

## COMPONENTES GENÉTICOS BAJO EL DISEÑO CAROLINA DEL NORTE II EN MAÍZ (*Zea mays* L.) EN EL SUR DE SONORA, MÉXICO

### GENETIC COMPONENTS UNDER THE NORTH CAROLINA DESIGN II IN MAIZE (*Zea mays* L.) IN SOUTHERN SONORA, MEXICO

Gilberto Rodríguez-Pérez<sup>1a</sup>, Alejandro García-Ramírez<sup>1b\*</sup>, Francisco Cervantes-Ortiz<sup>2a</sup> y Enrique-Andrío Enríquez<sup>2b</sup>

<sup>1a</sup> Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui. Bácum, Ciudad Obregón Sonora, México  
<https://orcid.org/0000-0003-2297-8598>

<sup>1b</sup> Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui. Bácum, Ciudad Obregón Sonora, México  
<https://orcid.org/000-0002-5719-8412>

<sup>2a</sup> Tecnológico Nacional de México-Roque. Rosas, Celaya, Guanajuato, México  
Francisco: <https://orcid.org/0000-0003-2419-5896>

<sup>2b</sup> Tecnológico Nacional de México-Roque. Rosas, Celaya, Guanajuato, México  
<https://orcid.org/0000-0002-8260-4689>

\* Autor para correspondencia: [alejandro.gr@vyaqui.tecnm.mx](mailto:alejandro.gr@vyaqui.tecnm.mx)

#### RESUMEN

México está enfrentando un déficit en la producción de maíz (*Zea mays* L.) a pesar de producir 27 millones de toneladas anualmente. Los objetivos de esta investigación fueron estimar y cuantificar la acción génica involucrada en cruces de maíz; y determinar la aptitud combinatoria general, la aptitud combinatoria específica y los componentes genéticos para seleccionar híbridos experimentales con alto rendimiento de grano en el sur de Sonora. Los híbridos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones durante el ciclo primavera-verano de 2020-2021. El análisis genético se realizó usando el diseño Carolina del Norte II. Los resultados indicaron que las hembras CML-264 y CML-500; y los machos CML-500 y CML-542 obtuvieron los mayores promedios en todas las variables estudiadas. Sin embargo, las líneas hembras CML-494, CML-545 y CML-264, y los machos CML-550 y CML 542 presentaron mayor efecto de aptitud combinatoria general. Los híbridos CML-264xCML-550, CML-264xCML-555 y CML-494xCML-550 destacaron por ser más tardíos en floración y de porte medio, presentando un mayor rendimiento, peso de mil granos, peso hectolítrico e índice de flotación, así como también mayores efectos de aptitud combinatoria específica positivos. El híbrido CML-545xCML-542 destacó en precocidad, obteniendo rendimientos aceptables en promedios intermedios. En los componentes genéticos, las varianzas de hembras, dominancia, genética aditiva y heredabilidad influyeron más en todas las variables estudiadas.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica, híbridos, varianzas.

## ABSTRACT

Mexico is facing a maize (*Zea mays* L.) production deficit despite producing 27 million tons annually. The objectives of this research were to estimate and quantify the genetic action involved in maize crosses; and to determine the general and specific combining ability as well as the genetic components to select experimental hybrids with high grain yield in southern Sonora. The hybrids were evaluated in a randomized complete block experimental design with three replicates during the 2020/2021 spring-summer cycle. The genetic analysis was performed using the North Carolina Design II mating design. The results indicated that the female inbreds CML-264 and CML-500; and the males CML-500 and CML-542 obtained the highest average values for all the variables under study. However, the female lines CML-494, CML-545 and CML-264, and the males CML-550 and CML 542 presented a greater general combining ability effect. In particular, the hybrids CML-264x CML-550, CML-264x CML-555, and CML-494x CML-550 were late to flowering and medium-sized, recording higher yield, weight of thousand grains, hectoliter weight and flotation index as well as the highest positive specific combining ability effects. The hybrid CML-545x CML-542 showed early flowering, obtaining acceptable yields in intermediate average values. Regarding genetic components, the variances of females, dominance, additive genetic and heritability had a greater influence on all the variables studied.

**Keywords:** *Zea mays* L., general combining ability, specific combining ability, hybrids, variances.

## INTRODUCCIÓN

En México, durante los ciclos primavera verano y otoño invierno del 2021 se sembraron 7,13 millones de hectáreas en condiciones de riego y secano o temporal obteniendo una producción de 25,5 millones de toneladas y rendimientos promedios de 8,95 t ha<sup>-1</sup>. El maíz blanco contribuyó con el 88,10%, amarillo (11,41%) de color el 0,49% del total de la producción (SIAP, 2021).

Los maíces de color azul se establecieron 525 y 6.035 hectáreas produjeron 3,655 y 8,223 toneladas y sus rendimientos fueron de 6,96 y 1,36 t ha<sup>-1</sup> bajo condiciones de riego y temporal respectivamente. En el Estado de Sonora se establecieron 67.987 hectáreas bajo riego produciendo 786 mil toneladas obteniendo rendimientos promedios de 11,30 t ha<sup>-1</sup>; en temporal fueron 1.841 hectáreas con una producción de 3.025 toneladas y rendimientos promedios de 1,64 t ha<sup>-1</sup>, el municipio de Cajeme obtuvo la mayor producción con 726.916 toneladas contribuyendo con 92,14 de la producción estatal, especialmente con siembras de maíces mejorados, solo el 2,63 % de las siembras son de temporal o secano donde se obtuvieron rendimientos promedios de 1,64 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2021).

En México, se consumen 12,3 millones de toneladas de maíz blanco en forma de tortilla, de las cuales el 64% es a través de método tradicional maíz-masa-tortilla, y el 36% es a través de la industria de la harina; sin embargo, los de color ofrecen ventajas en cuanto a la textura además de aportar el  $\beta$ -caroteno que es la forma activa de la vitamina A que es importante para el crecimiento, el fortalecimiento del sistema

inmunológico y la visión nocturna (López et al., 2021).

En este contexto, se debe tener en cuenta que la producción de este cultivo es un asunto de amplia complejidad, además del impacto que tiene sobre las políticas públicas y soberanía alimentaria del país (Valencia-Romero et al., 2019). Ante los cambios actuales de las condiciones climáticas, es importante hacer uso de la amplia diversidad que tiene el cultivo, en aras de aprovechar genotipos que sean tolerantes al déficit hídrico y permitan seguir teniendo rendimientos favorables o incluso mejores como los obtenidos hasta ahora con el uso de variedades mejoradas (Virgen et al., 2016; Martínez-Gutiérrez et al., 2018). El uso generalizado de materiales mejorados ha sido una alternativa viable para incrementar la rentabilidad del cultivo, por lo que es necesaria la formación de nuevos genotipos superiores a los actuales (Ávila-Perches et al., 2009). Para incrementar los rendimientos de este cultivo, un sistema de mejoramiento ampliamente usado es la hibridación, con ello los híbridos han contribuido al aumento significativo de la producción. La estructura genética que impera en éstos es el uso de tres líneas para formar los llamados híbridos trilineales, también se han usado híbridos dobles y de cruce simple (Valencia et al., 2019).

Sin embargo, existen cruzamientos de endogamia avanzada que por su composición permiten el pronóstico en la expresión favorable del vigor híbrido. Por su parte, un diseño genético es un sistema de apareamiento entre individuos de una o más poblaciones que provee información del tipo de acción génica que controla el carácter en cuestión y genera una población mejorada

que puede usarse como base para la selección y desarrollo de variedades potenciales (Acquaah, 2012).

La estimación de los parámetros genéticos de una variedad puede hacerse mediante el uso de alguno de los métodos de Carolina del Norte, los cuales son de utilidad para los fitomejoradores al emplear progenitores endogámicos o variedades de polinización libre que muestran amplia diversidad genética. En lo particular, el método IV analiza a las cruzas directas que permiten estimar la aptitud combinatoria general (ACG) y la aptitud combinatoria específica (ACE), que aportan elementos para establecer las relaciones genéticas entre los progenitores y su progenie, siendo útiles en la identificación de híbridos y cruzamientos promisorios (Rodríguez et al., 2019). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue estimar y cuantificar la acción génica involucrada en cruzas de maíz de grano blanco, a partir de líneas de alto nivel de endogamia, así como la aptitud combinatoria general, específica y la estimación de los componentes genéticos de algunos rasgos agronómicos para seleccionar híbridos experimentales con alto rendimiento de grano en el sur de Sonora.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Desarrollo de la investigación

El experimento fue conducido en el campo experimental del Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui ubicado en Av. Tecnológico, Block 611. Valle del Yaqui Bácum, situado al sur del estado de Sonora, México, entre 27.41367 latitud y -100.13194 longitud a una altura de 13 msnm. El clima es cálido extremo, con temperaturas media anual de 24 °C con una máxima de 31 °C; y una mínima de 16 °C con una precipitación promedio de 450 mm anuales, (García, 1973).

Se utilizaron nueve líneas de grano blanco provenientes de CIMMYT que fueron derivadas de diferentes poblaciones (Tabla 1) con un nivel de endogamia de  $S_9$  las cuales fueron apareadas bajo el diseño II de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1948), cinco progenitores fueron hembras (H) y cuatro machos (M), por lo que se generaron 20 cruzas simples; en el ciclo otoño-invierno 2019-2020 se sembraron cuatro surcos de cada línea endogámica progenitora en cinco metros de longitud a una distancia de 16 cm entre plantas, de las cuales se utilizaron 30 plantas para realizar los cruzamientos entre hembras y machos por cada combinación para tener semilla suficiente, la siembra ocurrió el día 19 de noviembre de 2019 de manera manual depositando dos semillas por golpe, posteriormente a los 20 días de emergidas las plantas se aclareo dejando una planta.

En otoño-invierno 2020-2021 se realizó la evaluación de los 20 híbridos obtenidos, las parcelas fueron de cuatro surcos en cuatro metros de longitud y separación entre surcos de 80 cm, la distancia entre plantas fue de 12,5 cm teniendo una densidad de población de 100,000 plantas por hectárea en un área útil de 6,4 m<sup>2</sup>, el diseño experimental que se utilizó fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. A la siembra se aplicó la fórmula de fertilización 200 N, 90 P, 00 K, en dos etapas: el 50 % de N y el total de P en el momento de sembrar, y el resto en la escarda a los 30 días después de la siembra. El riego que se aplicó fue de gravedad y se regó procurando que no faltara humedad en el suelo, el control de maleza fue manual con presencia de quelite cenizo y verdolaga; se dieron dos deshierbes antes de la escarda y tres después del aporcado del cultivo. La plaga que se presentó fue el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y se controló aplicando el insecticida Decís® (deltametrina), con dosis de 1,0 L ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 1. Material genético de maíz utilizado en el diseño Carolina del Norte II en el sur de Sonora, México, 2021.**

**Table 1. Genetic material used in the North Carolina Design II in southern Sonora, Mexico, 2021.**

Progenitor	Línea	Genealogía	Textura de grano
H-1	CML-264	Pob21C5F219-3-1-B-##-8-1-3-BBB-f	Cristalino
H-2	CML-494	LPSC4F7-1-2-2-2-2-BBB	Dentado
H-3	CML-495	[PNVABCO(S/D)/NPH-28] F32-B-1-B-1-2-B	Cristalino
H-4	CML-500	(CML265*CL-00303)-S7*CML264)-B-8-1-3-B*4	Semidentado
H-5	CML-545	[CML312/CML445//[TUXPSEQ]C1F2/P49-SR]	Dentado
M-1	CML-549	(CML498 x CL-RCW36)-B-23-2-2-B-B-2-1	Semidentado
M-2	CML-550	P25 (HSRRS) C1-246-3-1-2-1-B-B-B-1	Cristalino
M-3	CML-542	ZEWA-C1-F2-219-4-3-B	Cristalino
M-4	CML-555	H132-28-B-45-1-1-B	Cristalino

**Material genético**

Durante el desarrollo del experimento, se obtuvo información de ocho caracteres cuantitativos asociados con componentes de rendimiento, con los datos obtenidos, se realizó un análisis estadístico para identificar las variables, líneas e híbridos con características agronómicas y rendimiento de grano sobresalientes; las variables registradas fueron: rendimiento de grano (RG), se estimó cosechando los surcos útiles y el dato de registró en kg, para posteriormente se transformó a toneladas ajustándolo al 14% de humedad, días a flor femenina (DFF), se realizó el conteo de cada genotipo al 50% más uno de las plantas una vez que emergiera el jilote; altura de mazorca (AM), se midió con un estadal desde la base de suelo a la base de la formación de la espiga, el dato se registró en centímetros; número de granos por hilera (GH), número de hileras por mazorca (HM) peso de mil granos (PMG), índice de flotación (IF) y peso hectolitrico (PH).

El análisis genético se hizo con el diseño II de apareamiento de Carolina del Norte de Comstock y Robinson (1948), cuyo modelo lineal es el siguiente:  $Y_{ijk} = \mu + m_i + H_j + MH_k + \epsilon_{ijk}$  donde:  $\mu =$  es la media general entre machos y hembras;  $M =$  es el efecto de machos;  $H =$  es el efecto de hembras;  $MH =$  es el efecto de la interacción machos por hembras;  $\epsilon_{ijk} =$  es el efecto del error experimental.

La estimación de los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) para los machos y hembras, y de aptitud combinatoria específica (ACE) para las cruza, se hizo según la propuesta de Sprague y Tatum (1942):  $g_i = Y_i - Y...$ ;  $g_j = Y_j - Y...$ ;  $S_{ij} = Y_{ij} - g_i - g_j - Y...$  donde:  $g_i$ ,  $g_j$  y  $S_{ij}$  son los efectos de ACG y ACE, respectivamente para los i-machos, las j-hembras y sus  $ij$  cruza;  $Y_i$  y  $Y_j$  son las medias de los machos y las hembras respectivamente,  $Y_{ij}$

es el valor de la cruza del macho i x hembra j y  $Y...$  es la media de todas las i x j cruza.

Los componentes genéticos se estimaron de acuerdo con los valores de las esperanzas de los cuadrados medios del análisis de varianza; varianza de machos ( $\delta^2M = M4 - m2/rH$ ), varianza de hembras ( $\delta^2H = M3 - M^2/rM$ ), varianza machos x hembras ( $\delta^2MH = M2 - M1/r$ ), varianza fenotípica ( $\delta^2F = \delta^2M + \delta^2H + \delta^2MH + \delta^2e$ ), varianza aditiva ( $\delta^2A = 4 \delta^2M$ ), varianza de dominancia ( $\delta^2D = 4[\delta^2H - \delta^2M]$ ) y heredabilidad en sentido amplio ( $H^2 = \delta^2A / \delta^2F$ ).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados del análisis de varianza (Tabla 2) indican que hubo significancia entre machos (M), hembras (H) y en su interacción M\*H para todas las variables evaluadas de estudio. Estas diferencias pueden ser debido a las características fenotípicas y genéticas de cada línea que se utilizó, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por López et al. (2021), quienes en un trabajo similar identificaron híbridos de maíz de alto rendimiento como resultado de la variabilidad genética entre líneas progenitoras, y por su origen genético en que obtuvieron. Los coeficientes de variación fluctuaron entre 1,43 y 15,72% significando un 98,57 y 84,28% de confiabilidad en los datos generados en esta investigación (Vélez et al., 2018).

**Comportamiento de los componentes de rendimiento**

La prueba de comparación de medias (DMS) mostró que las hembras CML-264, CML-500, CML-545 y los machos CML-550 y CML-542 presentaron ciclo más tardío y tuvieron mejores

**Tabla 2. Cuadrados medios del análisis de varianza y nivel de significancia estadística del análisis del diseño II de Carolina de norte para ocho variables de maíz en el sur de Sonora, México, 2021.**

**Table 2. Mean squares of the analysis of variance and statistical significance level using the North Carolina Design II for eight maize variables in southern Sonora, Mexico, 2021.**

FV	gl	DFF (días)	AM (m)	GH (número)	HM (número)	RG (t ha <sup>-1</sup> )	PMG (g)	PH (kg hL <sup>-1</sup> )	IF (%)
Repetición	2	3,21	1,35	5,41	14,31	1,37	14,45	0,53	5,11
Machos	3	144,86**	204,48**	100,37**	14,24*	0,78*	10267,35**	2,67*	734,16**
Hembras	4	61,94**	741,97**	19,94*	1,45*	1,68*	7953,47**	15,99**	246,12**
M*H	12	131,81**	1277,97**	23,21**	9,86*	1,96*	12853,86**	15,03**	326,81**
Error	38	2,62	17,59	3,15	4,07	0,78	18,01	2,51	2,04
Total	59	40,17	332,06	13,39	5,93	1,1	3687,72	5,92	121,97
CV (%)		1,82	3,47	4,29	15,72	12,14	1,43	1,99	1,96

FV= fuentes de variación, DFF= días a floración femenina, AM= altura de mazorca, GH= granos por hilera, HM= hileras por mazorca, RG= rendimiento de grano, PMG= peso de mil granos, PH= peso hectolitrico, IF= índice de flotación.

rendimientos (Tabla 3), mientras que CML-495, CML-555 y CML-542 fueron más precoces las cuales tuvieron rendimientos inferiores, para las condiciones climáticas en el Valle del Yaqui se requieren híbridos de ciclo intermedio por la disponibilidad de agua donde se identificaron las líneas CML-494 y CML-542 con promedios de 88 días las cuales pueden aprovecharse en aplicar cinco riegos (López et al., 2021)

En altura de mazorca, las líneas CML-494, CML-545, CML-549 y CML-550 fueron más altas; por otra parte, CML-495, CML-555 y CML-542 tuvieron alturas de mazorca inferiores, esta variable no influye en las cosechas mecánicas ya que en el Valle del Yaqui en Sonora se utilizan máquinas especializadas en las cosechas. Para el número de granos por hileras los progenitores femeninos CML-500, CML-545 y masculinos CML-550 y CML-542 tuvieron el mayor número de granos por mazorca presentando en promedio entre 13,8 y 14,4 (Vélez et al., 2018).

Para rendimiento de grano, CML-264, CML-494, CML-550 y CML-542 tuvieron los mejores rendimientos entre 700 y 900 kg por hectárea; sin embargo, CML-495 y CML-549 presentaron rendimientos inferiores por debajo de 600 kg, los rendimientos en hembras y machos pudo deberse a su ciclo intermedio-tardío y es probable que la combinación entre machos y hembras influyera en el comportamiento de las cruza. López et al. (2021) relacionaron que un ciclo intermedio permite una expresión favorable con el rendimiento de grano. Por tanto, se esperaría un buen comportamiento al combinar estos progenitores en la formación de híbridos (Acevedo-Cortés et al., 2020). Al

conjuntar, por recombinación y selección algunas líneas contrastantes, podría resultar en patrones heteróticos definidos porque, según Dzib et al. (2011), los híbridos altamente rendidores lo fueron por factores hereditarios, como la interacción múltiple de genes de tipo aditivo. Esto muestra la conveniencia de conocer la importancia relativa de cada componente genético en la producción de híbridos (Vélez-Torres et al., 2018).

Para peso de mil granos (PMG) se observó que CML-264 y CML-550 tuvieron mayor peso, mientras que CML-500 y CML-555 presentaron valores cercanos a los 80 gramos. Por otro lado, el peso hectolítrico (PH) está relacionado en forma directa con la dureza del grano, por lo que el grano de mayor dureza correspondió a las líneas CML-500, CML-264, CML-550 y CML-542 tendieron ser granos duros; sin embargo, las líneas CML-545 y CML-550 tuvieron los porcentajes más altos de índice de flotación lo que se pueden aprovechar en la elaboración de fritos y totopos, mientras CML-494 y CML-555 por sus valores son más idóneos para la elaboración de tortillas por ser de endospermo más suaves o harinosos, los valores observados de peso hectolítrico e índices de flotación demuestran que se trata de materiales de granos duros (Rodríguez et al., 2019). De acuerdo con la norma mexicana NMX/034 (2002) que marca un límite de peso hectolítrico de 74, todos los genotipos evaluados cumplen con la norma, sin embargo, la metodología de CIMMYT (2016) fue la utilizada como referencia para esta investigación.

En la Tabla 4 se aprecian los promedios de los 12 híbridos considerando mayor y menor

**Tabla 3. Promedios de rendimiento y sus componentes agronómicos de las líneas macho y hembra de maíz en el sur de Sonora, México, 2021.**

**Table 3. Yield average values and their agronomic components of maize male and female lines in southern Sonora, Mexico, 2021.**

Progenitor	DFF (días)	AM (m)	GH (número)	HM (número)	RG (t ha <sup>-1</sup> )	PMG (g)	PH (kg hL <sup>-1</sup> )	IF (%)
CML-264	90,58 a	117,2 b	41,08 bc	13,08 a	7,70 a	329,91 a	80,39 a	69,66 d
CML-494	88,16 b	127,41 a	39,83 c	12,75 b	7,65 a	286,16 d	78,60 b	71,25 c
CML-495	85,08 c	111,53 c	40,66 c	12,12 c	6,78 b	260,32 e	77,82 b	68,25 e
CML-500	89,75 a	116,91 b	43,09 a	14,41 a	7,09 ab	293,41 c	80,45 a	77,32 b
CML-545	90,33 a	130,16 a	42,25 ab	12,58 b	7,26 ab	306,25 b	78,86 b	78,41 a
DMS (0.05)	1,8	7,13	1,62	1,22	0,21	21,93	1,02	0,95
CML-549	85,13 d	123,53 a	39,26 c	11,86 c	6,96 c	263,26 d	79,6 b	76,73 b
CML-550	92,33 a	123,53 a	45,28 a	12,13 bc	7,45 a	324,36 a	80,63 a	78,73 a
CML-542	90,06 b	115,86 c	39,81 c	13,53 ab	7,43 ab	306,66 b	79,83 ab	63,36 d
CML-555	87,63 c	119,46 b	41,46 b	13,83 a	7,30 b	286,66 c	79,55 b	73,25 c
DMS (0.05)	1,33	3,46	1,46	1,2	0,73	3,51	1,32	1,18

DFF= días a floración femenina, AM= altura de mazorca, GH= granos por hilera, HM= hileras por mazorca, RG= rendimiento de grano, PMG= peso de mil granos, PH= peso hectolítrico, IF= índice de flotación.

**Tabla 4. Comparación de medias de 12 híbridos de maíz extremos en rendimiento de grano y sus principales componentes generados por el diseño II de Carolina del Norte en el sur de Sonora, México, 2021.**

**Table 4. Comparison of means of 12 extreme maize hybrids in grain yield and their main components generated by the North Carolina Design II in southern Sonora, Mexico, 2021.**

Híbrido	DFF (días)	AM (m)	GH (número)	HM (número)	RG (t ha <sup>-1</sup> )	PMG (g)	PH (kg hL <sup>-1</sup> )	IF (%)
CML-264xCML-549	94,67	116	41,67	13,67	7,52	300,33	79,77	80,67
CML-264xCML-550	95,67	114	46,00	16,15	8,48	357,67	82,59	84,67
CML-264xCML-542	94,33	115	46,00	15,24	8,32	352,33	81,43	83,64
CML-264xCML-555	94,00	165	42,33	14,33	7,76	404,33	81,37	82,67
CML-494xCML-549	94,67	118	42,26	15,31	7,08	304,67	77,43	64,67
CML-494xCML-550	92,33	126	46,33	15,28	8,37	357,21	81,53	81,67
CML-500xCML-542	87,67	134	39,33	12,33	7,18	210,67	78,93	77,67
CML-500xCML-555	87,00	112	38,00	11,67	6,36	284,81	77,59	50,84
CML-545xCML-549	79,33	122	37,67	10,67	6,27	209,33	75,27	58,67
CML-545xCML-550	77,00	137	42,36	12,33	6,40	305,67	77,95	70,33
CML-545xCML-542	76,33	112	42,52	12,45	7,47	303,28	81,27	79,67
CML-545xCML-555	78,67	95	41,00	10,41	6,58	202,36	76,63	65,67
Media	87,64	122,14	42,12	13,32	7,32	299,39	79,31	73,40
DMS (0,05)	2,67	6,93	2,93	3,33	1,46	7,01	2,61	2,36

DFF= días a floración femenina, AM= altura de mazorca, GH= granos por hilera, HM= hileras por mazorca, RG= rendimiento de grano, PMG= peso de mil granos, PH= peso hectolítrico, IF= índice de flotación.

rendimiento de grano y sus componentes, en donde destacaron los híbridos CML-264xCML-550, CML-494xCML-550 y CML-494xCML-542 con la mejor producción de grano, PMG, PH e IF, a su vez fueron más tardíos, presentaron mayor número de granos por hilera y número de hileras por mazorca, estas combinaciones tuvieron alta ACG y ACE concordando con lo indicado por (Vélez et al., 2018; Acevedo et al., 2020), donde mencionaron que los rendimientos de grano superiores están muy relacionados con plantas altas y tardías. Los híbridos obtuvieron bajos rendimientos fueron CML-500xCML-549 y CML-495xCML-549, así mismo fueron más precoces y plantas de porte intermedio.

#### Efectos de aptitud combinatoria general (ACG)

La variabilidad genética adecuada es importante en el progreso de selección de germoplasma en programas de mejoramiento dirigidos a mejorar la producción en maíces en específico para el sur de Sonora, México, los efectos de aptitud combinatoria general encontrada en este estudio (Tabla 4) manifestaron variaciones considerables que se presentaron principalmente en las variables rendimiento de grano (RG), peso de mil granos (PMG), peso hectolítrico (PH) e índice de flotación (IF) donde se mostró que las líneas consideradas como hembras CML-545,

CML-494 y CML-500 y las referidas como machos CML-550, y CML-542 tendrán una alta expresión genética dado que exhibieron valores positivos y superiores; esto indica que la tendencia de los progenitores es incrementar buenos rendimientos y características físicas que pueden asociarse en mejorar la producción al combinarse ya que fueron las de mayor aptitud combinatoria específica (Ali et al., 2019; Tolera et al., 2017).

Por otra parte, estos mismos progenitores revelaron efectos positivos de ACG (Tabla 5) para días a floración femenina (DFF), altura de mazorca (AM), granos por hilera (GH) e hileras por mazorca (HM) las cuales representan caracteres deseables para pronosticar alelos favorables de precocidad, o tardíos para la eficiencia en el uso del agua hacia sus respectivas cruza (Sugiharto et al., 2018); en cuanto a granos por hilera e hileras por mazorca (GH y HM) los valores fueron positivos, lo que sugiere que estos progenitores tienden a exhibir buena ACG para mejorar el número de granos que puedan tener por mazorca para obtener mejores rendimientos (Sandesh et al., 2018; Matin et al., 2017).

Por otro lado, los progenitores CML-495 y CML-549 hembra y macho respectivamente, mostraron efectos negativos de ACG, estas líneas se consideran como pobres combinadores para mejorar los rasgos de todas las variables en

**Tabla 5. Efectos de aptitud combinatoria general (ACG) de líneas machos y hembras de maíz en el diseño II de Carolina del Norte en el sur de Sonora, México, 2021.****Table 5. General combining aptitude (GCA) effects of maize male and female lines using the North Carolina Design II in southern Sonora, Mexico, 2021.**

Progenitor	DFF (días)	AM (m)	GH (número)	HM (número)	RG (t ha <sup>-1</sup> )	PMG (g)	PH (kg hL <sup>-1</sup> )	IF (%)
CML-264	3,38	-3,39	1,15	0,32	0,64	0,32	1,34	3,75
CML-494	-0,46	1,92	1,42	1,11	0,22	1,11	0,72	6,12
CML-495	1,74	1,30	-0,01	0,22	-1,55	-0,24	-0,68	-2,43
CML-500	2,48	0,64	-0,11	0,24	0,58	-0,54	2,55	-9,97
CML-545	3,52	1,33	0,68	0,54	0,90	0,22	-2,07	4,15
CML-549	0,18	-2,35	-0,07	0,02	-0,33	0,02	-1,52	-0,08
CML-550	0,37	1,91	0,14	0,11	0,70	0,11	2,80	1,43
CML-542	0,29	0,86	0,23	0,18	0,53	0,18	2,31	2,22
CML-555	0,29	0,49	0,11	0,06	0,6	0,06	0,95	0,06
DMS (0,05)	1,31	0,30	-0,36	0,14	0,26	0,14	0,20	0,09

DFF= días a floración femenina, AM= altura de mazorca, GH= granos por hilera, HM= hileras por mazorca, RG= rendimiento de grano, PMG= peso de mil granos, PH= peso hectolítrico, IF= índice de flotación.

estudio. Estos resultados fueron comparables con el hallazgo de Tolera et al. (2017); Yazachew et al. (2017) mencionaron que los efectos negativos de ACG pueden influir en la capacidad de combinación y heterosis. Estas líneas parentales podrían usarse en un programa de mejoramiento híbrido con el fin de mejorar aumentar el nivel de su capacidad combinatoria (Pavan et al., 2010).

#### Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE)

Los efectos de ACE son criterios importantes para determinar el potencial y eficiencia de los híbridos (Mogesse et al., 2020). La estimación de los efectos específicos de los 20 híbridos resultantes en diferentes caracteres que contribuyeron al rendimiento se presenta en la Tabla 5, las estimaciones revelaron que los híbridos CML-264x CML-550, CML-264x CML-542 y CML-500x CML-549 obtuvieron valores positivos y superiores mostrando mejor capacidad de combinación para DFF, AM, GH y NH. Estos resultados fueron similares a los reportados por Chukwu et al. (2016), quienes mencionaron que las líneas pueden ser seleccionadas para características deseables para encontrar híbridos de buen porte de altura, mayor número de granos por hilera y que sean de un ciclo intermedio como el que se requiere en el sur de Sonora; sin embargo, los híbridos CML-545x CML-549, CML-495x CML-549 mostraron efectos negativos, lo que indica que por sus efectos no son los más idóneos para estos caracteres (López et al., 2019; Sandesh et al., 2018),

Los efectos en RG, PMG, PH e IF indicaron

que los híbridos CML-494x CML-550, CML-494x CML-542 y CML-264x CML-550 exhibieron valores superiores y positivos para estas variables, por lo tanto, estos potenciales híbridos identificados a través de esta investigación podrían ser promovidos para las condiciones climáticas en el sur de Sonora, generalmente los híbridos representan buena acción génica; por lo contrario, los híbridos CML-545x CML-555, CML-545x CML-549 y CML-500x CML-555 exhibieron efectos negativos lo que indica que estas combinaciones tendieron a una acción génica indeseable (Mogesse et al., 2020; Ali et al., 2019).

#### Parámetros genéticos

Al estimar los componentes genéticos (Tabla 6), se observa que la varianza de hembras y su interacción M\*H fue superior a la de machos en RG, PMG, IF, GH, y PH principalmente; sin embargo, en FF y AM presentaron valores inferiores, estos valores pudieron influir que las hembras contribuyeron más en la aptitud combinatoria general y específica, en donde se puede pronosticar que a mayor PMG y PH se pueda obtener mayor rendimiento (Rodríguez et al., 2019). La varianza aditiva tuvo mayor valor para todas las variables, estos valores encontrados son un pronóstico aceptable para seleccionar germoplasma que tengan buena respuesta agronómica, para la formación de híbridos con mayor probabilidad de éxito al tener características agronómicas deseables como en este estudio (Meléndrez, 2018).

Estos resultados se atribuyen a la diversidad de la constitución genética de las líneas,

**Tabla 6. Efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) de las cruzas de maíz en el diseño II de Carolina del Norte en el sur de Sonora, México, 2021.****Table 6. Specific combining aptitude (SCA) effects of maize crosses using the North Carolina Design II in southern Sonora, Mexico, 2021.**

Cruza	DFE (días)	AM (m)	GH (número)	HM (número)	RG (t ha <sup>-1</sup> )	PMG (g)	PH (kg hL <sup>-1</sup> )	IF (%)
CML-264x CML-549	0,14	2,78	0,38	0,42	0,23	2,42	1,11	3,63
CML-264x CML-550	7,62	3,88	1,56	0,61	0,57	5,21	3,21	17,02
CML-264x CML-542	6,13	4,19	1,71	1,43	0,33	4,37	2,80	16,53
CML-264x CML-555	4,63	14,27	0,18	0,51	0,39	4,88	3,07	16,05
CML-494x CML-549	4,13	4,19	0,15	0,44	-0,01	3,18	0,60	1,48
CML-494x CML-550	5,13	7,41	0,87	0,64	1,06	6,88	3,79	16,53
CML-494x CML-542	5,13	-4,63	0,82	0,52	0,79	5,31	3,46	20,39
CML-494x CML-555	5,13	4,19	0,39	0,42	0,30	4,88	1,88	7,85
CML-495x CML-549	-1,35	18,27	-1,29	-0,50	-0,24	-2,96	0,13	1,19
CML-495x CML-550	4,13	-0,95	0,79	0,11	0,23	4,16	1,08	3,22
CML-495x CML-542	4,13	-0,68	0,14	0,04	0,18	3,97	0,95	2,98
CML-495x CML-555	0,14	6,48	-0,49	-0,68	0,24	1,71	1,84	5,66
CML-500x CML-549	1,64	0,89	-0,43	-0,48	-0,07	1,76	0,22	0,68
CML-500x CML-550	5,13	5,52	0,47	0,00	0,31	3,72	2,74	10,75
CML-500x CML-542	4,63	17,48	0,12	-0,16	0,17	1,97	0,75	2,66
CML-500x CML-555	2,64	-9,18	-0,43	-0,46	-0,41	2,89	0,27	-0,83
CML-545x CML-549	0,14	7,43	-0,67	-1,06	-0,48	1,40	-0,03	0,49
CML-545x CML-550	3,63	8,91	0,10	-0,36	0,01	3,10	0,72	2,55
CML-545x CML-542	3,63	0,93	-0,16	-0,40	0,31	2,56	1,92	8,27
CML-545x CML-555	2,64	-4,63	-0,34	-0,78	-0,04	1,36	-0,26	1,58
DMS (0,05)	3,46	4,34	0,19	0,01	0,19	8,14	6,54	5,21

DFE= días a floración femenina, AM= altura de mazorca, GH= granos por hilera, HM= hileras por mazorca, RG= rendimiento de grano, PMG= peso de mil granos, PH= peso hectolítrico, IF= índice de flotación.

que al aparearse forman individuos de tipo heterocigótico, que reducen los efectos aditivos, Por tal razón, es de suponerse que todas las variaciones están estimadas con base en el comportamiento genético determinado como varianza de dominancia y aditiva, lo cual fue de esperarse puesto que existió mayor expresión heterótica en los híbridos por efecto de la ACE de la mayoría de las líneas (Tabla 7), lo que dio como resultado un valor más alto de heredabilidad en el sentido amplio y estrecho por efecto de la varianza de dominancia (Rahman et al., 2016; Ewool et al., 2017).

De la misma forma, Wuhaib et al. (2017) indicaron que los valores mayores a la unidad en la estimación del grado de dominancia proporcionan información para explotar la heterosis y para incrementar el rendimiento en el cultivo de maíz. Se observaron importantes combinaciones heteróticas entre las cruzas de las líneas, las cuales pueden ser explotadas para el desarrollo de nuevos híbridos contrastantes en corto tiempo para las condiciones climáticas del Sur de Sonora, La varianza genotípica se origina por las diferencias que existen entre genotipos,

por lo que mientras sea mayor el número de loci segregantes, mayor será el número de genotipos diferentes en la población (Hamid et al., 2018).

## CONCLUSIONES

Las hembras CML-264 y CML-500; los machos CML-500 y CML-542 tuvieron los mayores promedios en todas las variables. Los efectos de la aptitud combinatoria general (efectos aditivos) fueron más importantes para días a floración femenina, altura de mazorca, granos por hileras, hileras por mazorca, peso hectolítrico e índice de flotación; los efectos de la aptitud combinatoria específica (efectos no aditivos) fueron más importantes para días a floración femenina, altura de mazorca, peso de mil granos e índice de flotación. Las líneas consideradas como hembras CML-494, CML-545 y CML-264, los machos CML-550 y CML 542 presentaron mayor efecto para aptitud combinatoria general para las variables mencionadas. Los híbridos (CML-264x CML-550), (CML-264x CML-555) y (CML-494x CML-550) destacaron por ser más tardíos, de porte medio, de mayor rendimiento,

**Tabla 7. Valores estimados de los parámetros genéticos de ocho características agronómicas de maíz, evaluadas bajo el diseño II de Carolina del Norte en el sur de Sonora, México, 2021.****Table 7. Estimated values of the genetic parameters of eight agronomic characteristics of maize, evaluated under the North Carolina Design II in southern Sonora, Mexico, 2021.**

	$\delta^2 M$	$\delta^2 H$	$\delta^2 MH$	$\delta^2 G$	$\delta^2 A$	$\delta^2 D$	$\delta^2 F$	$\delta^2 H^2$	$\delta^2 h^2$
DFF (días)	3,47	0,23	18,28	5,66	515,49	73,10	0,20	0,82	0,52
AM (m)	0,10	0,28	0,54	0,63	412,11	2,15	13,20	0,96	0,50
GH (número)	3,61	17,59	12,21	30,83	123,32	48,86	0,81	0,99	0,55
HM (número)	6,92	0,96	2,70	3,51	34,71	10,80	0,67	0,97	0,50
RG (t ha <sup>-1</sup> )	16,41	93,81	21,95	128,87	235,54	87,79	2,75	1,00	0,61
PMG (g)	26,73	65,24	38,97	56,68	72,64	15,88	9,05	1,00	0,71
PH (kg hL <sup>-1</sup> )	0,86	10,61	5,66	29,62	140,03	22,64	0,04	1,00	0,61
IF (%)	4,30	56,52	62,56	103,03	118,46	250,22	7,79	0,99	0,70

$\delta^2 M$ =varianza de machos,  $\delta^2 H$ =varianza de hembras,  $\delta^2 M^*H$ = varianza machos\*hembras,  $\delta^2 G$ = varianza genotípica,  $\delta^2 A$ =varianza aditiva,  $\delta^2 D$ = varianza de dominancia,  $\delta^2 F$ =varianza fenotípica,  $H^2$ =heredabilidad en sentido amplio y  $h^2$ =heredabilidad en sentido estrecho.

peso de mil granos, peso hectolitrico e índice de flotación y presentaron los mayores efectos de aptitud combinatoria específica positivos; el híbrido (CML-545x CML-542) se destacó en precocidad obteniendo rendimientos aceptables en promedios intermedios.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por haber proporcionado el germoplasma para la ejecución del presente proyecto de investigación.

### Conflictos de intereses

Los autores firmantes del presente trabajo de investigación declaran no tener ningún potencial conflicto de interés personal o económico con otras personas u organizaciones que puedan influir indebidamente con el presente manuscrito.

### LITERATURA CITADA

Acquaah, G. 2012. Principles of plant genetics and breeding. 2a(Ed.). Wiley-Blackwell, Oxford. 740 p.

Acevedo-Cortés, M., A. Castillo-Gutiérrez, M. Andrade-Rodríguez, M. Nuñez-Valdez, F. Perdomo-Roldan y R. Suárez-Rodríguez. 2020. Aptitud combinatoria y potencial agronómico de líneas de maíz con diferente nivel de endogamia. Acta Agrícola y Pecuaria 6(1). <https://doi.org/10.30973/aap/2020.6.0061023>.

Ali, A.H., A.J. Abubakar, M.O. Hassan, and B.B.K. Bhabendra. 2019. Study on combining ability and heterosis in maize (*Zea mays* L.) using partial diallel analysis. International Journal of Plant Breeding and Crop Science 6(2): 520-526.

Comstock, R.E., and H.F. Robinson. 1948. The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. Biometrics 4:254-266. <https://doi.org/10.2307/3001412>.

Chukwu, S.C., E.O. Okporie, G.C. Onyishi, L.G. Ekwu, A.C. Nwogbaga and N.V. Ede. 2016. Application of diallel analyses in crop improvement. Agric. Biol. J. N. Am. 7(2): 95-106.

Dzib, A.L.A., C.C.J. Segura, R.P. Ortega, y L.M. Latournerie. 2011. Cruzas dialélicas entre poblaciones nativas de Yucatán y poblaciones mejoradas. Trop. Subtrop. Agroecosys 14(1):119-127. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93915703010>.

Ewool, B.M., and R. Akromah. 2017. Genetic variability, coefficient of variance, heritability and genetic advances of Pro-Vitamin A maize hybrids. Inter. J. Agric. Innov. Res. 6(1):84-90.

García, E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. [http://cdigital.dgb.uanl.mx/1a/1020081042/1020081042\\_011.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/1a/1020081042/1020081042_011.pdf) (Noviembre, 2021).

Hamid, K.M., A. Ahmad, M. Hussain, and A. Hassan. 2018. Heritability and trait association studies in maize F1 hybrids. Inter. J. Bios. 12(1):18-26. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03624683/>.

- López, M.F., C.H.J. Chura y P.G. García. 2019. Interacción genotipo por ambiente del rendimiento de maíz amarillo en híbridos trilineales, Perú. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(4):859-872. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1696>.
- López, L.C., R.M. Tadeo, Z.J.J. García, C.A. Espinoza y C.J.A. Mejía. 2021. Aptitud combinatoria general y específica de híbridos varietales de maíz amarillo de baja endogamia. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 12(4):669-771. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2786>.
- Matin, M.Q.I., M.G. Rasul, A. Islam, M.K. Mian, N.A. Ivy, and J.U. Ahmed. 2017. Combining Ability and Heterosis in Maize (*Zea mays* L.). *American Journal of Biological Science* 4 (6): 84-90.
- Martínez-Gutiérrez, A., B. Zamudio-González, M. Tadeo-Robledo, A. Espinosa-Calderón, J.C. Cardoso-Galvão, G. Vázquez-Carrillo y A. Turrent-Fernández. 2018. Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(7):1447-58. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>.
- Melendres, M.J.I., B.R. Valdivia, F.C. Lemus, L.M. García, C.M. Ortiz, C.A. Espinoza y R.M. Tadeo. 2018. Estimación de parámetros genéticos de maíz bajo mejoramiento por selección recíproca recurrente. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(7):1327-1337. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1668>.
- Pavan, R., G. Prakash, and N.M. Mallikarjuna. 2016. General and specific combining ability studies in single cross hybrids of maize (*Zea mays* L.). *Current Biotica* 5(2):196-208. [https://ets-staffing.com/currentbiotica/Journals5-IssueII/CB-5\(2\)-Full-length-9.pdf](https://ets-staffing.com/currentbiotica/Journals5-IssueII/CB-5(2)-Full-length-9.pdf).
- Rahman, H., M. Habibullah, L. Shah, A. Ali, and K. Shah. 2016. Heritability and genetic advance estimates for yield improvement in maize (*Zea mays* L.). *J. Agric. Biol. Sci.* 4(11):116-120. [http://www.arpnjournals.org/jabs/research\\_papers/rp\\_2016/jabs\\_0416\\_787.pdf](http://www.arpnjournals.org/jabs/research_papers/rp_2016/jabs_0416_787.pdf).
- Rodríguez-Pérez, G., F. Zavala-García, J.E. Treviño-Ramírez, M.C. Ojeda-Zacarias, M. Mendoza-Elos, F. Cervantes-Ortiz, A. Gámez-Vázquez, E. Andrio-Enríquez, and J. Torres-Flores. 2019. Estimación de componentes genéticos en líneas endogámicas de maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia* 53(2):245-258.
- Sugiharto, A.N., A.A. Nugraha, A. Waluyo, and N.R. Ardiarini. 2018. Assessment of combining ability and performance in corn for grain yield and yield components. *Journal by Innovative Scientific Information and Services Network* 15(2): 1225-1236.
- Sandesh, G.M., A. Karthikeyan, D. Kavithamani, K. Thangaraj, K.N. Ganesan, and N. Senthil. 2018. Heterosis and combining ability studies for yield and its component traits in Maize (*Zea mays* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding* 9(3): 1012-1023. 10.5958/0975-928X.2018.00126.6.
- SAS. 2015. Statistical Analysis System. Release 9.3 for Windows. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Sprague, G.F., and L.A. Tatum. 1942. General versus specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34(10):264-275. <https://doi.org/10.2134/agronj1942.00021962003400100008x>.
- SIAP. 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Tolera, K., W. Mosisa, and Z. Habtamu. 2017. Combining ability and heterotic orientation of mid-altitude sub-humid tropical maize inbred lines for grain yield and related traits. *African Journal of Plant Science* 11(6): 229-239. DOI: 10.5897/AJPS2016.1502.
- Valencia-Romero, R., H. Sánchez-Bárcenas y D. Robles-Ortiz. 2019. Soberanía Alimentaria de granos básicos en México: un enfoque de cointegración de Johansen a partir del TLCAN. *Análisis Econ.* 37(87):223-248.
- Virgen, V.J., B.R. Zepeda, P.M.A. Ávila, C.A. Espinosa, V.J.L. Arellano y V.A. Gámez. 2016. Producción y calidad de semillas de maíz en Valles Altos de México. *Agron. Mesoam.* 27(1):191-206
- Vélez-Torres, M., J. García-Zavala, R. Lobato-Ortiz, I. Benítez, J. López-Reynoso, J. Mejía-Contreras, and G. Esquivel-Esquivel. 2018. Estabilidad del rendimiento de cruza dialélicas entre líneas de maíz de alta y baja aptitud combinatoria general. *Rev. Fitotec. Mex.* 41(2):167-175. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.167-175>.
- Mogesse, W., H. Zelleke, and M. Nigussie. 2020. General and Specific Combining Ability of Maize (*Zea mays* L.) Inbred Line for Grain Yield and Yield Related Traits Using 8×8 Diallel Crosses. *American Journal of BioScience* 8(3): 45-56. doi: 10.11648/j.ajbio.20200803.11

- Wuhaib, K.M., B.H. Hadi, and W.A Hassan. 2017. Estimation of genetic variation components, average degree of dominance and heritability for several traits of maize in four crosses. *J. Agric. Veterinary Sci.* 10(10):53-57. DOI: 10.9790/2380-1010015357.
- Yazachew, G., P. Tongoona, and I. Beatrice. 2017. General and Specific Combining Ability Studies of Selected Tropical White Maize Inbred Lines for Yield and Yield Related Traits. *International Journal of Agricultural Science and Research* 7(2): 381-396.