

Evaluación del rendimiento de híbridos provenientes de líneas endocriadas de maíz criollo (*Zea mays*) del departamento del Magdalena

Evaluation of the yield of hybrids of endogamous lines of local maize (*Zea mays*) from the Magdalena department

Andrés Clemente-Fuentes , Manuel Humberto Meneses-Hernández y Catherine Pardey-Rodríguez* 

Programa de Ingeniería Agronómica, Universidad del Magdalena, Magdalena, Colombia

Resumen

Se evaluó germoplasma de maíz criollo procedente del departamento del Magdalena preservado en los laboratorios del Programa de Ingeniería agronómica de la Universidad del Magdalena que permitiera conocer el potencial agronómico y conveniencia de su reintroducción a comunidades agrícolas. Para ello, se estimó la aptitud combinatoria general y específica para identificar las poblaciones sobresalientes. Se emplearon cinco genotipos de maíz criollo aumentados por autofecundación, que luego fueron cruzados entre sí a través de un cruzamiento dialélico 5x5. Las poblaciones híbridas F1 fueron evaluadas por rendimiento bajo las condiciones agroecológicas de la Granja Experimental de la Universidad del Magdalena ubicada en la ciudad de Santa Marta, Colombia en el segundo semestre del año 2017. El diseño estadístico empleado fue el Modelo Fijo con el Método 2 de Griffing para determinar los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) que permite identificar los mejores progenitores con habilidad para transmitir sus caracteres deseables a la descendencia, y la aptitud combinatoria específica (ACE) para la identificación de aquellas combinaciones híbridas F1 sobresalientes para la característica de rendimiento. Se pudo observar que en los progenitores el efecto genético aditivo fue similar para la expresión del rendimiento en las combinaciones híbridas. En la comparación de los híbridos se presentó el efecto de dominancia en los híbridos que comparten los parentales: 11,3202 y 3203. Y entre cruzamientos que no compartieron ningún parental: (87 x 3202) & (88 x 3203) \wedge (88 x 3202) & (11 x 3203).

Palabras clave: modelo de Griffing; dialélico; aptitud combinatoria general; aptitud combinatoria específica

Abstract

Local maize germplasm from the department of Magdalena preserved in the laboratories of the Agronomic Engineering Program of the University of Magdalena was evaluated, which would allow knowing the agronomic potential and convincing its reintroduction to agricultural communities. The general and specific combinatorial capacity was estimated to identify the outstanding populations. Five genotypes of local maize requested by self-pollination were used, then crossed with each other through a 5x5 diallel cross. The populations of F1 hybrids were evaluated in yield under the agro-ecological conditions of the Experimental Farm of the Universidad del Magdalena located in the city of Santa Marta, Colombia, in the second semester of 2017. The statistical design used was the Fixed Model with Griffing 2 Method to determine the effects of the general combinatorial capacity (ACG) that allows identifying the best parents with the capacity to transmit their desired characters to the offspring and the specific combinatorial capacity (ACE) for the identification of those outstanding F1 hybrid combinations for the performance characteristic. It was observed that the additive genetic effect in the parents was similar to the yield expression in the hybrid combinations. In the comparison of the hybrids, the dominance effect was present in the hybrids that share a parent: 11.3202, and 3203. And among crosses that did not share any parent: (87 x 3202) & (88 x 3203) \wedge (88 x 3202) and (11x3203).

Key words: Griffing model; diallelic; general combining ability; specific combinatorial aptitude

*Autor de correspondencia:

catherinepardey@unimagdalena.edu.co

Editor: Gabriel Navas Suárez

Recibido: 28 de abril de 2022

Aceptado: 27 de junio de 2022

Publicación en línea: 30 de junio de 2022

Citación: Clemente-Fuentes, A., Meneses-Hernández, M.H. y Pardey-Rodríguez, K. 2022. Evaluación del rendimiento de híbridos provenientes de líneas endocriadas de maíz criollo (*Zea mays*) del departamento del Magdalena, Caribe colombiano.

Intropica 17(1): 88-96. Doi:

<https://doi.org/10.21676/23897864.4039>

Introducción

En el año 2019 Colombia fue el séptimo país en el mundo en importar maíz y el primero en Sudamérica (Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), 2019). Este grano es la dieta de los colombianos al ser componente fundamental de alimentos como arepas, mazamorra y sopas, entre muchos otros (Gómez *et al.*, 2009). Así mismo, se utiliza en la fabricación de alimentos empleados en granjas avícolas, porcinas, acuicultura y mascotas (Federación nacional de cultivadores de cereales, leguminosas y soya (FENALCE, 2021). En Colombia se manejan dos sistemas de producción de maíz: tecnificado y tradicional; el primero con rendimientos alrededor de 5,4 t/ha y el tradicional con 2 t/ha (Fenalce.co/estadística, 2021). La productividad del maíz en Colombia es alta porque se consume a un ritmo mayor al que se produce, que depende de las importaciones principalmente del maíz de Estados Unidos (FENALCE, 2021). En el departamento del Magdalena, debido a las altas temperaturas y escasas del agua, se proyectan reducciones del rendimiento del maíz, de ahí, el desarrollo de variedades adaptadas a los climas futuros (Paliwal, 2001a; Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2019; Lozano *et al.*, 2021). El acceso a semillas de buena calidad es indispensable porque mejora la calidad de la mazorca y la producción, por tanto, la rentabilidad (Paliwal, 2001a). El mejoramiento del maíz se puede dar mediante el aumento de la frecuencia de genes favorables en comparación con la población original y el desarrollo de híbridos es una población F1 con vigor; sin embargo, también se reconoce el desarrollo de híbridos como alternativa al mejoramiento de poblaciones de maíz en donde el tipo de semilla que se produce presenta un rendimiento de grano superior a sus padres como consecuencia de la heterosis, la cual ofrece un potencial heterótico en los germoplasmas que permitirán establecer el desarrollo de trabajos, sea para las variedades (poblaciones mejoradas) o en híbridos (Comstock *et al.*, 1949; Paliwal, 2001b).

La variabilidad genética define como las variaciones heredables que ocurren en la planta, entre los individuos de una población y entre poblaciones de una especie, estableciéndose como el componente básico de la diversidad de las especies (Vega, 1988). La variabilidad genética permite integrar poblaciones de amplia base genética, las cuales sirven como material base en los programas de mejoramiento genético con el fin de incrementar el rendimiento y otros caracteres; sin embargo, el uso real de la variabilidad genética es limitado (Rimieri, 2017).

En el carácter de rendimiento se realizan esfuerzos por diversificar el acervo del germoplasma cruzando entre diferentes poblaciones y creando grupos heteróticos (Paliwal, 2001b). Vega (1988) registró la variable rendimiento como una característica controlada por muchos genes, se caracteriza por exhibir una distribución continua de fenotipos y está influenciada por el ambiente; la expresión del genotipo es debida a efectos aditivos, de dominancia y epistasia. El rendimiento es una característica cuantitativa donde hay que tener en cuenta la cantidad y calidad de la variabilidad genética existente en la población para desarrollar el método de selección adecuado para este carácter (Vega, 1988).

Existen diversas metodologías para el estudio de la variabilidad genética entre ellas los cruzamientos dialélicos, esta metodología trata de proveer información temprana sobre el comportamiento genético de los atributos de interés en la primera generación filial (F1) que permite obtener información de la aptitud combinatoria que se puede obtener entre los progenitores y la progenie y así, direccionar el método de mejoramiento (Griffing, 1956; Vega, 1988; Lagos *et al.*, 2003). Los conceptos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) son conceptos desarrollados por los fitomejoradores en maíz para explorar la heterosis en el desarrollo de híbridos comerciales, seleccionando líneas endogámicas, y evaluando la variabilidad genética de la población, así como también para identificar patrones heteróticos (Vega, 1988; Lagos *et al.*, 2003). Los conceptos de ACG y ACE fueron definidos por Sprague y Tatum (1942) quienes señalaron el ACG como el comportamiento promedio de una línea en combinaciones híbridas; para esto toma un grupo de parentales, cada parental se cruza con el resto de los parentales que integran un grupo, y el comportamiento promedio de la primera generación filial resultante (F1) es la base para valorar la capacidad combinatoria entre ellos (Vega, 1988; Lagos *et al.*, 2003). El término ACE es usado para designar aquellos casos en los cuales ciertas combinaciones F1's resultantes se comportan relativamente mejor o peor que el comportamiento promedio de los parentales involucrados, esto es una desviación de la aptitud combinatoria general de ambos parentales que intervinieron en el cruzamiento.

El CIAT y el CIMMYT (2019) registraron para Colombia 23 razas y 5600 accesiones para salvaguardar la biodiversidad de la especie. En el cultivo de maíz en la zona rural del Magdalena se presentan poblaciones criollas, conocidas como materiales locales; estas poblaciones se caracterizan porque son de bajo rendimiento adaptadas por selección natural y artificial

mantenida por los sistemas de producción agrícola familiar (Roberts et al., 1957). El germoplasma criollo posee adaptación local; siendo así un recurso genético valioso que se debe de conservar; estos materiales criollos tienen estabilidad y sostenibilidad económica (Paliwal, 2001c; Grupo Semillas, 2005). El recurso fitogenético con el que cuenta el Programa de Ingeniería Agronómica de la Universidad del Magdalena está conformado por genotipos criollos de este departamento (Pardey et al., 2016). Estudiar la diversidad genética presente en estos materiales criollos y explorar sus bondades permitirá valorar nuevos arreglos genéticos que expresen un mayor rendimiento del grano. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue estimar los efectos de la ACG de cinco líneas de maíz criollo y la ACE de sus cruza directas para el rendimiento.

Materiales y métodos

El estudio se realizó a partir de agosto de 2017 en la granja de la Universidad del Magdalena, Colombia, ubicada en la ciudad de Santa Marta entre las coordenadas 74° 12' 06" LO y 11° 14' 50" LN. Esta se caracteriza por presentar un clima cálido con temperatura mínima de 25°C y máxima de 32°C. La precipitación de 453 mm, velocidad del viento de 1 a 6 m/s, radiación solar acumulada por día de 18,5 MJm²/d, humedad relativa media de

75 %, suelo arenoso seco típico (Vásquez et al., 2010), vegetación xerofítica; y un ecosistema de bosque seco tropical (Bs-T) (IDEAM, 2018).

El germoplasma fue donado inicialmente por la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira (tabla 1). Con base en el material donado se realizó la producción en la granja experimental de la Universidad del Magdalena realizando cruzamientos fraternales (Pardey Rodríguez, 2014) en donde se caracterizó el germoplasma (Pardey, García y Moreno, 2016); la siguiente generación se autofecundó (S1), parte de la semilla S1 se utilizó para crear semilla híbridos F1. La evaluación de la semilla F1 (tabla 2) y sus parentales (tabla 1) se evaluaron bajo un diseño dialélico 5x5; el diseño de siembra en campo fue de bloques completos al azar con 15 tratamientos (cinco parentales y diez híbridos), tres repeticiones/bloque; cada tratamiento se sembró en parcelas formadas por cuatro surcos, espaciados a 80 cm entre surco y 20 cm entre planta, para un total de 52 plantas/tratamiento. El comportamiento de la semilla híbrida y los parentales se evaluó en función del rendimiento en toneladas por hectárea con base en la producción de la parcela; se calculó el peso de todas las mazorcas, se hizo un cálculo por parcela y se extrapoló a toneladas por hectárea (CIMMYT, 2012).

Tabla 1. Pasaporte de genotipos de maíz criollo procedentes del departamento del Magdalena utilizados en un cruzamiento dialélico 5x5 evaluado en el Centro de Desarrollo Agrícola y Forestal de la universidad del Magdalena, Colombia 2017. NN= sin identificación.

Entrada	DPTO	Municipio	Longitud	Latitud	msnm	Color grano
87	Magdalena	Pivijay	74,23008	10,27455	24	Amarillo rojizo
88	Magdalena	Fundación	74,11195	10,31231	49	Amarillo
11	Magdalena	Fundación	74,11	10,31	53	Amarillo
3202	Magdalena	NN	NN	NN	NN	Amarillo
3203	Magdalena	NN	NN	NN	NN	Amarillo y blanco

Tabla 2. Diseño de un cruzamiento dialélico 5x5 entre líneas endocriadas (S1) de maíz criollo procedentes del departamento del Magdalena crecido en la Granja Experimental de la universidad del Magdalena, Colombia 2017.

	87	88	11	3202	3203
87	87 x 87 (S1)	87 x 88	87 x 11	87 x 3202	87 x 3203
88		88 x 88 (S1)	88 x 11	88 x 3202	88 x 3203
11			11 x 11 (S1)	11 x 3202	11 x 3203
3202				3202 x 3202 (S1)	3202 x 3203
3203					3203 x 3203 (S1)

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para comparar los valores de la media del rendimiento de los tratamientos en un ambiente con error alfa de 5 %. El modelo genético para el análisis de los datos fue el método 2 de Griffing 1956, el cual se describe como un cuadro de cinco filas y cinco columnas donde los padres (X_{ii}) están ubicados en la diagonal que son el producto de autofecundaciones (S_1) y las cruza directas (X_{ij}) están sobre la diagonal, la cuales son cruza que tienen en común el padre i (tabla 2). Un modelo fijo fue calculado, en el cual los progenitores han sido deliberadamente seleccionados. Los efectos genéticos ACG para las cinco líneas endocriadas y la Aptitud Combinatoria Específica (ACE) para los diez híbridos fueron estimados. Se utilizó la Suma de los Cuadrados Medios para estimar los efectos de ACG a los parentales (g_i) y ACE a los híbridos (s_{ij}). El Coeficiente de Variación (CV) se calculó con base en el cuadrado medio del error que representó la varianza del experimento y la media general (Lagos y Criollo, 2018).

El valor del ij -ésimo genotipo (X_{ij}) fue una función lineal del valor promedio de cada uno de los gametos (g_i, g_j) que se combinaron para formar el genotipo, más la interacción entre dichos gametos (s_{ij}):

$$X_{ij} = g_i + g_j + s_{ij}$$

La varianza genética (σ^2_G) para los individuos $A_iA_jB_kB_l$ en la población, se descompuso de la siguiente manera:

$$\sigma^2_G = \sigma^2_A + \sigma^2_D + \sigma^2_{AA} + \sigma^2_{AD} + \sigma^2_{DD}$$

El efecto efectos de aptitud combinatoria general se relacionó con el gameto A_iB_k fue:

$$g_{ik} = \alpha_i + \alpha_k + (\alpha \alpha)_{ik}$$

Donde: α_i y α_j = efectos genéticos aditivos

$(\alpha \alpha)_{ik}$ = efectos epistáticos aditivos por aditivos

La varianza genotípica total se fraccionó en varianza para ACG y varianza para ACE:

$$\sigma^2_G = \sigma^2_{ACG} + \sigma^2_{ACE}$$

El modelo matemático para la ijk -ésima observado fue:

$$x_{ijk} = u + v_{ij} + b_k + e_{ijk}$$

u = efecto promedio de la población

v_{ij} = efecto del ij -ésimo genotipo

b_k = efecto del k -ésimo bloque

e_{ijk} = efecto residual

$v = 1, 2, \dots, n$

$b = 1, 2, \dots, r$

Para el método 2 la sumatoria usada fue:

$$X_i = \sum X_{ij} = X_{i1} + X_{i2} + X_{i3}$$

Donde $X_{ij} = X_{ji}$; X_{jj} no se consideró

$$X_{..} = \sum \sum X_{ij} = X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{22} + X_{23} + X_{33}$$

La prueba de F es: $F[(\alpha-1), m] = Mv/Me$

El modelo correspondiente al método 2 de Griffing fue:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + G_j + S_{ij} + B_k + (GB)_{ijk} + (1/rn) \sum e_{ijk}$$

La suma de cuadrados de genotipo se fraccionó en:

$$Sc_{acg} = \{[\sum \sum T_{i.} + T_{.i}]^2 / r - 4*(T_{...})^2 / (pr)\} / (p+2)$$

$$Sc_{ace} = [\sum \sum X_{ij}^2 / r] -$$

$$\{[\sum (T_{i.} + T_{.i})^2 / (r(p+2))] + [2*(T_{...})^2 / (r*(p+1)*(p+2))]\}$$

Los cálculos de los efectos de ACG para cada padre:

$$g_i = [(T_{i.} + T_{.i}) / r - (p+2)] - 2T_{...} / (r(p+2))$$

Las varianzas de estos mismos parámetros para probar si son iguales a cero:

$$\delta^2(g_i) = (p-1) \delta^2_e / r(p+2)$$

$$\delta^2(g_i - g_j) = 2\delta^2_e / r(p+2)$$

$$\text{Test (Ho: } g_i = 0) \rightarrow t = g_i - 0 / \sigma(g_i)$$

Los cálculos de los efectos ACE para cada cruce

$$S_{ij} = [(C_{ij}) / r] - \{[(T_{i.} + T_{.i}) + (T_{j.} + T_{.j})] / r(p+2)\} + [(2T_{...} / r(p+1)(p+2))]$$

Estimación de los efectos de actitud combinatoria específica de cada cruce

$$\delta^2(s_{ij}) = r(p-1) \delta^2_{error} / r(p+1)(p+2)$$

$$\delta^2(s_{ij}) = (p^2 + p + 2) \delta^2_{error} / r(p+1)(p+2)$$

$$\delta^2(s_{ij} - s_{ik}) = 2(p+1) \delta^2_{error} / r(p+2)$$

$$\delta^2(s_{ij} - s_{kl}) = 2(p) \delta^2_{error} / r(p+2)$$

Resultados

El rendimiento expresado en tonelada por hectárea (t/ha) de los cinco parentales evaluados en cada bloque fue diferente ($P < 0,05$), en la tabla 3 se describen los rendimientos promedio de los cinco progenitores y de los diez híbridos en cada bloque. El rendimiento promedio del ensayo fue de 2,324 t/ha. El promedio más bajo se registró para el parental 87 originario de Pivijay (0,53 t/ha) seguido de 11 proveniente de Fundación (1,2 t/ha), 3203 sin municipio reconocido del Magdalena (1,53 t/ha). Los parentales que tuvieron un rendimiento por encima de la media fueron 3202 sin municipio reconocido en el Magdalena (2,37 t/ha) y 88 proveniente de Fundación (2,5 t/ha). Cuatro parentales son de la raza Clavo, solo el parental 11 es Cariaco;

ambas razas pertenecientes a germoplasma introducido a Colombia. Tres híbridos estuvieron por debajo de la media 87x11 (2,286 t/ha), 88x3203 (2,285 t/ha) y 3202x3203 (1,413 t/ha); los otros siete estuvieron por encima; el de mayor promedio fue el 11 x 3203 (3,77 t/ha).

El análisis de varianza para rendimiento mostró que hubo diferencias entre los bloques y entre tratamientos ($P < 0,05$)

(tabla 4) a causa de la ubicación diferente entre las repeticiones y los tratamientos son líneas y poblaciones filiales F1. El efecto de tratamiento se descompuso entre parentales e híbridos, el efecto de los parentales se expresó en aptitud combinatoria general ACG y el de los híbridos en aptitud combinatoria específica ACE; las diferencias fueron a nivel de híbridos (tabla 4). El coeficiente de variación (CV) fue de 37,40 %.

Tabla 3. Rendimiento t/h de cinco progenitores y 10 híbridos de maíces criollos procedentes del departamento del Magdalena evaluados bajo las condiciones agroclimáticas de la Granja Experimental de la universidad del Magdalena, Colombia 2017.

Genotipo	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Promedio
Padres (S1)				
87	0,000	1,599	0,000	0,533
88	2,917	1,787	2,824	2,509
11	1,809	1,796	0,000	1,202
3202	2,663	2,378	2,096	2,379
3203	1,794	1,568	1,394	1,586
Híbridos F1				
87 x 88	2,470	3,246	2,598	2,771
87 x 11	2,286	3,247	0,000	1,844
87 x 3202	4,463	3,222	2,315	3,333
87 x 3203	1,611	2,778	3,583	2,657
88 x 11	2,698	3,294	2,389	2,794
88 x 3202	3,378	3,415	2,654	3,149
88 x 3203	2,285	2,782	0,000	1,689
11 x 3202	2,700	3,031	2,257	2,663
11 x 3203	3,841	3,841	3,648	3,777
3202 x 3203	1,413	2,870	1,625	1,970
Ȳ.. = 2,324 t/h				

Tabla 4. Análisis de varianza genética del dialélico 5x5 empleando líneas endocriadas (S1) de maíz criollo procedentes del departamento del Magdalena, Colombia 2017. *: diferencias significativas al 5%; FV = fuente de variación; GI = grados de libertad; CM = cuadrado medio; Fc = F calculado.

FV	GI	SC	CM	Fc	Ft
Repeticiones	2	6,265	3,132*	4,14	3,34
Genotipos	14	30,79	2,199*	2,91	2,024
ACG	4	5,03	1,257	1,64	1,664
ACE	10	25,759	2,575	3,410*	3,408
Error	28	21,158	0,755		
Total	44	58,214			
CV = 37,40 %					

La estimación de los efectos de ACG mostró valores positivos y negativos, demostrando que hay parentales que pueden incrementar y reducir el rendimiento; asimismo, la prueba de F comprobó la hipótesis nula, en donde los valores obtenidos fueron iguales a cero, confirmando que sí lo son; esto permite

inferir que el aporte genético que hizo cada progenitor al rendimiento fue similar (tabla 5). La falta de significancia estadística entre los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) y si estar presente los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE), indica que la varianza aditiva de los valores

heredables para el rendimiento es igual entre los progenitores, conllevando a que se clasifiquen como un mismo grupo heterótico.

El cálculo de los efectos de ACE manifestó vigor híbrido en los cruzamientos (tabla 6). La prueba de hipótesis Test-t Ho: $S_{ij} = 0$; mostró que, de 10 cruces, solo dos presentaron diferencias

significativas en los efectos de dominancia y fueron (87 x 3202=3,3 t/ha) y (11 x 3203= 3,7 t/ha). La prueba de hipótesis que valida si hay diferencias entre los rendimientos de los híbridos compartiendo un padre en común mostró cinco comparaciones significativas donde participaron los parentales 11, 3202 y 3203 y dos comparaciones donde no comparten ningún parental (tabla 6).

Tabla 5. Efectos de Aptitud Combinatoria General (ACG) para la variable rendimiento de líneas endocriadas de maíces criollos provenientes del departamento del Magdalena y test para validar si las diferencias entre los efectos aditivos son iguales o no a cero: Test-t Ho: $g_i = 0$.

Parental	ACG
87	-0,324 ns
88	0,211 ns
11	-0,065 ns
3202	0,275 ns
3203	-0,096 ns

Tabla 6 Efectos de Aptitud Combinatoria Específica (ACE) para la variable rendimiento de 10 cruces directas entre cinco líneas endocriadas de maíces criollos provenientes del departamento del Magdalena, Test para validar si las diferencias entre los efectos de dominancia son iguales o no a cero: Test-t Ho: $S_{ij} = 0$ y significancia entre cruzamientos.

Cruces	ACE
87 x 88	0,560 ns
87 x 11	-0,089 ns
87 x 3202	1,058 *
87 x 3203	0,754 ns
88 x 11	0,324 ns
88 x 3202	0,338 ns
88 x 3203	-0,749 ns
11 x 3202	0,129 ns
11 x 3203	1,615 *
3202 x 3203	-0,532 ns
Comparación entre cruces	
(87 x 11) x (11 x 3203)	*
(87 x 3202) x (3202 x 3203)	*
(87 x 3203) x (88 x 3203)	*
(88 x 3203) x (11 x 3203)	*
(11 x 3202) x (11 x 3203)	*
(87 x 3202) x (88 x 3203)	*
(88 x 3202) x (11 x 3203)	*

Discusión

Con base en nuestros resultados se pudo observar que los rendimientos de las líneas criollas de maíz fueron bajos, esto ha sido registrado por Paliwal (2001a) el cual relaciona las causas del bajo rendimiento del maíz con aspectos como el clima, la duración corta del día, el ciclo vegetativo corto del cultivo y el estrés abiótico propios de las regiones tropicales. Makumbi *et*

al. (2011) se refieren también a las sequías y a la baja en la fertilidad del suelo como factores limitantes en los rendimientos del maíz; no obstante, Santillano *et al.* (2021) sugieren que la aplicación de biofertilizantes como suplemento alternativo a la fertilización inorgánica en suelos deficientes en fosforo asimilable; sin embargo, no se ha encontrado una respuesta significativa en el rendimiento. Resultados obtenidos por Guamán *et al.* (2020) evaluaron cuatro híbridos en el que

consideraron que el rendimiento depende de la adaptación de la planta al ambiente y el desarrollo que la misma pueda alcanzar en la zona plantada; debido a que estas plantas bajo condiciones de estrés inciden en la productividad y la calidad del fruto.

En el caso de México, las variedades nativas han reportado valores desde 2,4 a 5,6 t/h (Ángeles-Gaspar *et al.*, 2010); mientras que en países suramericanos han sido registrados bajos rendimientos, en el caso de Colombia la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas registraron rendimientos bajos en la siembra tradicional de maíz criollo, 2.1 t/h en promedio, similar a lo reportado en el departamento Magdalena 2,00 t/h (Fenalce, 2021). El rendimiento de 11,11 t/ha es 1,1 t/ha. En Bolivia los valores fueron más bajos a los registrados para Colombia de dos variedades locales (cubano y pisingallo) donde los valores del rendimiento estuvieron entre de 11,11 t/ha, y 1,92 t/ha (Mamani y Echenique 2021). Durante el presente estudio los rendimientos del parental 88 (2,509 t/h) y 3202 (2,379 t/h) superaron los registros nacionales (2 t/ha); los parentales son líneas endocriadas (S1), que proceden de una primera autofecundación (tabla 3); esto se debe a que las siembras de líneas endogámicas suelen ser sensibles a las deficiencias nutricionales, pero pueden llegar a corregirse con fertilización foliar (MacRobert *et al.*, 2015). El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Centro internacional de Mejoramiento de maíz y trigo (CIMMYT) (2019) registraron proyecciones de siembra de maíz adaptado para el Caribe seco colombiano, teniendo en cuenta el pronóstico de aumento en la temperatura y disminución en la precipitación; esto se debe a que la temperatura se ha considerado como un factor importante en la formación del maíz debido a puede llegar a controlar la respuesta del desarrollo en los cereales, especialmente en las variedades que requieren vernalización para pasar del período vegetativo al reproductivo (Romero y Ortega, 2002). No obstante, Alvarado *et al.* (2019) encontraron que las diferencias en el rendimiento de maíces nativos de Puebla y Tlaxcala, México no se asociaron con ningún factor físico, sino a la raza del maíz.

Los progenitores del presente estudio provienen de diferentes municipios del Magdalena (Fundación (11, 88), Pivijay (87) y desconocido, simbolizado como NN (3202 y 3203) (tabla 2) en el que existen descriptores que son contrastantes entre los progenitores como lo registró Pardey y Moreno (2015) en la caracterización donde incluía estos materiales; los autores expresaron que el germoplasma evaluado no recogió toda la

diversidad existente para el departamento del Magdalena; desde esta perspectiva, se hace necesario contar con herramientas moleculares que permitan validar la base genética de este germoplasma, y de esta manera avanzar en mecanismos que conlleven al enriquecimiento de su variabilidad genética. Según lo anterior, el rendimiento que cada progenitor expresó fue una mezcla de genotipos homocigotos, existiendo una variabilidad intra poblacional. Romero y Ortega (2002) lo explicaron diferente al evaluar 49 poblaciones nativas, la divergencia genética se expresa como respuesta al proceso de selección bajo diferentes condiciones naturales, agronómicas y de usos, así como también por infiltración genética. A medida que se incrementa la diversidad genética de los progenitores también se incrementan las diferencias entre los cruzamientos, tanto en características morfológicas como fisiológicas, en el que la expresión de la heterosis es un indicador de la existencia de divergencia genética. La importancia de los efectos de dominancia al estar involucrados en el rendimiento para este grupo de parentales, sí se presentó vigor híbrido en ciertos híbridos que compartían un parental y entre cruzamientos que no compartían parental. Los parentales 11,3202 y 3 203 ha sido sugeridos para avanzar con la formación de líneas endocriadas para la creación de híbridos porque los parentales fueron quienes marcaron la diferencia entre los cruzamientos. Asimismo, se destaca que en este estudio los cruzamientos más rendidores 88 x 3202 (3,149 t/ha) y 11 x 3203 (3,777 t/ha) mostraron diferencias significativas al 0,05 % al valorar los efectos de dominancia diferentes de cero (tabla 6).

Muñoz *et al.* (2017) trabajaron con germoplasma criollo y evaluaron 24 cruzamientos producto de ocho parentales, encontrando que los efectos ACE fueron más importantes que los ACG para el rendimiento, debido a que se pudo identificar que con poblaciones criollas se pueden derivar líneas para desarrollar híbridos con buen nivel de heterosis. Reyes *et al.* (2004) evaluaron líneas obtenidas de las razas Tuxpeño y encontraron que ambos efectos: ACG y ACE fueron significativos para el rendimiento, encontrando diversidad genética en las poblaciones; la varianza genética aditiva resultó cinco veces mayor que la varianza genética de dominancia y las cruces en que intervinieron fueron las de mayor rendimiento. Estos mismos autores (Reyes *et al.*, 2004) dicen que "el mejoramiento genético por hibridación tendrá éxito si las dos líneas de un híbrido son de alta ACG, condición que por sí misma asegura un alto rendimiento. Si adicionalmente el híbrido presenta un efecto positivo alto de ACE, su capacidad de rendimiento aumentará.

Conclusiones

Las cinco poblaciones procedentes del departamento del Magdalena de los municipios de Pivijay (87), Fundación (89 y 11) y desconocido para el mismo departamento del Magdalena (3202 y 3203) muestran que son un mismo grupo heterótico con potencial para desarrollar combinaciones híbridas superiores. Se presentó el Efecto de Dominancia entre híbridos que comparten un parental: 11, 3202 y 3203; y entre híbridos que no comparten ningún parental: (87 x 3202) & (88 x 3203) \wedge (88 x 3202) & (11 x 3203).

Agradecimientos

A la Universidad del Magdalena, a través de la Vicerrectoría de Investigación por su apoyo económico en la financiación del proyecto titulado: Evaluación de híbridos F1 provenientes de líneas endocriadas de maíces criollos del Magdalena para obtener el título de Ingeniero Agrónomo.

Referencias

Alvarado-Beltrán, G., López-Sánchez, H., Santacruz-Varela, A., Muñoz-Orozco, A., Valadez-Moctezuma, E., Gutiérrez-Espinosa, M.A., López, P. A., Gil-Muñoz, A., Guerrero-Rodríguez, J. de D. y Taboada-Gaytán, O.R. 2019. Morphological variability of native maize (*Zea mays* L.) of the west highland of Puebla and east highland of Tlaxcala, Mexico. *Revista De la Facultad de Ciencias Agrarias* 51(2): 217-234. Doi: <https://doi.org/1853-8665>.

Ángeles-Gaspar, E., Ortiz-Torres, E., López, P.A. y López-Romero, G. 2010. Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista fitotecnia mexicana* 33(4): 287-296.

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). 2019. Maíz para Colombia. Visión 2030. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Bogotá D.C.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). 2012. *Manual de determinación del rendimiento*. CIMMYT. México, D.F.

Comstock, R.E., Robinson, H.F. y Harvey, P.H. 1949. A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Journal of the American Society of Agronomy* 41: 360-367. Doi: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1949.00021962004100080006>

x.

Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya (FENALCE). (2021) Gremio de productores denuncian importaciones de maíz "SG": Riesgo para la salud pública, el bienestar de especies en la producción pecuaria y para la producción nacional de maíz. FENALCE. Bogotá D.C.

Gómez, L.K., Restrepo, J. y Pachón, H. 2009. Caracterización del consumo de maíz y frijol en familias del departamento del Cauca, Colombia. *Perspectivas en nutrición humana* 11(2):165-76.

Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences* 9(4): 463. Doi: <https://doi.org/10.1071/bi9560463>.

Grupo Semillas. 2005. La diversidad de maíces criollos en Colombia. *Revista Semillas* 1-84.

Guamán, R.N., Desiderio Vera, T.X., Villavicencio Abril, A.F.; Ulloa Cortázar, S.M. y Romero Salguero, E.J. 2020. Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L) utilizando cuatro híbridos. *Siembra* 7(2): 47-56.

Lagos, T.C., Checa, O.E. y Criollo, H.A. 2003. Divergencia Genética y Heterosis. *Revista de Ciencias Agrícolas* 20(1): 9-26.

Lagos, T.C. y Criollo, H.A. 2018. Herramientas estadísticas para la investigación en ciencias agrarias. Universidad de Nariño, editorial universitaria, Pasto.

Lozano, A., Álvarez, C. y Moggiano, N. 2021. El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: Una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria* 12 (1): 101-108.

MacRobert, J., Setimela, P., Gethi, J. y Worku Regasa M. 2015. Manual de producción de semilla de maíz híbrido. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo CIMMYT, México D.F.

Makumbi, D., Betrán, J.F., Bänziger, M. y Ribaut. J.M. 2011. Combining ability, heterosis and genetic diversity in tropical maize (*Zea mays* L.) under stress and non-stress conditions. *Euphytica* 180 (2):143-162. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10681-010-0334-5>.

Mamani, J. y Echenique, M.A. 2021. Rendimiento de cuatro variedades de maíz (*Zea mays* L.) establecidas en la estación experimental Sapecho, Alto Beni-Bolivia. *Revista de investigación e innovación agropecuaria y de recursos naturales* 8(2):38-45.

- Muñoz Romero, L.A., Navarro, E., De la Rosa Ibarra, M., Romero, L.P. y Ángel Enrique Caamal Dzul. 2017. Estimación de varianzas genéticas en ocho variedades criollas de maíz para el Bajío mexicano. *Agronomía Mesoamericana* 28(2): 455-464. Doi: <https://doi.org/10.15517/ma.v28i2.21801>.
- Paliwal, R.L. 2001a. Consideraciones generales sobre el mejoramiento del maíz en los trópicos. En: Marathée, J.P. Editor. *El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). Roma.
- Paliwal, R.L. 2001b. Mejoramiento del maíz híbrido. En: Pierre, M.J. Editor. *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. Primera. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). Roma.
- Paliwal, R.L. 2001c. Recursos genéticos. En: Marathée, J.P. Editor. *El Maíz en los Trópicos: Mejoramiento y Producción*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. (FAO), Roma.
- Pardey, C. 2014. Producción de semilla y cruzamientos entre accesiones de maíz del departamento del Magdalena, Colombia. *Acta Agronómica* 64(1): 83-92. Doi: <https://doi.org/10.15446/acag.v64n1.44551>.
- Pardey, C. y Moreno, N. 2015. *Descripción morfológica de 13 introducciones de maíz procedente del departamento del Magdalena*. Editorial Unimagdalena, Santa Marta.
- Pardey, C., García, M.A. y Moreno, N. 2016. Caracterización de maíz procedente del departamento del Magdalena, Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 17(2): 167-190. Doi: https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:487.
- Reyes López, D., Molina Galán, J.D., Oropeza Rosas, M.A. y Pérez, E.d.C. del Carmen Moreno. 2004. Cruzas dialélicas entre líneas autofecundadas de maíz derivadas de la raza tuxpeño diallel crosses among maize inbred lines derived from the tuxpeño race, *Revista Fitotecnia Mexicana* Doi: <https://doi.org/ISSN:0187-7380>.
- Rimieri, P. 2017. Genetic diversity and genetic variability: two different concepts associated to plant germplasm and breeding. *Journal of Basic and Applied Genetics* 28 (2): 7-13.
- Roberts, L.M., Grant, U.J., Ramírez, R.E., Hatheway, W.H., Smith, D.L. y Mangelsdorf, P.C. 1957. *Razas de maíz en Colombia*. Editorial Máxima. Bogotá D.C.
- Romero, J., Castillo, F. y Ortega, R. 2002. Cruzas de poblaciones nativas de maíz de la raza Chalqueño: II. Grupos genéticos, divergencia genética y heterosis. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(1): 107-115. Doi: <https://doi.org/0187-7380>.
- Santillano-Cázares, J., Turmel, M.S., Cárdenas-Castañeda M.E., Mendoza-Pérez, S., Limón-Ortega, A., Paredes-Melesio, R., Guerra-Zitlalapa, L. y Ortiz-Monasterio. 2021. I. Can Biofertilizers Reduce Synthetic Fertilizer Application Rates in Cereal Production in Mexico? *Agronomy* 12(1):80. Doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy12010080>.
- Sprague, G.F. y Tatum, L.A. 1942. General vs. specific combining ability in single crosses of corn. *Journal American Society Agronomy* 34(10): 923-932. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1942.00021962003400100008x>
- Vásquez Polo, J.R., Baena Garcia, D., y Menjivar Flores, J.C. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica* 59(4): 449-456. Doi: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/20129.
- Vega O.P.C. 1988. *Introducción a la teoría de genética cuantitativa: con especial referencia al mejoramiento de las plantas*. Primera. Ediciones de la Biblioteca, Caracas.