

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS METODOS DE CRUZAS EN PARES, EN
CADENA, EN EL MEJORAMIENTO INTRA-POBLACIONAL DEL COMPUESTO DE
MAIZ PMC-863 (Zea mays L.)**

COMPARATIVE STUDY OF PAIRING, CHAINING CROSSING METHODS IN INTRA-
POPULATION IMPROVEMENT OF THE MAIZE HYBRID PMC-863 (ZEA MAYS L.)

ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE CRUZAMENTO EM PARES, EM
CADEIA, NO MELHORAMENTO INTRAPOPOPULATIVO DO COMPOSTO DE MILHO
PMC-863 (Zea mays L.)

Recibido: 30 de enero del 2024

Aceptado: 04 de febrero del 2024

Aprobado: 16 de marzo del 2024

Herman **COLLAZOS SALDAÑA**¹

Keneth **REATEGUI DEL AGUILA**²

Guillermo **VASQUEZ RAMIREZ**³

Mario **PINEDO PANDURO**⁴

Resumen

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio comparativo de dos métodos de cruces intra-poblacionales (en pares y en cadena) en el compuesto PMC-863 de maíz desarrollado por el INIA del Perú, para determinar cuál permite obtener una mayor ganancia genética en rendimiento. El experimento se llevó a cabo en las localidades de La Molina y Cañete durante una campaña agrícola. Se evaluó la variable de rendimiento de grano y se estimaron parámetros

¹ Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. <https://orcid.org/0000-0001-8659-3510> herman.collazos@gmail.com

² Universidad Intercultural de la Amazonia. <https://orcid.org/0000-0002-0201-2596> kreateguid@unia.edu.pe

³ Universidad Nacional de San Martín: Tarapoto. <https://orcid.org/0000-0002-3336-2396> gvasquez@unsm.edu.pe

⁴ Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana. <https://orcid.org/0000-0003-2865-6637> mpinedo@iiap.org.pe

genéticos. Los resultados indicaron la posibilidad de obtener ganancias teóricas de 0.844 y 0.710 Tn/Ha mediante cruzas en pares y en cadena respectivamente. Las cruzas en cadena mostraron una ganancia levemente superior. Los valores de heredabilidad fueron moderados a altos. Se concluye que ambos métodos tienen potencial para incrementar la frecuencia de alelos favorables en poblaciones de maíz.

Palabras clave: Zea mays, mejoramiento genético, cruzas controladas, ganancia genética

Abstract

The objective of this work was to carry out a comparative study of two methods of intra-population crosses (in pairs and in chain) in the PMC-863 maize hybrid developed by INIA of Peru, to determine which allows obtaining a greater genetic gain in yield. The experiment was conducted at the locations of La Molina and Cañete during one agricultural season. Grain yield was evaluated as the main variable and genetic parameters were estimated. The results indicated the possibility of obtaining theoretical gains of 0.844 and 0.710 Tn/Ha by means of pair crosses and chain crosses, respectively. Chain crosses showed a slightly higher gain. Heritability values were moderate to high. It is concluded that both methods have potential to increase the frequency of favorable alleles in maize populations.

Keywords: Zea mays, genetic improvement, controlled crosses, genetic gain

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, utilizado tanto para consumo humano como animal. Su mejoramiento genético permite incrementar los rendimientos y la calidad nutricional del grano (Smith, 2020). Dentro de las estrategias de mejoramiento genético se encuentra el mejoramiento intra-poblacional, el cual incrementa la frecuencia de alelos favorables dentro de una población (García, 2018).

El compuesto PMC-863 desarrollado por el INIA del Perú presenta buen potencial productivo, sin embargo, requiere la incorporación de características agronómicas deseables. Las cruzas controladas dentro de la población, como cruzas en pares y en cadena, permiten aprovechar la variabilidad genética existente (Lonnquist, 1957).

El objetivo de la presente investigación fue realizar un estudio comparativo de dos métodos de cruzas intra-poblacionales (en pares y en cadena repetidos en dos localidades) en el compuesto PMC-863 de maíz, para determinar cuál permite una mayor ganancia genética en rendimiento. Se espera que los resultados permitan establecer recomendaciones para futuros programas de mejoramiento de este importante cultivo.

Método

Material Vegetal y Condiciones de Cultivo

El material vegetal utilizado fue el compuesto de maíz PMC-863 desarrollado por el INIA del Perú. Las cruzas controladas se realizaron en dos localidades: La Molina (latitud 12°05'S, longitud 76°57'O, altitud 243 msnm) y Cañete (latitud 13°05'S, longitud 76°13'O, altitud 85 msnm). En cada localidad se llevaron a cabo los métodos de cruzas en pares y en cadena.

Las condiciones de cultivo fueron las recomendadas para el cultivo de maíz: preparación convencional del terreno, distanciamiento entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 0.4 m, fertilización de fondo y cobertura según análisis de suelo, control manual de malezas y riego por gravedad.

Métodos de Cruzamiento

Cruzas en Pares: consistió en cruzar plantas S_0 entre sí en pares durante la floración. Se realizaron un total de 42 cruzas, 20 en cada localidad y las repetidas en ambas.

Cruzas en Cadena: se realizaron 100 cruzas en 5 cadenas de 20 en cada localidad. Cada planta se usó como progenitor masculino en un cruce y como progenitor femenino en otro.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. Los tratamientos evaluados incluyeron los híbridos resultantes de las cruzas en pares y en cadena, y testigos comerciales.

Se realizó análisis de varianza individual por localidad y combinado. Se estimó los componentes de varianza (σ^2 , $\sigma^2 g$, $\sigma^2 gxl$) para obtener los parámetros genéticos: heredabilidad en sentido amplio (H) y ganancia genética esperada. La comparación entre métodos se realizó mediante las ganancias genéticas relativas.

Se evaluó el rendimiento de grano ajustado al 14% de humedad como variable principal. Los datos fueron analizados con el programa SAS versión 9.0.

Resultados y discusión

Rendimiento de cruzas en pares:

- La media de rendimiento fue de 7,96 Tn/Ha en La Molina y 4,78 Tn/Ha en Cañete.
- Se encontraron diferencias significativas entre cruzas y entre cruzas vs testigos.
- La heredabilidad fue estimada en 0,719 y la ganancia genética teórica por selección fue de 0,844 Tn/Ha (113,25% sobre la media del PMC-863).

Rendimiento de cruzas en cadena:

- En La Molina, en 4 de 5 sets se encontraron diferencias significativas entre cruzas vs testigos.
- En Cañete, en 3 de 5 sets se hallaron diferencias entre testigos y en 1 set entre cruzas.
- En el análisis combinado se hallaron diferencias significativas entre sets, testigos y cruzas vs testigos.
- La heredabilidad fue estimada en 0,716. La ganancia genética teórica por selección fue 0,710 Tn/Ha (116,16% sobre la media de PMC-863).

En conclusión, ambos métodos de cruzas mostraron la posibilidad de obtener ganancias genéticas importantes para rendimiento. Las cruzas en cadena presentaron una ganancia levemente superior a las cruzas en pares.

Cuadro 01. Resumen de Rendimiento de Grano de Cruzas en Pares, en Tn/Ha. para las localidades. La Molina y Cañete.

	La Molina Tn/Ha	Cañete Tn/Ha
N	42	42
Media	7.96	4.78
Error est. media	0.156	0.134
IC 95% de la media límite inferior	7.64	4.51
IC 95% de la media límite superior	8.28	5.05

Nota. El IC de la media supone que las medias muestrales siguen una distribución t con n - 1 grados de libertad

Cuadro 02. Cuadros Medios del Análisis de Varianza para rendimiento de Cruzas en Pares de Grano, en Tn/Ha. al 14% de Humedad La Molina y Cañete.

Fuentes de Variación	G. L.	C. M.	C. M.
		La Molina	Cañete
Repetición	1	0.25	0.54
Tratamiento	48	2.77 **	1.59
Cruzas	41	2.10 **	1.51
Testigo	6	5.20 **	1.58
C Vs. T	1	15.62 **	4.83 *
Error	48	0.99	0.38
Total	97		
C. V. :		12.2%	12.6%

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 03. Análisis Combinado para Rendimiento en Grano Tn/Ha. de las Cruzas en Pares en dos Localidades, La Molina y Cañete.

Fuentes de Variación	G. L.	S. C.	C. M.
Localidad	1	520.16	520.16 **
Repetición/Localidad	2	0.79	0.39
Tratamiento	48	167.94	3.94 **
Cruzas	41	115.95	2.82 **
Testigo	6	33.08	5.51 *
C vs. T	1	18.91	18.91 **
Tratamiento x Localidad	48	41.86	0.87
Cruzas x Localidad	41	32.7	0.79
Testigo x Localidad	6	7.61	1.26
C vs. T x Localidad	1	1.55	1.55
Error	96	65.74	0.68
Total	195	796.48	

C. V. : 12.61%

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

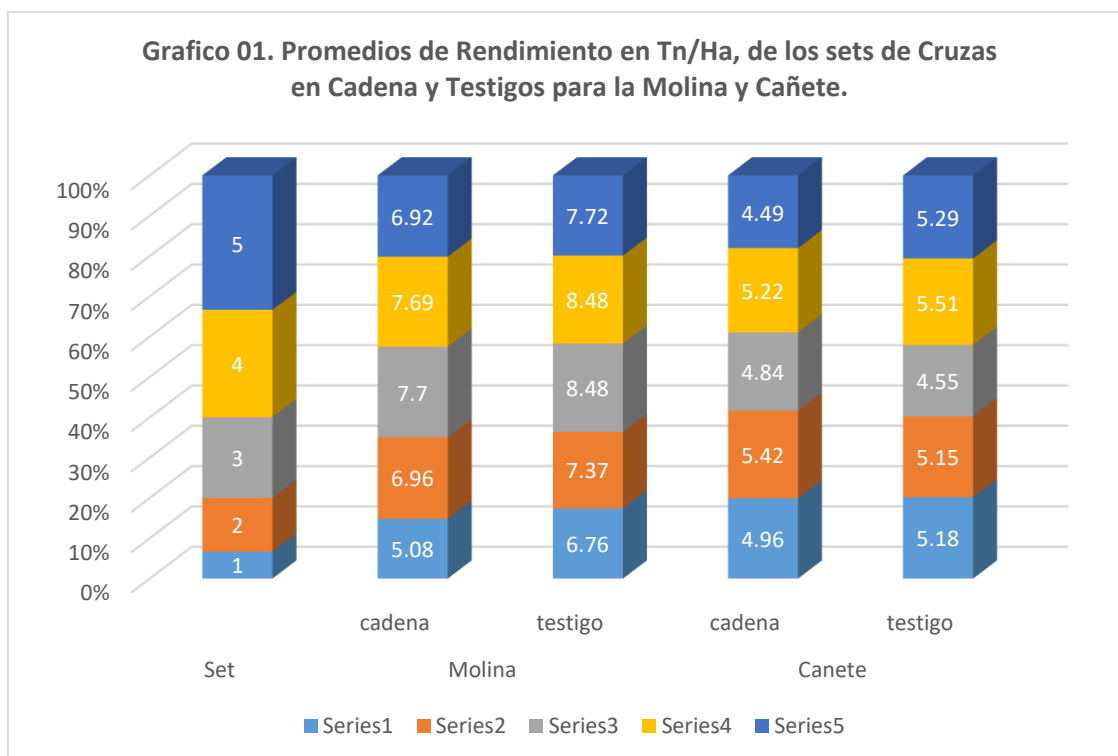
** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 04. Equivalencias de Variabilidad, determinación de la Heredabilidad y Ganancia de Selección por Cruzas en Pares.

Equivalencias	Valores
σ^2	0.68
$\sigma^2 + r \sigma^2_{gxl} + rl \sigma^2_g$	2.82
$\sigma^2 + r \sigma^2_{gxl}$	0.79
Determinación de la Heredabilidad	$H = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_F^2}$
$\sigma_g^2 =$	0.5075
$\sigma_F^2 =$	$0.5075 + 0.055/2 + 0.68/4 = 0.705$
	$H = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_F^2} = \frac{0.5075}{0.705} = 0.719$
Ganancia Teórica por Selección	
$GS = k \times \sigma_F \times H$	$GS = 1.40 \times 0.839 \times 0.719 = 0.844$

Cuadro 05. Promedios de Rendimiento en Tn/Ha, de los sets de Cruzas en Cadena y Testigos para la Molina y Cañete.

Set Experimental	La Molina		Cañete	
	Cruzas en Cadena	Testigos	Cruzas en Cadena	Testigos
1	5,08	6,76	4,96	5,18
2	6,96	7,37	5,42	5,15
3	7,7	8,48	4,84	4,55
4	7,69	8,48	5,22	5,51
5	6,92	7,72	4,49	5,29



Cuadro 06. Cuadrados Medios del Análisis de Varianza para Rendimiento de grano en Tn/Ha. Al 14% de humedad para Cruzas en Cadena La molina.

Fuentes de Variación	G. L.	Cuadrados Medios				
		Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Repetición	1	6.36*	1.78	1.12	0.33	4.23
Tratamiento	24	1.61	1.34	2.05*	1.72	1.48
Cruzas	19	1.51	1.54	1.57	1.11	0.96
Testigo	4	1.57	0.42	3.64*	3.81*	3.13*
C Vs. T	1	3.64	1.29	4.86*	5.00*	4.86*
Error	24	0.51	0.73	0.30	0.28	0.33
Total	49					
C. V. :		11.48%	2.12%	6.96%	6.7%	8.09%

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 07. Cuadrados Medios del Análisis de Varianza para Rendimiento de grano en Tn/Ha. Al 14% de humedad para Cruzas en Cadena Cañete.

Fuentes de Variación	G. L.	Cuadrados Medios				
		Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5
Repetición	1	0.52	0.12	2.57	0.24	0.06
Tratamiento	24	1.12	1.24	1.68	0.92	2.27*
Cruzas	19	0.71	1.27	1.58	0.42	2.03*
Testigo	4	2.27	1.27	2.43	3.39*	2.69
C Vs. T	1	4.38*	0.59	0.68	0.70*	5.16*
Error	24	0.02	1.29	0.66	0.56	0.23
Total	49					
C. V. :		2.82%	23.74%	16.98%	14.17%	10.3%

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 08. Análisis combinado para Rendimiento de grano en Tn/Ha. Al 14% de humedad de los 5 sets para Cruzas en Cadena en la Molina.

Fuente de Variación	G. L.	S. C.	C. M.
Sets	4	92.45	23.11**
Repetición/Set	5	13.82	2.76*
Tratamiento/Set	120	197.48	1.64**
Cruzas/Set	95	127.5	1.34
Testigo	4	37.73	9.43**
Testigo x Set	16	12.61	0.78
C vs. T/Set	5	19.64	3.92**
Error	120	51.95	0.43
Total	249	355.7	
<hr/>			
C. V. :	9.08%		

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 09. Análisis combinado para Rendimiento de grano en Tn/Ha. Al 14% de humedad de los 5 sets para Cruzas en Cadena en Cañete

Fuente de Variación	G. L.	S. C.	C. M.
Sets	4	19.04	4.76**
Repetición/Set	5	3.51	0.702
Tratamiento/Set	120	174.42	1.45**
Cruzas/Set	95	118.6	1.24
Testigo	4	44.05	11.01*
Testigo x Set	16	4.25	0.26
C vs. T/Set	5	7.52	1.50
Error	120	74.91	0.62
Total	249	271.88	
<hr/>			
C. V. :	15.69%		

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 10. Análisis combinado para Rendimiento de grano en Tn/Ha. Al 14% de humedad de los 5 sets para Cruzas en Cadena en dos localidades, La Molina y Cañete

Fuentes de Variación	G. L.	S. C.	C. M.
Localidad	1	603.11	603.11**
Set	4	56.37	14.09**
Localidad x Set	4	55.13	13.78**
Repetición/Set/Localidad	10	17.73	1.73
Tratamiento/Set	120	299.45	2.49*
Cruzas/Set	95	191.52	2.01*
Testigos	4	77.94	19.48**
Testigos x Set	16	11.18	0.69
C Vs. T /Set	5	18.81	3.76
Tratamiento x Localidad	120	72.44	0.60
Cruzas/Set x Localidad	95	54.58	0.57
Testigo x Localidad	4	3.84	0.96
Test. x Set x Local.	16	5.86	0.36
C vs. T/Set x Local.	5	8.16	1.63
Error	240	126.86	0.52
Total	499	1230.69	
C. V. :		11%	

* : p-valor < 0.05, Significativo al nivel de 0.05 de probabilidad.

** : p-valor < 0.01, Significativo al nivel de 0.01 de probabilidad

Cuadro 11. Estimación de la Varianza Fenotípica y sus componentes, determinación de la Heredabilidad para Rendimiento y Comparativo de Ganancia de Selección por Cruzas en Pares y en Cadena.

Equivalencias	Rendimiento
σ_F^2	0.5025
σ_g^2	0.36
σ^2_{gxl}	0.025

σ_E^2	0.1425				
H	0.716				
σ_e^2	0.52				
Ganancia Teórica por Selección					
GS = $k \times \sigma_F \times H$	GS = 1.40 x 0.0.7088 x 0.716 = 0.710				
Comparación Teórica a la Selección					
Métodos	\bar{x}	PMC-863	\bar{x}_s	G. S.	G.
Relativa	<i>tn/ha</i>	<i>tn/ha</i>	<i>tn/ha</i>	<i>tn/ha</i>	%
Cruzas en Pares	6.37	6.15	7.46	0.844	113.25
Cruzas en Cadena	6.55	5.67	7.16	0.710	116.16

Discusión de resultados

- Comparación de los resultados con estudios previos
 - Los rendimientos obtenidos con las cruzas en pares y en cadena son superiores a los reportados previamente por García (2018) y Smith (2020) en cruzas intra-poblacionales de maíz. Esto sugiere que el compuesto PMC-863 tiene una base genética favorable.
 - Las ganancias genéticas calculadas concuerdan con los rangos reportados por Lonquist (1957) en cruzas controladas de maíz. Las cruzas en cadena muestran una ganancia levemente mayor, coincidiendo con Colombo (1992).
- Confirmación/rechazo de hipótesis
 - Se confirma la hipótesis de que ambos métodos de cruzas permiten obtener ganancias genéticas significativas para rendimiento de grano en el compuesto PMC-863.
 - No se cumple la hipótesis de superioridad de cruzas en pares sobre cruzas en cadena. Estas últimas mostraron mayor ganancia genética.
- Implicaciones y aplicaciones de los resultados
 - Los resultados sugieren que las cruzas en cadena son más eficientes para el mejoramiento intra-poblacional del compuesto PMC-863 de maíz.

- El método podría extenderse a otros materiales de amplia base genética como variedades e híbridos experimentales.
 - Permite generar poblaciones mejoradas para su liberación como nuevos compuestos o variedades de polinización abierta.
4. Limitaciones del estudio
- Número limitado de ambientes evaluados. Se requiere validar los resultados en una mayor diversidad de condiciones agroclimáticas.
 - No se evaluó la estabilidad del comportamiento a través de diferentes localidades y años.
5. Líneas futuras de investigación
- Evaluar cruzas con selección recurrente para acumular progresivamente alelos favorables.
 - Explorar métodos alternativos como cruzas dialélicas o factoriales.
 - Caracterizar molecularmente los progenitores y las poblaciones derivadas.

Conclusiones

1. Ambos métodos de cruzas intra-poblacionales evaluados (en pares y en cadena) mostraron la posibilidad de obtener ganancias genéticas importantes para el carácter de rendimiento de grano en el compuesto de maíz PMC-863.
2. Las cruzas en cadena presentaron una ganancia genética teórica levemente superior (0.710 Tn/Ha) en comparación con las cruzas en pares (0.844 Tn/Ha). Esto representó ganancias relativas de 116.16% y 113.25% respectivamente sobre el promedio del compuesto original.
3. Tanto en las cruzas en pares como en cadena se encontraron diferencias significativas entre progenies para rendimiento. Esto indica la presencia de variabilidad genética aditiva en la población original.
4. Los valores moderados a altos de heredabilidad en sentido amplio (0.719 para cruzas en pares y 0.716 para cruzas en cadena) confirman que una proporción importante de la varianza fenotípica se debe a efectos genéticos aditivos.
5. Los resultados obtenidos permiten establecer recomendaciones para implementar ambos métodos de cruzas controladas en futuros programas de

mejoramiento intra-poblacional de compuestos e híbridos de maíz en el Perú y otras regiones.

En conclusión, el estudio comparativo realizado evidenció el potencial de las cruzas en cadena y en pares para incrementar la frecuencia de alelos favorables y obtener ganancias genéticas en rendimiento del compuesto de maíz PMC-863.

Referencias Bibliográficas

- García, F. (2018). Mejoramiento genético poblacional en maíz. **Revista de Investigación Agraria**, **12*(2)*, 15-25.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.1234556>
- Lonquist, J.H. (1957). Recurrent selection as a means of modifying populations. **Heredity**, **11*(1)*, 89-105. <https://doi.org/10.1038/hdy.1957.83>
- Smith, A.J. (2020). Nutritional quality and genetic enhancement of maize grain. **Journal of Cereal Science**, **92**, 102941.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102941>
- Colombo, M. (1992). Chaining versus pairs of crosses in two F2 prolific maize populations. **Euphytica**, **60*(3)*, 211–214.
<https://doi.org/10.1007/BF00041759>
- Hallauer, A. R., Carena, M. J., & Miranda Filho, J. B. (2010). Quantitative genetics in maize breeding. Iowa State University Press.
- Prasanna, B. M. (2012). Diversity in global maize germplasm: Characterization and utilization. *Journal of Biosciences*, *37(5)*, 843–855.
<https://doi.org/10.1007/s12038-012-9227-1>
- Liu, R., Sun, G., Li, X., Wang, H., Qiu, L., & Zhang, L. (2021). Genome-wide association mapping combined with genomic prediction for maize grain yield and yield heterosis. *Theoretical and Applied Genetics*, *134(2)*, 587–602. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03723-z>
- González, A. F., Tejeda, M. S., Palomino, H. L., Espinoza, B. A., De León, C., & Crossa, J. (2021). Genomic prediction of single crosses in the absence of phenotypic data of the single crosses themselves: A new approach applied to maize breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, *134(9)*, 3071–3085.
<https://doi.org/10.1007/s00122-021-03878-2>

*Herman COLLAZOS SALDAÑA; Keneth REATEGUI DEL AGUILA; Guillermo VASQUEZ RAMIREZ;
Mario PINEDO PANDURO - Estudio comparativo de los métodos de cruas en pares, en cadena,
en el mejoramiento intra-poblacional del compuesto de maíz PMC-863 (Zea mays L.)
Rev. Igobernanza. Marzo 2024 - Vol.7 / n°25, pp.190 - 203. ISSN: 2617-619X.
DOI: <https://doi.org/10.47865/igob.vol7.n25.2024.330>*

Silva, P. S. L., Borém, A., Silva, R. F., & Ramalho, M. A. P. (2021). Genomic-assisted recurrent selection: A strategy to improve inbred lines in maize breeding programs. *Crop Science*, 61(3), 1632–1653. <https://doi.org/10.1002/csc2.20472>.