollos (Tabla 1).

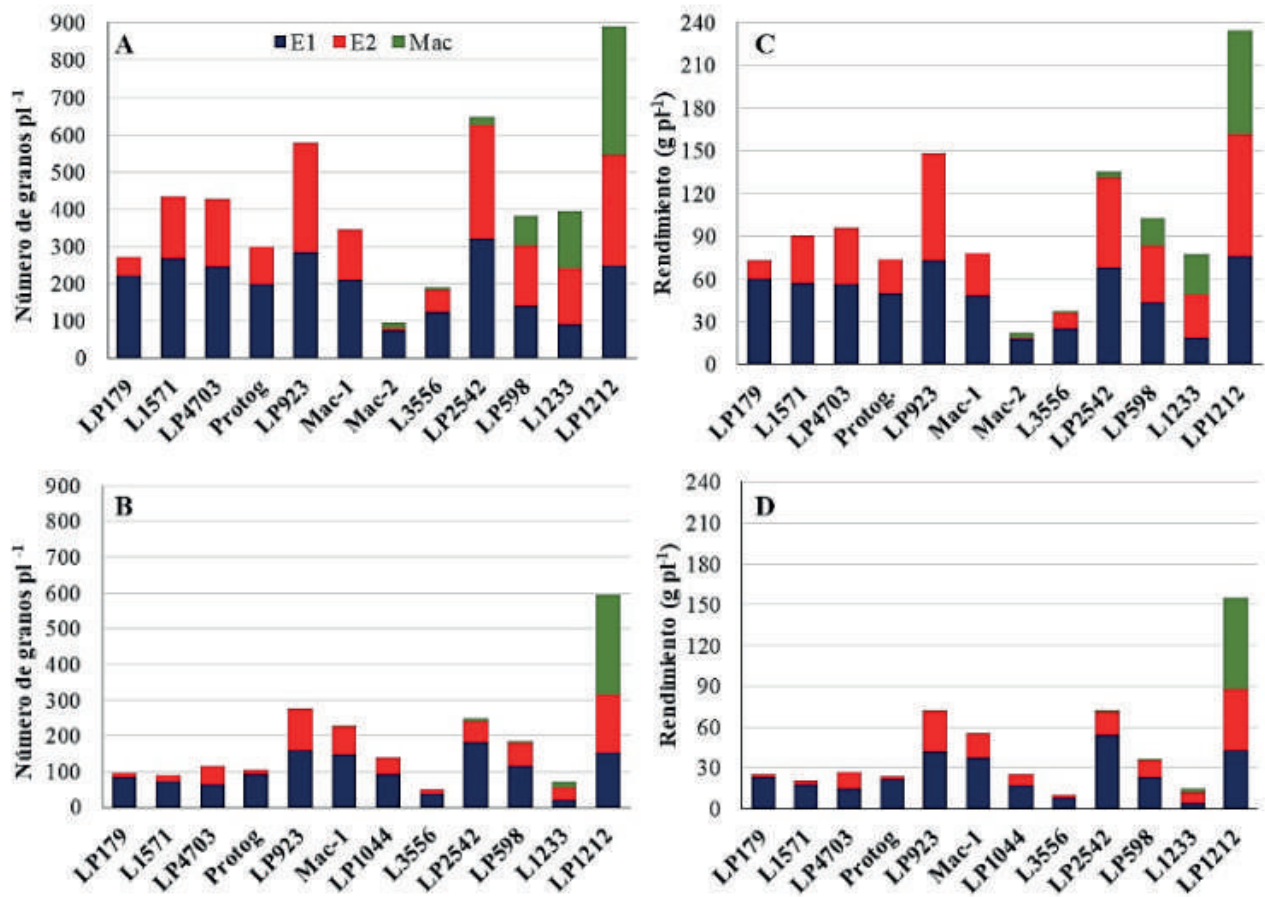


Figura 3: Número de granos por planta (A, B) y rendimiento por planta (C, D), discriminados por tipo de espiga: apical (E1), sub-apical (E2) y de macollos (Mac) de 13 líneas endocriadas de maíz evaluadas durante la campaña 2020/21 (A, C) y 2021/22 (B, D). El ordenamiento de las líneas de menor a mayor número de espigas por plantas durante la campaña 2020/21 (Fig. 2A) se respetó para todos los rasgos presentados en ambas campañas.

Discusión

Las líneas endocriadas de maíz analizadas en este trabajo presentaron variabilidad genotípica para los mecanismos de plasticidad vegetativo-reproductiva (macollaje y prolificidad) (Tabla 1). Esto permitió identificar sólo dos de los cuatro patrones de comportamiento propuestos: genotipos prolíficos y prolíficos-macolladores, dado que ninguna línea se comportó como sólo macolladora o no macolladora-no prolífica (Fig. 1). La variabilidad presente en los rasgos estudiados es el punto de partida para iniciar un plan de mejoramiento en los ambientes objetivos (Acevedo y Fereres, 1993) como fechas de siembra tardías, bajas densidades, y/o con limitación edáfica o hídrica. Dicha variabilidad complementa a aquella observada en otras líneas endocriadas del mismo programa de



mejoramiento (INTA Pergamino) para otros atributos (D'Andrea et al., 2006; Galizia et al., 2020), abriendo posibilidades para vías de mejora conjunta de varios atributos de interés.

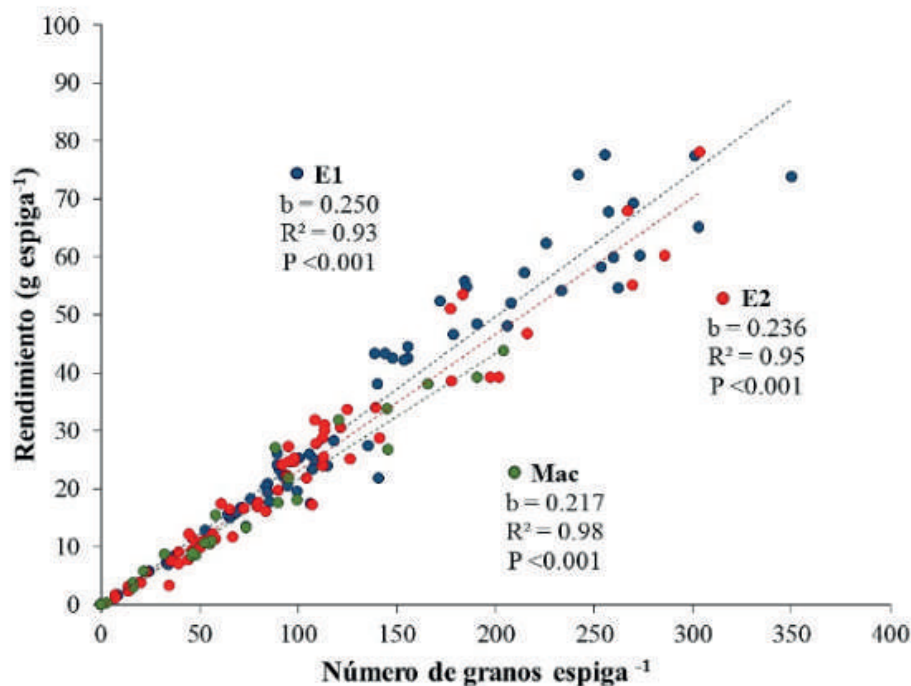


Figura 4: Relación entre el rendimiento y el número de granos de espigas apicales (E1), sub-apicales (E2) y de macollos (Mac) de 13 líneas endocriadas de maíz evaluadas durante los dos años experimentales. El valor "b" (pendiente de la recta de regresión) estima el peso individual del grano promedio de cada tipo de espiga.

Así como para el genotipo, también se evidenció un efecto del año y de la interacción $G \times A$ en los atributos evaluados. Las temperaturas extremadamente altas registradas (temperaturas máximas diarias por encima de 35 °C) especialmente en las etapas claves para la determinación del número de macollos por planta (V3-V14) y del número de granos por espiga (V14-R2) muy probablemente provocaron un balance hídrico negativo que penalizó fuertemente la expresión de macollos y la fijación de granos en espigas sub-apicales y espigas de macollos en el Exp. 2. Esto coincide con los resultados obtenidos por Rotili et al. (2021a; 2021b), en los cuales observaron una disminución en el número de macollos fértiles en ambientes con baja disponibilidad de agua en el suelo a la siembra y con bajas precipitaciones en el primer mes después de la siembra y durante el período crítico.

Las condiciones ambientales contrastantes permitieron detectar interacciones $G \times A$ significativas para la mayoría de los atributos (Tabla 1). Esto demuestra que el estrés provocado por las altas temperaturas impactó más en algunas líneas (e.g., L1233) que en otras (e.g., LP1212). Dichas líneas fueron las que redujeron en mayor (72%) y menor (33%) medida, respectivamente el número de granos totales en el Exp. 2, muy probablemente porque LP1212, de floración más tardía, logró escapar de las condiciones adversas mencionadas durante gran parte de su ciclo vegetativo-reproductivo, mientras que L1233, de floración más temprana, coincidió con dichas condiciones estresantes. Contrariamente, no se encontró interacción $G \times A$ para el número de espigas apicales por planta, las cuales fueron siempre igual o cercanas a 1 para las distintas líneas en los 2 años. Esto podría deberse a la mayor jerarquía de esta estructura por sobre las otras (espigas sub-apicales y de macollos) (Rotili et al. 2022), lo cual le brinda una mayor estabilidad a través de los distintos genotipos y años. Otros atributos que no presentaron efecto significativo de $G \times A$ fueron el



número de granos y el rendimiento de macollos, debido a que estos atributos presentan un efecto principalmente genotípico ($p < 0.001$).

Por último, la variabilidad encontrada en este trabajo en los caracteres de macollaje y prolificidad es de vital importancia para continuar con los estudios de control génico de estos mecanismos de plasticidad, en futuros ensayos dialélicos que involucren a estas líneas endocriadas y a sus híbridos derivados.

Apoyo financiero

103BA. UBACyT 2018. "Plasticidad vegetativo-reproductiva en maíz, rasgos de interés para el manejo del cultivo en ambientes restrictivos." Director: Gustavo Maddonni.

PICT 2018-03925 RAICES. "Plasticidad vegetativo-reproductiva en maíz, rasgos de interés para el manejo del cultivo en ambientes restrictivos" Investigador responsable: Gustavo Maddonni.

Este proyecto forma parte del GET RED UBA DE MAIZ
(<https://www.agro.uba.ar/GET/reduba-demaiz>).



Referencias bibliográficas

- Acevedo, E.; Fereres, E. (1993). Resistance to abiotic stresses. *Plant Breeding*, 406–421. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1524-7_25
- D'Andrea, K. E.; Otegui, M. E.; Cirilo, A. G.; Eyherabide, G. (2006). Genotypic variability in morphological and physiological traits among maize inbred lines - Nitrogen responses. *Crop Science*, 46(3), 1266–1276. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0195>
- D'Andrea, K. E.; Parco, M.; Maddonni, G. Á. (2022). Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: II. Growth per plant, biomass partitioning to apical and sub-apical ears during the critical period and kernel setting. *Field Crops Research*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108557>
- Galizia, L. A.; Munaro, E. M.; Cirilo, A. G.; Otegui, M. E.; D'Andrea, K. E. (2020). Phenotypic plasticity for biomass partitioning in maize: genotype effects across a range of environments. *Field Crops Research*, 256, 107914. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107914>
- Maddonni, G. A., Parco, M., & Rotili, D. H. (2021). Manejo de la estructura del cultivo de maíz en ambientes marginales de la Argentina. *Agronomía y Ambiente*, 41(2), 84–99.
- Parco, M.; Ciampitti, I. A.; D'Andrea, K. E.; Maddonni, G. Á. (2020). Prolificacy and nitrogen internal efficiency in maize crops. *Field Crops Research*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107912>
- Parco, M.; D'Andrea, K. E.; Maddonni, G. Á. (2022). Maize prolificacy under contrasting plant densities and N supplies: I. Plant growth, biomass allocation and development of apical and sub-apical ears from floral induction to silking. *Field Crops Research*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108553>
- Rotili, D. H.; Abeledo, L. G.; deVoil, P.; Rodríguez, D.; Maddonni, G. Á. (2021). Exploring the effect of tillers on the water economy, plant growth and kernel set of low-density maize crops. *Agricultural Water Management*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106424>
- Rotili, D. H.; Abeledo, L. G.; Martínez Larrea, S.; Maddonni, G. Á. (2022). *Field Crops Research* Grain yield and kernel setting of multiple-shoot and / or multiple-ear maize hybrids, 279. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108471>
- Rotili, D. H.; de Voil, P.; Eyre, J.; Serafin, L.; Aisthorpe, D.; Maddonni, G. Á.; Rodríguez, D. (2020). Untangling genotype x management interactions in multi-environment on-farm experimentation. *Field Crops Research*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107900>
- Rotili, D. H.; Giorno, A.; Tognetti, P. M.; Maddonni, G. Á. (2019). Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: Climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agricultural Water Management*, 226, 105761. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105761>
- Rotili, D. H.; Sadras, V. O.; Abeledo, L. G.; Ferreyra, J. M.; Micheloud, J. R.; Duarte, G.; Maddonni, G. Á. (2021). Impacts of vegetative and reproductive plasticity associated with tillering in maize crops in low-yielding environments: A physiological framework. *Field Crops Research*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108107>