

Evaluación de las capacidades de combinación y el efecto de heterosis para una mejor selección de cebada híbrida

Fawzia Bouchetat¹
Mebrouk Benmoussa^{2§}

¹Departamento de Biotecnología-Laboratorio de Plantas Aromáticas y Medicinales-Facultad de Ciencias de la Naturaleza y de la Vida-Universidad Saad Dahleb. Blida 1, 270 PO Box, Soumaa Road, Blida, Argelia. (bouchetatfawzia@yahoo.fr.v). ²Departamento de Biotecnología-Laboratorio de Investigación en Biotecnología Vegetal-Universidad Saad Dahleb. Blida 1, Argelia.

§Autor para correspondencia: benmoussa.mebrouk@yahoo.com.

Resumen

El efecto de heterosis y la capacidad de combinación son dos índices principales del rendimiento de los híbridos. La predicción del rendimiento híbrido y el efecto de la heterosis es un enfoque importante en el mejoramiento de la cebada híbrida. Con el fin de i) combinar el material genético local e introducido; ii) estudiar las habilidades combinatorias de los padres y los híbridos; y iii) analizar las relaciones entre el efecto heterosis, la habilidad combinatoria y el rendimiento de los híbridos, se ha iniciado la presente investigación. En este estudio, se cruzaron cinco cultivares de cebada (*Hordeum vulgare* L.) de acuerdo con un plan dialélico completo que comprende combinaciones de P². Los veinte híbridos F₂ se evaluaron mediante el análisis de capacidad de combinación general (GCA), por la capacidad de combinación específica (SCA) así como por el cálculo del efecto de heterosis de seis caracteres agronómicos, a saber, el peso de la espiga (WE), el número de granos por espiga (NGE), el peso de mil granos (WTG), precocidad de las plantas en la floración (PRF), índice de cosecha de plantas (IR) y productividad de las plantas (PP). Los resultados indican que GCA para todos los parámetros fue significativo excepto para el rasgo WE mientras que SCA fue significativo para tres de los seis rasgos estudiados: WTG, IR y PRF. La relación GCA/SCA reveló que los efectos no aditivos fueron el efecto principal sobre los rasgos evaluados en los híbridos F₂. La heterosis se correlacionó significativamente con el SCA para todos los rasgos evaluados, lo que indica que los efectos no aditivos fueron el principal efecto de la heterosis. Los híbridos de dos padres con un GCA alto han mostrado consistentemente un mejor SCA y un mejor rendimiento híbrido. De hecho, la selección de los padres debería basarse principalmente en su GCA.

Palabras clave: capacidad de combinación específica, desempeño de los padres, efecto de heterosis, habilidad combinatoria general, programa de cría.

Recibido: enero de 2022

Aceptado: marzo de 2022

Introducción

El mejoramiento de cebada híbrida ha tenido un éxito notable en las últimas décadas. Sin embargo, se ha publicado un pequeño número de variedades híbridas, al mismo tiempo se han logrado grandes avances en estudios del vigor híbrido de la cebada (Longin *et al.*, 2002). En 2002, la primera variedad híbrida comercial ‘Cotossus’ se vendió en el Reino Unido (Zhang *et al.*, 2013). Desde entonces, se han comercializado alrededor de diez variedades híbridas de cebada. Como resultado, más de 200 000 ha han sido sembradas con cebada híbrida en Europa (Longin *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2013).

En Argelia existen ocho variedades de cebada de seis hileras multiplicadas de las trece variedades autorizadas para producción y consumo (Zeghouane *et al.*, 2008), esta gama varietal sufrió un cambio entre 1994 y 2006, que resultó en la disminución del número de variedades importadas, en cambio, las variedades autóctonas (Saida y Tichedrett) siempre han sido favorecidas por los agricultores (Gardner y Eberhart, 1966; Melchinger, 1987; Bagheri y Jelodar, 2010), Saida es un cultivar muy demandado en todo el territorio nacional, con una tasa de ocupación del 74%, mientras que Tichedrett se encuentra en las tierras altas con una tasa de ocupación del 15% (Zeghouane *et al.*, 2008). De hecho, los genotipos locales exhiben una buena productividad con una alta susceptibilidad al acame. Por otro lado, los genotipos introducidos se caracterizan por una alta sensibilidad a las variaciones ambientales (Ali Dib y Monneveux, 1992; Khaldoun *et al.*, 2001).

Ante tal situación, el agricultor argelino no tiene suficientes opciones. Dado que la variedad es uno de los factores más importantes para mejorar los rendimientos, sería necesaria una buena gestión de la gama varietal. Se cree que el aumento de la producción de cebada es posible mediante la adopción de variedades híbridas (Djili y Daoud, 2000).

Variedades mejoradas que se destacan de las variedades existentes por su alto rendimiento y flexibilidad de adaptación a las limitaciones climáticas. Según Gallais (2009), el estado híbrido permite obtener variedades con mayor vigor, más productivas, asociando características complementarias de los progenitores: resistencia a enfermedades, buena calidad tecnológica y presentando en general mayor flexibilidad de adaptación que sus homólogos homocigotos. Según Zhang *et al.* (2013), una de las preguntas clave para el uso exitoso de la cebada híbrida es identificar qué progenitores tienen una buena capacidad de combinación para producir híbridos con heterosis significativa.

La capacidad de combinación general se considera un criterio indirecto útil para la selección de mejores progenitores. La GCA proporciona un enfoque simple para predecir los efectos aditivos que contribuyen a la heterosis, Melchinger *et al.* (1987) y la SCA también juega un papel importante en la heterosis, Gardner y Eberhart (1966). Las capacidades de combinación se han utilizado con éxito para identificar combinaciones superiores en arroz, Bagheri y Jelodar (2010); Tiwari *et al.* (2011) maíz, Gissa *et al.* (2007); Abdel-Moneam (2009); Gouda *et al.* (2013) y trigo, Li *et al.* (1997); Krystkowiak *et al.* (2009). Con respecto a la cebada, las capacidades de combinación se han reportado para varias características, en particular la longitud de la espiga y la altura de las plantas, el índice de cosecha, la precocidad de la planta y el rendimiento y sus componentes (Madić *et al.*, 2014).

Es en este contexto que iniciamos el presente trabajo con el objetivo de combinar material genético local e introducido; estudiar las capacidades de combinación de progenitores e híbridos y analizar las relaciones entre el efecto de heterosis, la capacidad combinatoria y el rendimiento híbrido para seleccionar los mejores progenitores y descendientes.

Materiales y métodos

Protocolo experimental

Los experimentos se llevaron durante tres campañas agrícolas sucesivas (2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018) a nivel de la finca piloto Amira Ahmed que se encuentra en la zona norte de la ciudad de Mila bajo un nivel bioclimático húmedo. El material vegetal estudiado está compuesto por cinco cultivares de cebada de seis filas utilizados como progenitores, a saber, Saida (P1), Tichedrett (P2), Bahía (P3), Express (P4) y Plaisant (P5). La cruce dialélica completa entre los progenitores dio 20 híbridos que luego conformaron la primera generación F1; la F1 fue sembrada para dar F2. La configuración experimental adoptada fue el diseño de bloques completos con tres repeticiones.

Métodos de estudio

El rendimiento de un individuo está escrito por Y_{ijkl} que representa el rendimiento del individuo 1 en el bloque k para la cruce i por j (Khalidoun *et al.*, 2006), donde: $Y_{ijkl} = m + c_{ij} + b_k + (bc)_{ijk} + e_{ijkl}$; e_{ijkl} = residuo aleatorio; $(bc)_{ijk}$ = interacción bloque x cruce; b_k = efecto del bloque k; c_{ij} = efecto de cruce i por j; m = promedio general. De acuerdo con el modelo de Griffing (1956), las aptitudes generales y específicas para la combinación se estimaron mediante las siguientes fórmulas: $S_g = \frac{1}{2(p-2)} \sum_i (Y_{i+} + Y_{+i})^2 - \frac{2}{p(p-2)} Y_{2++}$; $S_s = \frac{1}{2} \sum_{ij < i} (Y_{ij} + Y_{ji})^2 - \frac{1}{2(p-2)} \sum (Y_{i+} + Y_{+i})^2 + \frac{1}{(p-1)(p-2)} Y_{2++}$. Donde: Y_{ij} = valor promedio de bn individuos de b repeticiones de la cruce macho i por hembra j; Y_i = total de medidas donde i es un progenitor masculino; Y_j = total de medidas donde j es un progenitor femenino; Y = total general.

Con base en el valor medio de las líneas parentales, la heterosis comparada con el progenitor medio (hm) y sobre el mejor progenitor heterobeltiosis (hs) para los rasgos evaluados se calculó con las fórmulas: $hm = F1 - [(P1+P2)/2]$; $hs = F1 - Pb$; donde: Pb es el rendimiento del mejor progenitor (modelo de Griffing, 1956; Eberhart y Gardner, 1966; Frank y Nadine *et al.*, 2007; Gallais, 2009).

Análisis estadístico

Las estadísticas descriptivas, el análisis de varianza y el análisis de correlación se implementaron utilizando el software IBM-SPSS Statistics, versión 24 (Statistics Package for the Social Science).

Resultados

Destacando los efectos genéticos de la generación F2

El análisis de varianza para el factor genotipo indica diferencias muy significativas para todos los rasgos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza y esperanza de cuadrados medios.

Caracteres evaluados	Híbridos F2		Cuadrados medios de bloques	Cuadrados medios de interacción
	Media general \pm desviación estándar	Cuadrados medios de genotipo		
WE	2.48 \pm 0.8	0.71***	0.498	0.204
NG/E	76.66 \pm 9.2	242.138***	053.301	32.27
WTG	55.65 \pm 5.43	77.7***	4.65	6.842
PRF	122 \pm 2.64	3.665***	0.866	3.252
IR	57.93 \pm 15.19	613.842***	53.442	48.86
PP	45.75 \pm 3.91	466.726***	27.05	30.932

***= altamente significativo en $p \leq 0.001$.

Los híbridos F2 expresaron valores medios más altos que sus progenitores para tres de los seis rasgos evaluados (Figura 1).

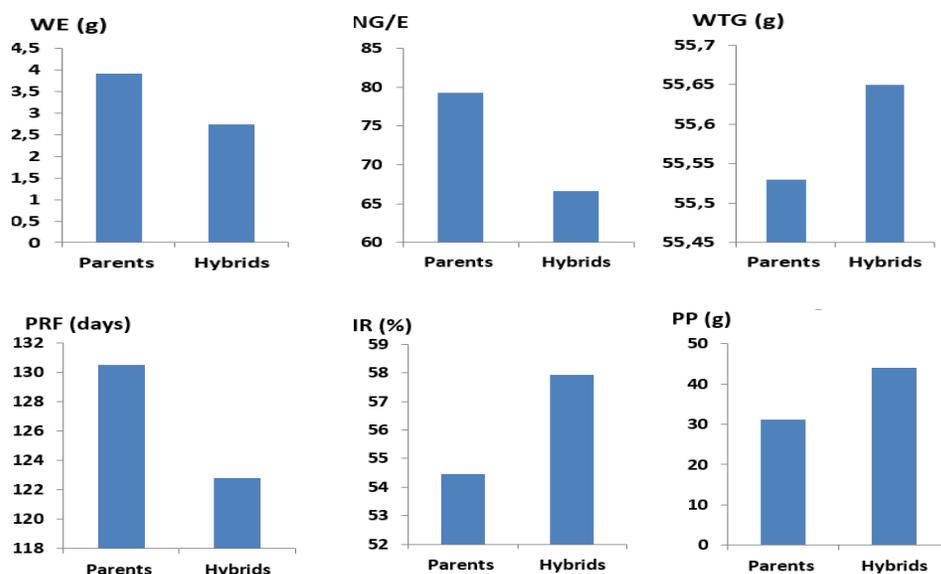


Figura 1. Valores medios de los híbridos F2 y sus progenitores.

La demostración de los efectos genéticos de la generación F2 revela diferencias significativas para las variables evaluadas. De hecho, los valores medios registrados en los híbridos son más elevados que los valores medios registrados en sus progenitores. Estos resultados concuerdan con los de Oury *et al.* (1990); Benmahammed (2005); Bouchetat y Aissat (2018); Bouchetat y Aissat (2019).

Herencia de rasgos

El análisis de varianza de las capacidades de combinación, realizado según el modelo de Griffing (1956), muestra efectos altamente significativos de la capacidad de combinación general (GCA) y de la capacidad de combinación específica (SCA) para todos los parámetros analizados. El análisis de varianza de la capacidad de combinación general (GCA) revela diferencias muy significativas para todos los parámetros analizados, excepto el peso de la espiga.

Por otro lado, el análisis de varianza de la capacidad de combinación específica (SCA) indica diferencias muy significativas para tres de los seis caracteres evaluados. La relación GCA/SCA es menor a la unidad. La heredabilidad en sentido estrecho, estimada para todos los rasgos, toma valores bajos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Anova de las capacidades de combinación para los diferentes rasgos evaluados.

Rasgos evaluados	Cuadrados medios		GCA/SCA	Heredabilidad
	GCA	SCA		
WE	0.071 ^{NS}	0.318 ^{NS}	0.223	0.2
NG/E	23.639 ^{***}	173.425 ^{NS}	0.136	0.195
WTG	3.203 ^{***}	48.044 ^{***}	0.066	0.082
PRF	0.614 ^{***}	564.344 ^{NS}	0.001	0.334
IR	51.554 ^{***}	521.654 ^{***}	0.098	0.167
PP	20.464 ^{***}	096.792 ^{***}	0.211	0.087

***= altamente significativo en $p \leq 0.001$; ^{NS}= no significativo.

Estudio de la capacidad de combinación general (GCA)

La capacidad de combinación general de las diferentes variedades varió ampliamente entre los rasgos. De hecho, el progenitor Plaisant (P5) transmitió a sus descendientes un peso de mil granos alto; un cierto retraso en el espigado; un índice de cosecha importante y una productividad considerable. Por otro lado, los dos genotipos autóctonos Saida y Tichedrett (P1, P2) expresan mejores valores de GCA (NG/E, PP y WTG, IR). En contraste, el cultivar Express (P4) transmitió a sus descendientes un ciclo de desarrollo reducido con mejor precocidad en el espigado (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores de la capacidad de combinación general de los progenitores utilizados en la cruce de dialélica completa.

Progenitores	WE	NG/E	WTG	PRF	IR	PP
P1	0.14	3.526	0.056	-0.426	1.18	2.27
P2	0.156	-0.79	0.973	0.033	4.936	-0.396
P3	-0.096	-4.103	0.106	-0.053	-3.86	-3.286
P4	-0.203	1.27	-1.653	-0.3	-4.7	-1.54
P5	0.006	0.086	0.766	0.736	2.446	2.966

Estudio de la capacidad de combinación específica (SCA)

Los híbridos (Exp × Sai), (Exp × Tich), (Plai × Tich), (Plai × Bah) y (Plai × Exp) expresaron valores altos de SCA. Cinco de las veinte combinaciones evaluadas, (Tich × Exp); (Sai × Bah); (Sai × Plai); (Plai × Bah); y (Plai × Sai) dieron mejores valores de SCA. Por otro lado, los híbridos F2 (Sai × Plai); (Tich × Exp); (Sai × Tich); (Exp × Plai) y (Bah × Exp) registraron valores significativos de SCA (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores de la capacidad de combinación específica de los híbridos F2.

Genotipos	WE	NG/E	WTG	PRF	IR	PP
Sai × Tich	0.04	-0.49	-01.84	43.51	-25.24	07.46
Sai × Bah	0.49	-5.37	0.35	-0.73	2.35	2.03
Sai × Exp	-0.39	0.65	-0.13	-1.49	17.16	2.5
Sai × Plai	-0.14	1.3	-6.64	-1.19	13.74	12.45
Tich × Sai	0.19	-3.82	0.82	-0.49	5.87	-4.86
Tich × Bah	0.12	-0.59	-1.89	1.13	-0.23	2.3
Tich × Exp	-0.01	3.43	0.89	-0.61	18.55	7.51
Tich × Plai	0.42	3.88	-2.89	1.34	-3.92	-2.14
Bah × Sai	-0.15	6.57	0.68	-0.73	6.52	-2.89
Bah × Tich	-0.26	23.38	0.43	0.47	5.27	-3.15
Bah × Exp	0.06	0.34	-8.27	-0.19	-0.26	3.9
Bah × Plai	0.02	6.26	3.97	1.64	-20.1	-6.99
Exp × Sai	0.63	12.71	5.78	2.84	-27.35	-6.45
Exp × Tich	-0.53	-4.5	4.86	-1.28	5.71	-10.06
Exp × Bah	-0.17	-2.78	-5.6	0.13	-13.19	-4.13
Exp × Plai	-0.3	1.55	-5.26	-0.98	0.36	4.09
Plai × Sai	-0.37	-3.03	0.69	11.3	9.33	-5.67
Plai × Tich	0.36	1.61	4.11	0.01	3.87	2.18
Plai × Bah	-0.27	17.58	3.97	-11.56	11.99	2.41
Plai × Exp	0.34	-05.14	3.07	45.22	-10.35	-0.4

Sai= Saida; Tich= Tichedrett; Bah= Bahía; Exp= Expreso; Plai= Plaisant.

El análisis de los efectos genéticos mediante el método Griffing (1956) indica que la capacidad de combinación general y específica (GCA y SCA) juegan un papel importante en la expresión de los rasgos peso de mil granos (WTG); índice de cosecha (IR) y productividad de la planta (PP), mientras que los efectos de GCA y SCA no son significativos para el parámetro peso de la espiga (WE), estos resultados están de acuerdo con los de Jalata *et al.* (2019). Según Zhan *et al.* (1996), los valores propios de las líneas parentales pueden ser un buen indicador de los efectos de la GCA. Una cruce entre progenitores de diferentes valores de GCA produce un efecto SCA positivo (Bhowmik *et al.*, 1990), esta interacción genética es responsable de los valores altos de SCA.

La relación de varianza (GCA/SCA) es menor a uno para todos los rasgos estudiados. De hecho, la naturaleza de las acciones de los genes no aditivos es más importante que la naturaleza de las acciones de los genes aditivos. Los valores relativamente bajos de la heredabilidad en sentido estrecho expresados por los híbridos F2 para todos los rasgos estudiados confirman que la varianza de dominancia es mayor que la varianza aditiva. La mayor parte de la investigación sobre el modo de acción génica en la transmisión de rasgos, en cebada, ha declarado que los efectos no aditivos son más importantes que los efectos aditivos, al menos para un rasgo, lo que indica el predominio de la acción génica de tipo dominante (Nakhjavan *et al.*, 2009; Patial *et al.*, 2016; Pesaraklu *et al.*, 2016; Yadav, 2016).

Estudio del efecto de heterosis de la generación F2

El análisis del efecto de heterosis en comparación con el progenitor medio y la heterobeltiosis indica la presencia de diferencias muy significativas entre las diferentes cruzas para todos los rasgos evaluados (Cuadros 5 y 6). De hecho, los grados de variación de la heterosis del progenitor medio y del progenitor superior varían de una manera muy notable dependiendo del rasgo estudiado.

El porcentaje significativo de heterosis en comparación con el progenitor medio varía entre 20% para el parámetro índice de cosecha (IR) y 80% para el rasgo peso de la espiga (WE) (Cuadro 5). Por otro lado, el porcentaje significativo del efecto de heterosis en comparación con el progenitor superior (heterobeltiosis) varía del 15% para el parámetro número de granos por espiga (NG/E) al 60% para la característica precocidad de la planta en la floración (PRF) (Cuadro 6).

Cuadro 5. Grado de heterosis en comparación con el progenitor medio estimado en híbridos F2.

Genotipos	WE	NG/E	WTG	PRF	IR	PP
Sai × Tich	68.28	37.01	36.96	1.1	25.91	55.24
Sai × Bah	6.96	5.25	-4.74	1.24	25.76	22.7
Sai × Exp	-5.82	-0.62	3.94	1.36	-42.03	-22.42
Sai × Plai	36.79	9	-3.51	0.27	-15.7	58.55
Tich × Sai	64.74	15.49	2.36	1.37	-14.34	41.68
Tich × Bah	4.2	-7.17	-9.67	1.78	-31.42	-40.29
Tich × Exp	14.27	-11.46	3.06	-0.52	-41.91	-14.61
Tich × Plai	33.11	1.44	2.57	-1.08	-49.86	27.32
Bah × Sai	1.45	-10.9	-8.15	1.24	-11.88	-34.36
Bah × Tich	8.43	-19.4	-0.78	2.6	7.57	6.07
Bah × Exp	-23.99	-17.83	09.38	0.15	-36.4	-50.76
Bah × Plai	10.53	-10.66	-03.8	-1.47	-26.35	10.16
Exp × Sai	63.85	13.31	12.11	0.27	-13.47	41.58
Exp × Tich	1.27	-12.72	14.61	-1.87	11.49	-4.34
Exp × Bah	-29.65	-27	0.89	-0.39	-14.37	-35.07
Exp × Plai	4.04	-24.87	03.04	-2.92	-50.8	-7.76
Plai × Sai	40.16	-01.27	18.16	0.02	-13.05	-1.58
Plai × Tich	59.64	04.16	17.3	0.54	-37.2	19.51
Plai × Bah	-08.46	-23.94	02.06	-0.95	-32.08	-27.36
Plai × Exp	0.59	-01.88	07.78	-2.13	-26.41	05.25
Porcentaje significativo	80	35	70	40	20	50
Probabilidad	0	0	0	0	0	0

Cuadro 6. Grado de heterobeltiosis estimado en híbridos F2.

Genotipos	WE	NG/E	WTG	PRF	IR	PP
Sai × Tich	43.86	21.7	34.83	0.28	13.14	32.03
Sai × Bah	-10.82	-2.36	-10.5	0.55	17.35	4.63
Sai × Exp	-11.82	-7.23	-1.91	-0.51	-44.01	-25.39
Sai × Plai	24.77	-0.74	-4.99	-1.32	-30.97	50.25
Tich × Sai	40.08	2.6	0.75	0.55	-23.09	20.52
Tich × Bah	-24.16	-22.75	-15.87	1.65	-34.01	-55.33
Tich × Exp	-05.96	-25.96	-1.88	-1.82	-47.76	-27.09
Tich × Plai	05.29	-16.99	1.27	-2.14	-62.17	7.52
Bah × Sai	-15.69	-17.32	-13.69	0.56	-17.97	-44.01
Bah × Tich	-21.3	-32.94	-7.58	2.46	3.55	-20.64
Bah × Exp	-35.23	-18.28	-2.66	-1.03	-40.85	-57.93
Bah × Plai	-01.23	-12.52	-10.88	-2.38	-42.88	-04.97
Exp × Sai	54.68	05.71	05.75	-01.59	-16.49	36.25
Exp × Tich	-17.07	-27	09.1	-03.16	00.11	-18.23
Exp × Bah	-40	-27.44	-10.24	-01.6	-20.42	-44.63
Exp × Plai	-01.34	-26.90	-01.29	-03.17	-59.5	-14.77
Plai × Sai	28.41	-10.13	16.39	-01.56	-28.78	-06.48
Plai × Tich	26.03	-14.71	15.82	-00.52	-52.62	01.46
Plai × Bah	-18.15	-25.52	-05.46	-01.87	-47.32	-37.24
Plai × Exp	-04.12	-04.51	03.23	-02.39	-39.46	-02.78
Porcentaje significativo	35	15	35	60	20	30
Probabilidad	0	0	0	0	0	0

Diez de los 20 híbridos expresaron un efecto de heterosis positivo en comparación con el progenitor medio. En contraste, siete de los 20 híbridos dieron un efecto de heterosis positivo en comparación con el mejor progenitor en la expresión del rasgo productividad de la planta. La mayor heterosis en comparación con el progenitor medio y mejor se registra en el híbrido (Sai X Plai). Estos resultados coinciden con los de Immer (1941); Wienhues (1968); Bogomolov y Grib (1971); Hayes y Foster (1976); Lehmann (1982), quienes obtuvieron aumentos significativos en el rendimiento.

Evaluación de las relaciones existentes entre el rendimiento de los híbridos, el efecto de heterosis y las capacidades de combinación. Se observaron correlaciones significativas entre el rendimiento de los progenitores y la capacidad de combinación general sólo para dos de los seis parámetros evaluados (Cuadro 7).

Se registraron correlaciones positivas y significativas entre el rendimiento de los progenitores y la capacidad general para combinarse para dos rasgos, la precocidad temprana y la productividad de la planta, lo que significa que el rendimiento de los progenitores refleja su capacidad general para reproducir combinaciones para estos dos parámetros. De acuerdo con Zhan *et al.* (1996), los valores propios de las líneas parentales pueden ser un buen indicador de los efectos de la GCA. Bouzerzour y Djekoun (1996) subrayan que, en el caso de una correlación significativa entre los valores medios

del progenitor, para un carácter dado, y su GCA, la mejora de este parámetro se aproxima rápidamente mediante cruzas entre los genotipos que poseen valores fuertes. De lo contrario, la mejora del rasgo bajo consideración puede obtenerse ya sea mediante cruzas entre genotipos de valores altos o mediante cruzas entre genotipos con valores bajos (Oury *et al.*, 1990).

Cuadro 7. Correlación entre el rendimiento de los progenitores y las capacidades de combinación.

Rasgos	GCA	SCA
WE	-0.983 ^{NS}	-0.938 ^{NS}
NG/E	0.866 ^{NS}	-0.788 ^{NS}
WTG	-0.31 ^{NS}	-0.956 ^{NS}
PRF	0.999 [*]	0.999 [*]
IR	0.993 ^{NS}	-1 [*]
PP	0.999 [*]	0.29 ^{NS}

*= significativo en $p \leq 0.05$; ^{NS}= no significativo.

Se encontraron correlaciones significativas a altamente significativas entre el rendimiento de los híbridos y la heterosis del progenitor medio y la heterobeltiosis. Asimismo, para la relación entre el rendimiento de los híbridos y la capacidad de combinación específica (SCA). De hecho, se encontraron correlaciones positivas y muy significativas entre el rendimiento de los híbridos y la SCA para todos los rasgos, excepto el rasgo peso de la espiga (WE). Por otro lado, se observaron correlaciones no significativas entre los rendimientos de los híbridos F2 y la capacidad de combinación general (GCA) para todas las variables evaluadas (Cuadro 8).

Cuadro 8. Correlación entre el rendimiento de los híbridos y la idoneidad para la combinación.

Rasgos	hm	hs	SCA	GCA
WE	0.832 ^{**}	0.844 ^{**}	0.108 ^{NS}	-0.176 ^{NS}
NG/E	0.822 ^{**}	0.919 ^{**}	0.737 ^{**}	0.807 ^{NS}
WTG	0.87 ^{**}	0.826 ^{**}	0.952 ^{**}	-0.335 ^{NS}
PRF	0.739 ^{**}	0.618 ^{**}	0.931 ^{**}	0.934 ^{NS}
IR	0.397 ^{**}	0.319 [*]	0.443 ^{**}	-0.192 ^{NS}
PP	0.572 ^{**}	0.561 ^{**}	0.519 ^{**}	-0.86 ^{NS}

**= significativo en $p \leq 0.01$; ^{NS}= no significativo.

Se encontraron relaciones fuertes entre el rendimiento de los híbridos, el efecto de heterosis y la capacidad de combinación específica para todos los rasgos estudiados. Sin embargo, se encontraron correlaciones no significativas entre el rendimiento de los híbridos y la capacidad de combinación general (GCA). Estos resultados concuerdan con los de Mühleisen *et al.* (2013).

Se registraron correlaciones muy significativas entre el efecto de heterosis del progenitor medio y el progenitor superior y la capacidad de combinación específica (SCA) para todos los rasgos analizados, excepto el parámetro peso de la espiga (WE). En contraste, se observaron correlaciones no significativas entre el efecto de heterosis, en comparación con el progenitor medio y mejor, y la capacidad de combinación general (GCA) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Correlación entre el efecto de heterosis y la capacidad de combinación.

Rasgos	Efecto de heterosis	SCA	GCA
WE	hm	0.114 ^{NS}	-1
	hs	0.114 ^{NS}	0.915
NG/E	hm	0.622 ^{**}	0.917
	hs	0.697 ^{**}	0.933
WTG	hm	0.813 ^{**}	0.43
	hs	0.737 ^{**}	0.888
PRF	hm	0.712 ^{**}	-0.861
	hs	0.592 ^{**}	0.889
IR	hm	0.826 ^{**}	-0.638
	hs	0.733 ^{**}	-0.76
PP	hm	0.755 ^{**}	0.524
	hs	0.728 ^{**}	0.802

**= significativo en $p \leq 0.01$; ^{NS}= no significativo.

El análisis de la relación entre el efecto de heterosis y las capacidades de combinación indica la presencia de relaciones positivas y significativas entre el efecto de heterosis y la SCA. Por el contrario, se encontraron coeficientes de correlación positivos y negativos que indican la presencia de una asociación no significativa entre el efecto de heterosis y la capacidad general de combinación (GCA). Estos resultados están de acuerdo con los de Mühleisen *et al.* (2013) sobre cebada y los de Yu *et al.* (2020) sobre maíz. Por otro lado, nuestros resultados no concuerdan con los obtenidos por Zhang *et al.* (2015) sobre cebada.

Conclusiones

Evaluar las capacidades de combinación (GCA y SCA) para seleccionar los mejores progenitores e híbridos es un enfoque efectivo. De hecho, para este estudio los mejores progenitores son Plaisant; Saida y Tichedrett. El mejor híbrido F2 es (Sai x Plai).

Literatura citada

- Abdel-Moneam, M. A.; Attia, A. N.; EL-Emery, M. I. and Fayed, E. A. 2009. Combining ability and heterosis for some agronomic traits in crosses of maize. *Pak. J. Biol. Sci.* 12(5):433-438.
- Ali Dib, T. and Monneveux, P. 1992. Adaptation à la sécheresse et notion d'idéotype chez le blé dur. I. Caractères morphologiques d'enracinement. *Agronomie.* 12:371-379.
- Bagheri, N. and Jelodar, N. B. 2010. Heterosis and combining ability analysis for yield and related yield traits in hybrid rice. *Inter. J. Biol.* 2(2):222-231.
- Benmahammed, A. 2005. Hétérosis, transgression et efficacité de la sélection précoce et retardée de la biomasse, du nombre d'épis et utilisation des indices chez l'orge (*Hordeum vulgare*), thèse Doc., INA, Alger.
- Bhowmik, A.; Ali, M. S. and Sadeq, Z. 1990. Genetic analysis of kernel weight in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Bangladech J. Bot.* 19:21-27.

- Bogomolov, A. M. and Grib, S. I. 1971. The manifestation of heterosis in F1 hybrids of spring barley. S. B Nauchn Tr Beloruss Sel'Skochoz Akad. 80:19-28.
- Bouchetat, F. and Aissat, A. 2018. Analyse génétique de quelques génotypes d'orge (*Hordeum vulgare* L.) et de leurs descendants en vue d'une évaluation de quelques caractères a intérêt agronomiques. Agrobiologia. 8(1):792-801.
- Bouchetat, F. and Aissat, A. 2019. Evaluation of the genetic determinism of an F1 generation of barley (*Hordeum vulgare* L.) resulting from a complete diallel cross between autochthones and introduced cultivars. Heliyon 5 e02744. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02744>.
- Bouzerzour, H. and Djekoun, A. 1996. La biomasse comme critère de sélection pour améliorer le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf) en zone semi-aride», analyse de l'institut national agronomique, El Harrach, Algérie. 20:117-125.
- Djili, K. and Daoud, Y. 2000. Influences des hauteurs des précipitations des calcaires et du pourcentage de sodium échangeable dans les sols du nord de l'Algérie, sécheresse. 1(11):37-43.
- Eberhart, S. A. and Gardner, C. O. 1966. A general model for genetic effects. Biometrics. 22:864-881.
- Frank, H. Nadine, H. 2007. Towards the molecular basis of heterosis. Trends in Plant Science. 12(9):427-432.
- Gallais, A. 2009. Hétérosis et variétés hybrides en amélioration des plantes. (Ed.). Quae. 365 p.
- Gardner, C. O. and Eberhart, S. A. 1966. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. Biometrics. 22(3):439-452.
- Gissa, D. W.; Zelleke, H.; Labuschagne, M. T.; Hussien, T. and Singh, H. 2007. Heterosis and combining ability for grain yield and its components in selected maize inbred lines. South Afr. J. Plant Soil. 24(3):133-137.
- Gouda, R. K.; Kage, U.; Lohithaswa, H. C.; Shekara, B. G. and Shobha, D. 2013. Combining ability studies in maize (*Zea mays* L.). Mol. Plant Breed. 3(14):116-127.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. Aust. J. Biol. Sci. 9:463-493.
- Hayes, J. D. and Foster, C. A. 1976. Heterosis in self-pollinating crops, with particular reference to barley heterosis. In: Jonossy, A. and Lupton, F. G. H. (Ed.). Plant Breeding. Akadémiai Kiadó, Budapest. 239-256 pp.
- Immer, F. R. 1941. Relation between yielding ability and homozygosity in barley crosses. J. Am. Soc. Agron. 33:200-206.
- Jalata, Z.; Mekbib, F.; Lakew, B. and Ahmed, S. 2019. Gene action and combining ability test for some agro-morphological traits in Barley». J. Appl. Sci. 19:88-95. <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2019.88.95>.
- Khaldoun, A.; Bellah, F. and Mekliche, L. 2006. L'obtention variétale en Algérie, cas des céréales à paille. (Ed) Institut national de la recherche agronomique d'alger. ISBN: 9961-881-10-9. 82 p.
- Khaldoun, A.; Djennadi, F. and Bellah, F. 2001. Développement des fourrages en Algérie dans le cadre du PNDA, actes du 1^{er} (Ed.), atelier national sur la stratégie de développement des fourrages en Algérie. Alger. 12-17 pp.
- Krystkowiak, K.; Adamski, T.; Surma, M. and Kaczmarek, Z. 2009. Relationship between phenotypic and genetic diversity of parental genotypes and the specific combining ability and heterosis effects in wheat (*Triticum aestivum* L.). Euphytica. 165(3):419-434.
- Lehmann, L. 1982. Where is hybrid barley? Barley Genet, IV 120.

- Li, Y.; Peng, J. and Liu, Z. 1997. Heterosis and combining ability for plant height and its components in hybrid wheat with *Triticum timopheevi* cytoplasm. *Euphytica*. 95(3):337-345.
- Longin, C. F. H.; Mühleisen, J.; Maurer, H. P.; Zhang, H.; Cowda, M. and Reif, J. C. 2002. Hybrid breeding in autogamous cereals. *Theor. Appl. Genet.* 125(6):1087-1096.
- Madić, M. R.; Djurović, D. S.; Knezević, D. S.; Paunović, A. S. and Tanaskovic, S. T. 2014. Combining abilities for spike traits in a diallel cross of barley. *J. Cent. Eur. Agric.* 15(1):108-116.
- Melchinger, A. E.; Geiger, H. H.; Seitz, G. and Schmidt, G. A. 1987. Optimum prediction of three-way crosses from single crosses in forage maize (*Zea mays* L.). *Theor. Appl. Genet.* 74(3):339-345. doi:10.1007/BF00274716.
- Mühleisen, J.; Maurer, H. P.; Stiewe, G.; Bury, P. and Rrif, J. C. 2013. Hybrid breeding in barley. *Crop Sci.* 53:819-824.
- Nakhjavan, S. H.; Bihamta, M. R.; Darvish, F.; Sorkhi, B. and Zahravi, M. 2009. Mode of some of barely quantitative inheritance traits in normal irrigation and terminal drought stress conditions using generation mean analysis. *New Findings in Agriculture.* 2(10):203-222.
- Oury, F. X.; Brahant, P.; Pluchard, P.; Berard, P. and Rousset, M. 1990. Etude multilocale des blés hybrides: niveau d'hétérosis et élaboration du rendement. *Agronomie.* 10:735-748.
- Patial, M.; Pal, D. and Kumar, J. 2016. Combining ability and gene action studies for grain yield and its component traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Sabrao J. Breed. Genet.* 48:90-96.
- Pesaraklu, S.; Soltanloo, H.; Ramezanpour, S.; Kalate, A. M. and Nasrollah, N. G. A. 2016. An estimation of the combining ability of barley genotypes and heterosis for some quantitative traits. *Iran Agric, Res.* 35:73-80.
- Tiwari, D. K.; Pandey, P.; Giri, S. P. and Dwivedi, J. L. 2011. Prediction of gene action, heterosis and combining ability to identify superior rice hybrids. *Inter. J. Bot.* 7(2):126-144.
- Wienhues, F. 1968. Long-term yield analyses of heterosis in wheat and barley: variability of heterosis, fixation of heterosis. *Euphytica.* 17, Suppl. 1:49-62.
- Yadav, S. K. 2016. Studies on genetic divergence and combining ability analysis for yield and malting quality traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). PhD Thesis JNKVV. 209 p.
- Yu, K.; Wang, H.; Liu, X.; Xu, C.; Li, Z. X.; Xu, X.; Liu, J.; Wang, Z. and Xu, Y. 2020. Large-Scale Analysis of Combining Ability and Heterosis for Development of Hybrid Maize Breeding Strategies Using Diverse Germplasm Resources. *Front. Plant Sci.* 11:660. Doi: 10.3389/fpls.2020.00660.
- Zeghouane, O.; Boufnare, Z. F. and Yousfi, M. 2008. La technologie semencière, la production de semences des céréales à paille en Algérie. ITGC, deuxième (Ed.). 138 p.
- Zhan, K. H.; Wang, F. T.; Cui, D. Q. and Fan, L. 1996. Analysis of the combining ability of some quality characteristics in wheat». *Acta Agriculturae BorealiSinica*, 11: Supplement. 10-15 pp.
- Zhang, X. Z.; Lv, L. J.; Lv, C. and Xu, R. G. 2013. Analysis on heterosis in agronomic and yield traits of hybrid barley. *Journal of Triticeae Crops.* 33(1):39-43.
- Zhang, X. Z.; Lv, L.; Lv, C.; Guo, B. and Xu, R. 2015. Combining ability of different agronomic traits and yield components in hybrid Barley. *PloS.* 10(6):0126828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126828>.