



RENDIMIENTO DE GRANO Y CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE CEBADA EN FUNCIÓN DE LA FECHA DE SIEMBRA

GRAIN YIELD AND PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF BARLEY AS A FUNCTION OF PLANTING DATE

José Gómez-Espinoza^{1,2}, Miguel Angel Avila-Perches¹, Alfredo Josué Gámez-Vázquez¹, Jorge Covarrubias-Prieto², Juan Gabriel Ramírez-Pimentel² y César Leobardo Aguirre-Mancilla^{2*}

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México. ²Tecnológico Nacional de México/IT de Roque, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia (cesar.am@roque.tecnm.mx)

RESUMEN

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en la producción de cereales después de maíz, trigo y arroz. Para obtener un buen rendimiento, es importante una fecha adecuada de siembra debido a la variabilidad en temperatura y precipitación que se puede presentar. Con el objetivo de evaluar el efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento, calidad física y características químicas del grano en 10 genotipos de cebada maltera y definir la fecha de siembra óptima, se establecieron ocho ensayos en Roque, Guanajuato, México, cuatro en el ciclo 2021-2022 sembrados el 30 de noviembre, 15 y 30 de diciembre y 15 de enero y cuatro en las mismas fechas del ciclo 2022-2023. Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se realizaron análisis de varianza, prueba de medias, análisis de componentes principales, de interacción genotipo-ambiente y de estabilidad. Se encontraron diferencias significativas en rendimiento entre variedades, fechas de siembra e interacciones. Los genotipos con mayor rendimiento fueron Alina y Esperanza con 7.23 y 6.91 t ha⁻¹, respectivamente; Alina destacó tanto por rendimiento como por estabilidad. Las fechas de siembra que mostraron mayor rendimiento, calidad física, contenido de proteína y almidón en el grano fueron las del 30 de noviembre y 15 de diciembre. Las fechas de siembra tempranas favorecen rendimiento y calidad en cebada en el ciclo de Otoño-Invierno en el Bajío, México.

Palabras clave: *Hordeum vulgare* L., condiciones de riego, fecha de siembra, interacción genotipo-ambiente.

SUMMARY

Barley (*Hordeum vulgare* L.) ranks fourth in cereal production worldwide after maize, wheat and rice. For good yield, an appropriate planting date is important, due to the variability in temperature and rainfall that may occur. With the aim of evaluating the effect of planting date on yield, physical quality and chemical characteristics of the grain in 10 malting barley genotypes and defining the optimal planting date, eight trials were established in Roque, Guanajuato, Mexico, four in the agricultural season 2021-2022 planted on November 30, December 15 and 30 and January 15, and four at the same dates of the agricultural season 2022-2023. A randomized complete block experimental design with three replications was used. Analysis of variance, means tests, principal component analysis, genotype-environment interaction and stability were performed. Significant differences in yield were found between varieties, planting dates and interactions. The highest yielding genotypes were Alina and Esperanza with 7.23 and 6.91 t ha⁻¹, respectively;

Alina stood out for both yield and stability. The planting dates that showed higher yield, physical quality, protein content and starch content in the grain were November 30 and December 15. Early planting dates favor yield and quality of barley in the Summer-Winter season in El Bajío, Mexico.

Index words: *Hordeum vulgare* L., genotype-environment interaction, irrigation conditions, planting date.

INTRODUCCIÓN

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en la producción de cereales después de maíz, trigo y arroz (FAO, 2024). Durante el año 2023 se tuvo una producción mundial de 156,837,140 t, con un rendimiento de 3.4 t ha⁻¹ (FAO, 2024). En la actualidad, a nivel mundial, dos terceras partes de la producción son destinadas para forraje y una tercera parte es para uso maltero (Obadi *et al.*, 2021). En México, durante 2023, se cosecharon 832,036 t; bajo condiciones de riego la producción fue de 309,036 t, mientras que en temporal fue de 523,000 t (SIAP, 2024).

La cebada es un cultivo con gran adaptabilidad a diferentes condiciones edafoclimáticas, y es utilizado como alimento humano y forraje (Shvachko *et al.*, 2021). Existen diferentes tipos de cebada por el número de hileras de grano en la espiga, las de dos (*Hordeum distichum* L.) y las de seis hileras (*Hordeum vulgare* L.). En México cerca del 80 % es destinado para la malta, mientras que el 18 % es utilizado para forraje y el 2 % para producción de semilla.

La especie de dos hileras en la espiga (*H. distichum* L.) presenta mejores características en uniformidad y tamaño de grano (Serrago *et al.*, 2023). La uniformidad en el tamaño de grano facilita el proceso de malteo; además, tiene mayor cantidad de extracto y menor contenido de proteínas y enzimas (Rani y Bhardwaj, 2021). Esta característica hace que se incremente la demanda de variedades de dos hileras con potencial de rendimiento, calidad y tolerancia a

enfermedades (Rodríguez-García *et al.*, 2022).

Los cereales difieren en sus propiedades físicas dentro de cada especie. Las variaciones permiten la selección con base en características específicas para los diferentes segmentos industriales; éstas se relacionan con su composición química y propiedades funcionales (López *et al.*, 2005). La selección de una variedad de cebada para malta está en función de las características físicas y químicas del grano necesarias para cumplir con los estándares de la industria (Rani y Bhardwaj, 2021).

En la norma NMX-FF-043-SCFI-2003 (SE, 2003) se establecen las condiciones y características que debe reunir la cebada maltera para su comercialización; dentro de éstas destaca el peso por hectolitro, que en variedades de seis hileras debe ser como mínimo 56 kg hL⁻¹, mientras que en genotipos de dos hileras es de 58 kg hL⁻¹. Se ha observado que el peso por hectolitro (PH) se vincula con la textura del endospermo o con el contenido de proteína, por lo que es un parámetro muy importante en la industrialización de la cebada maltera. El valor de PH también se relaciona directamente con el rendimiento y la calidad de los productos terminados (González *et al.*, 2016). El peso de mil granos está en función del tamaño, densidad y uniformidad del grano, éste también depende del tipo de espiga, de las condiciones agroclimáticas y de la fertilidad del suelo (González *et al.*, 2013). Uno de los factores importantes que afectan la uniformidad y forma de los granos de cebada es el número de hileras en la espiga. En las cebadas de dos hileras los granos son más largos, tienen mayor peso hectolítrico y menor contenido de proteína; en cambio, las variedades de seis hileras tienen más granos por espiga, pero más pequeños, de tal modo que los genotipos de dos hileras son preferidos para el malteo, en tanto que los de seis hileras frecuentemente se utilizan en la industria cervecera con granos adjuntos (arroz, maíz o trigo) para reducir el contenido de azúcar (Rani y Bhardwaj, 2021).

La fecha de siembra afecta el rendimiento de grano por efecto del cambio de las condiciones climáticas que ocurren. Actualmente el factor de estrés abiótico que causa mayor problema en la producción agrícola son las temperaturas altas en zonas de riego (Pérez-Ruiz *et al.*, 2016a).

El rendimiento de grano de cebada se ve afectado por factores abióticos y de manejo agronómico, como pueden ser la sequía, heladas tempranas, exceso de lluvia o siembras tardías (Pérez *et al.*, 2015). Las fechas de siembra en las que se establece el cultivo provocan cambios en las temperaturas y en el desarrollo de la especie. Temperaturas óptimas para el cultivo son fundamentales para obtener un rendimiento adecuado

y un aspecto importante en el manejo agronómico de la cebada, lo que está en relación directa con la calidad industrial del grano (García-Giménez y Jobling, 2022). La cebada crece en un amplio rango de condiciones ambientales (15 a 30 °C); sin embargo, se comporta mejor cuando el espigamiento y llenado de grano tienen lugar con temperaturas moderadas y adecuada humedad del suelo (Devi *et al.*, 2021). Entre los principales factores que afectan la calidad industrial del grano y de la semilla están la presencia de altas temperaturas o heladas, que afectan desde antes del espigamiento y hasta el llenado de grano (Rezaei *et al.*, 2022). En la región de El Bajío, localizada en la parte central de México abarcando los estados de Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco, la siembra de cebada es en el ciclo de otoño-invierno bajo condiciones de riego, lo que da lugar a un amplio período de siembra y una variación en las temperaturas durante el desarrollo del cultivo; por ello, el objetivo del presente estudio consistió en evaluar el rendimiento, la calidad física y características químicas del grano en 10 genotipos de cebada maltera y definir la fecha de siembra óptima, dentro del período de establecimiento del cultivo bajo condiciones de riego en El Bajío mexicano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica

La siembra se realizó en condiciones de riego en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Roque, Celaya, Guanajuato, México, localizado a 20° 32' de latitud norte, 100° 49' de longitud oeste y a una altitud de 1752 m. La temperatura máxima promedio es de 25.5 °C y la mínima de 16 °C, la media anual es de 20.85 °C, el clima fluctúa entre semiseco y semicálido, con una precipitación pluvial promedio de 575.3 mm anuales (Grageda-Cabrera *et al.*, 2018). Se establecieron ocho ensayos, cuatro en el ciclo 2021-2022 sembrados el 30 de noviembre, 15 y 30 de diciembre y 15 de enero, y cuatro en las mismas fechas del ciclo 2022-2023.

Germoplasma

Se evaluaron 10 genotipos de cebada, cinco de dos hileras (*H. distichum*) en la espiga: PC13, PC14, PC15, AC Metcalfe y Explorer, las tres primeras son líneas experimentales y las dos últimas variedades extranjeras, generadas en Canadá y Francia, respectivamente; además, cinco variedades de seis hileras (*H. vulgare*): V11 (experimental), Alina, Estelar-OH y Esperanza son materiales liberados por el INIFAP y Doña Josefa (D. Josefa) fue liberada por el Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicola y Forestal del Estado de México (ICAMEX).

Diseño y unidad experimental

Los genotipos en cada fecha de siembra se manejaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela experimental fue de cuatro surcos de 3 m de largo y 0.8 m de separación, sembrados a doble hilera con separación de 0.2 m entre hileras, en tanto que la parcela útil fueron los dos surcos centrales. Los ensayos se establecieron con una densidad de siembra de 100 kg de semilla por hectárea.

Variables respuesta

Se registraron las variables rendimiento de grano (RG) en $t\ ha^{-1}$, peso de mil granos (PMG) en g, peso hectolítrico (PH) en $kg\ hL^{-1}$, contenido de proteína (CP) en porcentaje y de almidón (CA) en porcentaje, estas dos ultimas se determinaron con un analizador de grano (Marca FOOS, Infratec™, Dresden, Alemania).

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza combinado (McIntosh, 1983) para observar el efecto de los ciclos, fechas, variedades y de las interacciones entre los factores estudiados. Se realizaron pruebas de medias (DMS $P \leq 0.05$) para detectar diferencias entre niveles de los factores de variación. Los datos se analizaron estadísticamente con el programa SAS 9.4 (SAS Institute, 2022). Con la finalidad de indentificar las variables más importantes y la dispersión de los genotipos evaluados, se efectuó un análisis de componentes principales y de interacción genotipo-ambiente. Se realizó un analisis de estabilidad del rendimiento de grano para detectar la respuesta de los materiales genéticos en las diferentes fechas de siembra e identificar si su rendimiento es predecible, estos dos ultimos se efectuaron con el modelo SREG (Alvarado *et al.*, 2020) del programa estadístico R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza combinado

El análisis de varianza se presenta en el Cuadro 1. Se observa que el factor de variación debido a los Ciclo de evaluación, sólo presentó diferencia estadística significativa en peso de mil granos y peso hectolítrico ($P \leq 0.05$). En los factores Variedad y Fecha de siembra se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en rendimiento, peso de mil granos, peso hectolítrico, contenido de proteína y contenido de almidón. En la interacción Ciclo $\times$ Variedad hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas, salvo en peso de mil granos. En las interacciones dobles Ciclo $\times$ Variedad y Fecha de siembra $\times$

Variedad, así como en la interacción triple Ciclo $\times$ Fecha de siembra $\times$ Variedad sólo hubo insignificancia estadística ($P \leq 0.05$) en rendimiento de grano, peso de mil granos y peso hectolítrico.

En rendimiento de grano, la fuente de variación más importante según su cuadrado medio fue Fecha de siembra, seguido por variedad y por la interacción Ciclo $\times$ Variedad, lo que justifica el análisis de interacción genotipo-ambiente. La interacción Ciclo $\times$ Variedad generó la mayor variabilidad porque su cuadrado medio superó al de Ciclo $\times$ Fecha de siembra en todas las variables, salvo en contenido de almidón. En la variable rendimiento, la Fecha de siembra presentó la mayor variación, seguida por Variedades. Por la magnitud de los cuadrados medios en el peso de mil granos, el mayor impacto fue ocasionado por el Ciclo de evaluación, seguido por Variedad. En peso hectolítrico los mayores cuadrados medios lo tuvieron Ciclo de evaluación y Fecha de siembra. Finalmente, la mayor variación en la expresión del contenido de proteína y almidón fueron Fecha de siembra y la interacción Fecha de siembra $\times$ Ciclo de evaluación.

Prueba de medias

En las pruebas de medias (Cuadro 2), entre ciclos de evaluación se observó que en rendimiento de grano y contenido nutricional (proteína y almidón) no hubo diferencias estadísticas; sin embargo, si existieron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) en la expresión de peso de mil granos y peso hectolítrico en favor del primer ciclo de evaluación.

Entre Fechas de siembra las del 30 de noviembre y 15 de diciembre fueron superiores ($P \leq 0.05$) en rendimiento de grano, peso de mil granos y contenido de proteína. En peso hectolítrico la fecha del 30 de noviembre superó ($P \leq 0.05$) a las tres fechas de siembra restantes. Todo lo anterior da evidencias que la primera fecha tuvo condiciones ambientales adecuadas. Otros investigadores como Pérez *et al.* (2015) observaron que en la fecha del 15 de diciembre se presentaron los mayores resultados para peso hectolítrico ($65.11\ kg\ hL^{-1}$) y peso de mil granos (44 g). La fecha del 30 de diciembre tuvo impactos similares en la expresión de peso de mil granos y peso hectolítrico. También, Shivhare *et al.* (2020) mencionaron que los mejores resultados los obtuvieron con las condiciones ambientales del 15 de noviembre, lo cual coincide con este estudio, ya que las fechas óptimas fueron en noviembre y parte de diciembre. Pal *et al.* (2018) señalaron que el rendimiento fue afectado por las fechas de siembra y determinaron que los mejores rendimientos se pueden obtener en la segunda quincena de noviembre, lo cual coincide con lo sucedido en este estudio con el ensayo

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado del rendimiento y calidad físicoquímica de 10 genotipos de cebada evaluados en cuatro fechas de siembra durante dos ciclos en Guanajuato, México. Ciclos: Otoño/Invierno 2021-2022 y 2022-2023.

Fuentes de Variación	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Peso mil granos (g)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Proteína	Almidón
				(%)	(%)
Ciclo (C)	231835.3	3256.3 *	761.0 *	6.5	0.1
Variedad (Var)	9372988.9 **	740.6 **	91.0 **	8.3 *	8.1 *
C × Var	3063801.4 **	19.7 *	34.9 **	3.9	5.5
Fecha Siembra (FS)	116716656.0 **	284.0 *	240.8 **	36.0 *	26.9 *
C × FS	2564711.8 *	1.3	88.4 *	51.1 *	37.0 *
FS × Var	1068296.5 *	17.0 *	7.5 *	0.9	1.1
C × FS × Var	1141890.5 *	15.4 *	8.1 *	1.3	1.2
C.V. (%)	12.9	6.8	2.8	8.6	1.7

*, **: significancia con $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente, C.V.: coeficiente de variación. Var: variedad, FS: fecha de siembra, C: ciclo.

establecido a finales de noviembre. Por el contrario, en la fecha de siembra del 15 de enero se obtuvieron los menores valores en todas las variables evaluadas ($P \leq 0.05$), excepto en CP. Esto probablemente está influido por la presencia de mayores temperaturas en el período comprendido entre espigamiento y llenado de grano (Devi *et al.*, 2021), lo que afectó el rendimiento de grano.

Con respecto a las variedades, en la variable rendimiento de grano se observó que las variedades de seis hileras Alina y Esperanza presentaron los mayores rendimientos ($P \leq 0.05$). Cabe resaltar que Alina también estuvo en el grupo con los mayores contenidos de proteína y almidón. En contraste, los genotipos con menores rendimientos fueron Estelar-OH, Explorer, V11 y AC Metcalfe, con un rendimiento promedio de este grupo de 5.5 t ha⁻¹. En el caso de peso de mil granos, las variedades con mayor valor ($P \leq 0.05$) fueron PC13, PC14 y PC15, que son materiales de dos hileras. En peso hectolítrico los mejores materiales ($P \leq 0.05$) fueron PC13, PC14, PC15 y AC Metcalfe; por otro lado, los genotipos con valores más bajos fueron las variedades de seis hileras V11, Doña Josefa y Esperanza; este comportamiento probablemente se deba a que su grano es más pequeño en comparación con las variedades de dos hileras, lo que coincide con lo mencionado por Miroslavjević *et al.* (2018), quienes detectaron que el peso del grano fue mayor en las cebadas de dos hileras, lo cual explican por la menor competencia por los asimilados al tener menor número de granos en la espiga.

En contenido de proteína sobresalieron Doña Josefa y Alina ($P \leq 0.05$). En contenido de almidón destacaron Alina,

PC15, Doña Josefa y Explorer ($P \leq 0.05$). El porcentaje de proteína puede ser influenciado por muchos factores, como temperaturas mayores de 30 °C (Devi *et al.*, 2021), lo que provoca incrementos de la misma, como sucedió en el estudio que realizaron Ni *et al.* (2020), donde los valores oscilaron alrededor de 14 % de proteína, lo que coincide con lo observado en la fecha del 15 de enero en este estudio.

Análisis de componentes principales

Los dos primeros componentes principales explicaron el 75 % de la varianza total del experimento. En el CP1 las variables mas importantes fueron peso hectolítrico y peso de mil granos. En el CP2 fueron rendimiento de grano, contenido de almidón y contenido de proteína.

Entre las variables evaluadas se observaron tres patrones diferentes (Figura 1). El primero fue entre las variables rendimiento de grano y contenido de almidón, donde se presentó un ángulo menor de 90° entre sus vectores, lo que se interpreta, según Johnson (1998), como una interdependencia positiva; es decir, que a medida que uno aumenta el otro también lo hace. La relación positiva fue más estrecha entre el peso hectolítrico y el peso de mil granos, pues en ambas variables sus vectores se modificaron en la misma magnitud y dirección, de tal forma que a mayor peso de grano, mayor peso hectolítrico. Un caso de interdependencia negativa se observó entre rendimiento y contenido de proteína del grano; es decir, cuando el rendimiento aumentó, el contenido de proteína se redujo y viceversa, lo que se puede deber al efecto de fuente-demanda de carbohidratos durante el llenado de grano (Egli, 2017).

Entre los genotipos evaluados (Figura 2) se observó la siguiente relación: en Alina se presentó el mayor rendimiento y contenido de almidón, pues en la Figura 1 las dos variables mencionadas presentaron los mayores autovectores en el componente principal 2; además, Alina mostró bajo contenido de proteína, y esta característica se ubicó en el cuadrante IV con un ángulo aproximado de 180° con respecto a las dos variables mencionadas. Por otro lado, se observó que AC Metcalfe fue la variedad con el mayor contenido de proteína, pero también con el menor rendimiento de grano y se ubica en el cuadrante IV, lo que coincide con lo reportado por Kandic *et al.* (2019) en el sentido de que a mayor rendimiento hubo menor contenido de proteína. A pesar de que Esperanza y Alina presentaron

buen rendimiento, su porcentaje de proteína fue de los más bajos, ya que la primera variedad se ubicó con un ángulo mayor de 90° en el cuadrante IV y el segundo genotipo se situó en el cuadrante II con un ángulo cercano a 180°, ambas con respecto al vector de proteína (Figura 1).

Entre los genotipos extranjeros, la variedad Explorer también presentó un alto contenido de proteína, aunque se ubicó en el grupo de menor rendimiento de grano. Las líneas experimentales de dos hileras PC13, PC14 y PC15 presentaron un rendimiento intermedio con respecto a las demás variedades; sin embargo, sus valores de PMG son de los mejores, por lo cual se pueden proponer como materiales malteros.

Cuadro 2. Prueba de medias entre ciclos, fechas de siembra y genotipos evaluados por su rendimiento y variables de calidad fisicoquímica de cebada en Guanajuato, México.

Fuentes de variación	RG (t ha ⁻¹)	PMG (g)	PH (kg hL ⁻¹)	CP (%)	CA (%)
Ciclo					
2021-2022	6.11 a	43.27 a	66.13 a	13.24 a	63.04 a
2022-2023	6.22 a	35.99 b	62.56 b	12.88 b	63.04 a
DMS (0.05)	0.16	1.7	1.3	1.4	1.2
Fecha de Siembra					
30 Nov	7.14 a	42.10 a	66.73 a	12.32 c	63.54 a
15 Dic	7.42 a	41.02 a	65.28 b	12.58 bc	63.63 a
30 Dic	5.75 b	37.85 b	63.02 c	13.25 b	62.98 b
15 Ene	4.22 c	37.58 b	62.32 c	14.12 a	62.12 c
DMS (0.05)	0.35	1.5	0.95	0.82	0.44
Variedades					
Alina [†]	7.23 a	36.99 cd	64.34 c	12.48 cd	63.80 ab
Esperanza [†]	6.91 ab	36.10 d	61.54 e	13.07 abc	62.04 d
PC15 ^{††}	6.59 bc	46.92 a	66.00 ab	13.42 abc	63.24 abc
PC13 ^{††}	6.26 cd	47.26 a	66.44 ab	13.49 ab	62.92 bcd
PC14 ^{††}	6.22 cd	46.13 a	66.55 a	13.37 abc	63.04 bcd
Doña Josefa [†]	6.22 cd	33.85 e	62.07 e	11.83 d	63.70 abc
Estelar-OH [†]	5.75 de	38.15 c	63.11 d	13.27 abc	62.65 cd
Explorer ^{††}	5.59 e	41.72 b	65.43 b	12.60 bcd	64.10 a
V11 [†]	5.56 e	30.89 f	62.00 e	13.26 abc	62.81 bcd
AC Metcalfe ^{††}	5.28 e	38.08 c	65.89 ab	13.80 a	62.89 bcd
DMS (0.05)	0.51	1.29	1.03	0.94	1.00

Medias con la misma letra en cada columna y fuente de variación son estadísticamente iguales. DMS: diferencia mínima significativa ($P \leq 0.05$).

[†]: seis hileras, ^{††}: dos hileras, RG: rendimiento de grano, PMG: peso de mil granos, PH: peso hectolítico, CP: contenido de proteína, CA: contenido de almidón.

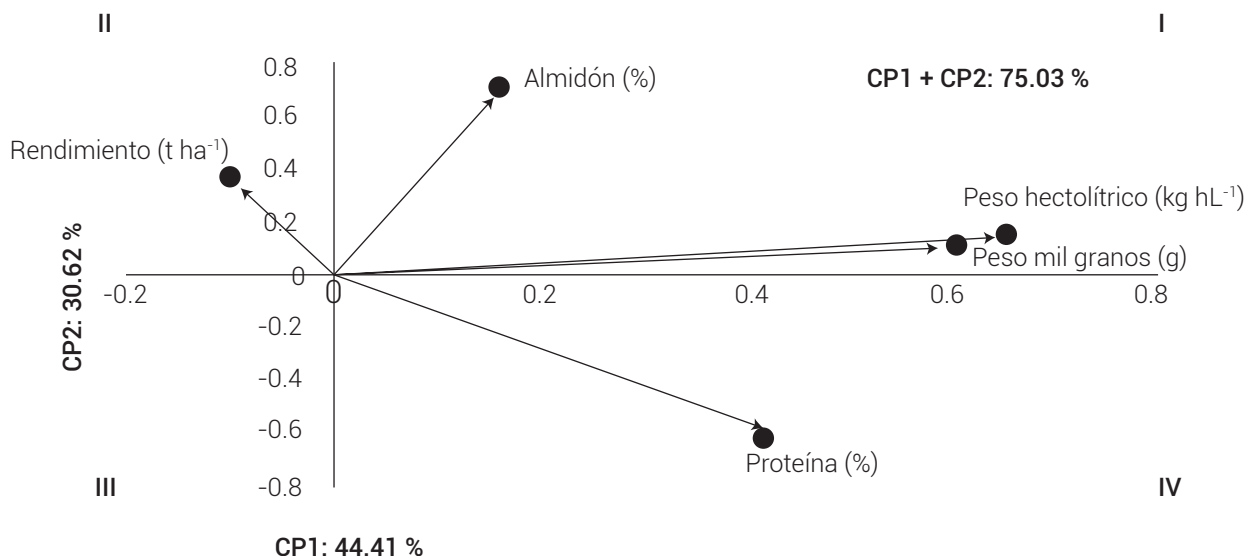


Figura 1. Valores característicos de las variables evaluadas y su relación de interdependencia entre ellas con base en los dos primeros componentes principales. CP. Componente principal.

Análisis de la interacción genotipo-ambiente

El plano cartesiano de la Figura 3, conformado por los dos primeros componentes principales, explicó el 78.2 % de la varianza total. En el análisis de interacción genotipo-ambiente se observa que las variedades Alina y Esperanza, ambas de seis hileras, presentaron los mayores rendimientos a través de los dos ciclos de evaluación y las cuatro fechas dentro de cada ciclo, como se visualiza por la mayor longitud de su vector con respecto al origen, por lo que se considera que fueron las de mayor adaptabilidad; en contraste, las variedades Estelar-OH, Explorer y AC Metcalfe no sobresalieron en ningún ambiente, ya que presentaron la menor interacción con todos los entornos evaluados y se ubican en el lado opuesto de todas las condiciones agroclimáticas estudiadas con respecto al CP2.

Las variedades PC15 de dos hileras y Doña Josefa de seis, aunque no fueron estables por las desviaciones con respecto a la recta de regresión (flecha gruesa), sus rendimientos superaron el promedio general en todos los ambientes. Las variedades PC14, Explorer, Estelar-OH, AC Metcalfe y V11 se ubicaron en el lado contrario de los ambientes evaluados con respecto al CP2, fueron las que obtuvieron los menores rendimientos en todos los entornos ecológicos conformados por las combinaciones de los dos ciclos de evaluación y las cuatro fechas de siembra en cada ciclo. Es importante destacar que el bajo rendimiento de las variedades extranjeras, V11 y Estelar-OH puede deberse a su baja capacidad para adaptarse a las condiciones de la región de El Bajío; el caso de las dos

últimas se explica porque fueron generadas por el INIFAP para condiciones de temporal.

Con relación a la estabilidad del rendimiento en la Figura 3, la recta de regresión indica la dirección y magnitud del rendimiento. La variedad Alina fue la de mayor producción (7.2 t ha⁻¹), y por localizarse cercana a la recta de regresión, su rendimiento se considera predecible o estable (Pérez-Ruiz *et al.*, 2016b), por tener ambas características se considera el genotipo más deseable de todos. La segunda variedad en importancia es Esperanza, con un rendimiento promedio de 6.9 t ha⁻¹. En tercer lugar se ubicó la línea experimental PC15 con un rendimiento promedio alto, de 6.6 t ha⁻¹, pero con desviaciones de regresión moderadamente altas. Entre las variedades más impredecibles o inestables se encuentran V11 (5.5 t ha⁻¹), Estelar-OH (5.7 t ha⁻¹), Explorer (5.5 t ha⁻¹) y AC Metcalfe (5.2 t ha⁻¹), variedades que además presentaron los menores rendimientos en todos los ambientes de evaluación. Entre los genotipos experimentales, PC13 presentó un comportamiento más predecible o estable y menor rendimiento (0.7 t ha⁻¹) con respecto a la variedad Esperanza.

CONCLUSIONES

Los mayores rendimientos de grano los presentaron las variedades Alina y Esperanza en los dos ciclos y cuatro fechas de siembra dentro de cada ciclo. Para peso de mil granos y peso hectolítrico los mejores genotipos fueron las líneas experimentales PC13, PC14 y PC15. Los materiales con menor contenido de proteína fueron Alina y Doña Josefa; estas variedades, junto con PC15 y Explorer

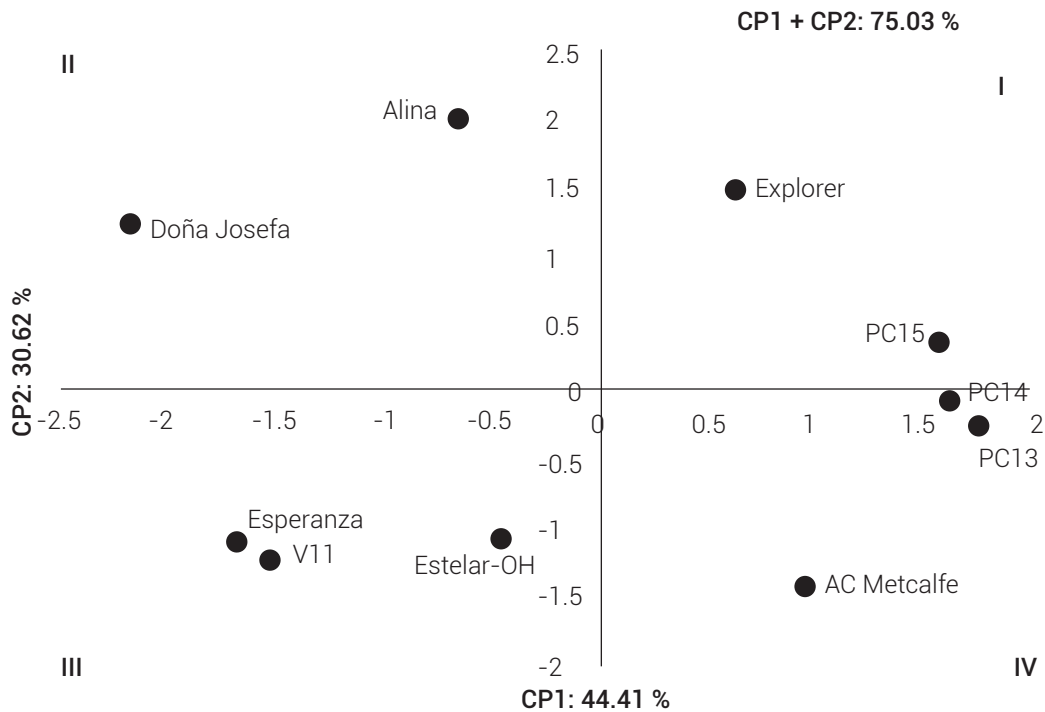


Figura 2. Plano cartesiano con la dispersión de los genotipos con base en las variables de rendimiento de grano, calidad física y nutrimental de 10 genotipos de cebada evaluados en dos ciclos y cuatro fechas de siembra, Celaya, Guanajuato, México. CP: Componente principal.

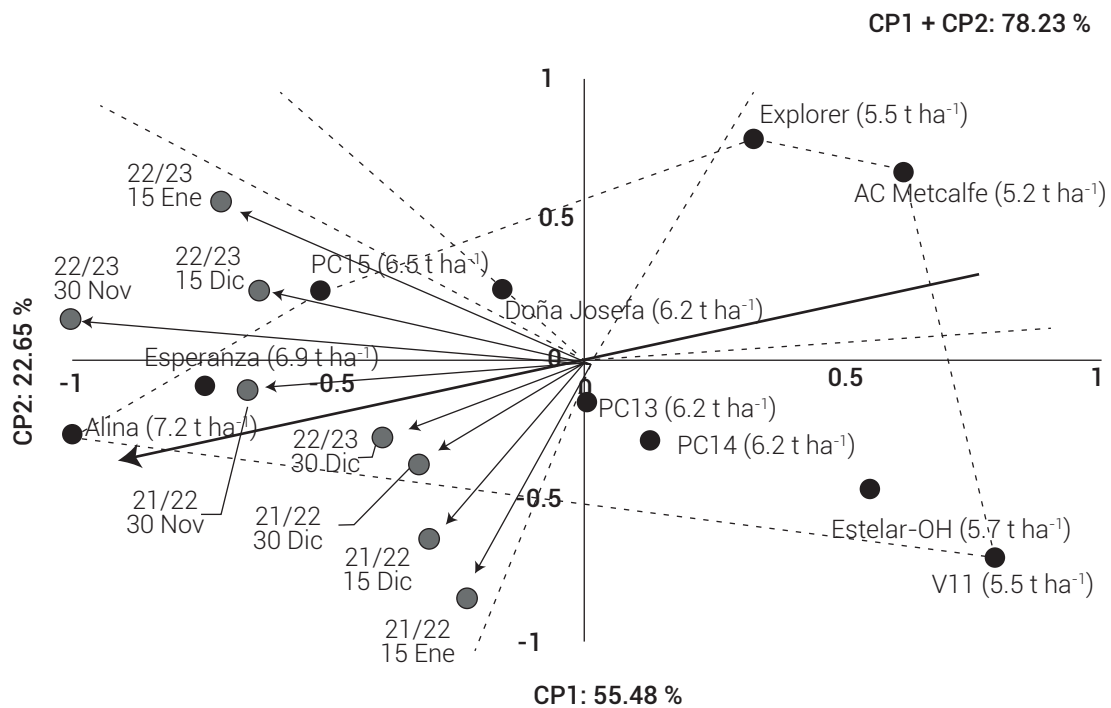


Figura 3. Dispersión de los genotipos y ambientes con base en los dos primeros componentes principales del modelo SREG para rendimiento de grano de 10 variedades de cebada evaluadas en dos ciclos y cuatro fechas de siembra, Celaya, Guanajuato, México.

tuvieron el mayor contenido de almidón. Las fechas de siembra tempranas son más favorables para rendimiento de grano, alto contenido de almidón y bajo contenido de proteína.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado G., F. M. Rodríguez, A. Pacheco, J. Burgueño, J. Crossa, M. Vargas, ... and M. A. Lopez-Cruz (2020) META-R: a software to analyze data from multi-environment plant breeding trials. *The Crop Journal* 8:745-756, <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.010>
- Devi S., Y. Kumar and S. Shehrawat (2021) Identification of heat tolerant barley genotypes based on heat susceptibility index. *Journal of Cereal Research* 13:197-204, <http://doi.org/10.25174/2582-2675/2021/112860>
- Egli D. B. (2017) Seed Biology and Yield of Grain Crops. 2nd edition. CAB International. Wallingford, UK. 192 p.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2024) Cultivos y productos de ganadería. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (Mayo 2024).
- García-Giménez G. and S. A. Jobling (2022) Gene editing for barley grain quality improvement. *Journal of Cereal Science* 103:103394, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103394>
- González G. M., M. Zamora D., R. Huerta Z. y S. Solano H. (2013) Eficacia de tres fungicidas para controlar roya de la hoja en cebada maltera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4:1237-1250, <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i8.1136>
- González G. M., M. Zamora D. y S. Solano H. (2016) Evaluación agronómica y física en líneas avanzadas de cebada maltera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:159-171, <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i1.380>
- Grageda-Cabrera O. A., S. S. González-Figueroa, J. A. Vera-Núñez, J. F. Aguirre-Medina y J. J. Peña-Cabral (2018) Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:281-289, <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1071>
- Johnson D. E. (1998) Applied Multivariate Methods for Data Analysts. Duxbury Press. Boston, Massachusetts, USA. 425 p.
- Kandic V., D. Dodig, M. Secanski, S. Prodanovic, G. Brankovic and P. Titan (2019) Grain yield, agronomic traits, and protein content of two- and six-row barley genotypes under terminal drought conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research* 79:648-657, <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000400648>
- López P. P., F. A. Guzmán O., E. M. Santos L., F. Prieto G. y A. D. Román G. (2005) Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (*Hordeum sativum* jess) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México. *Revista Chilena de Nutrición* 32:247-253, <https://doi.org/10.4067/S0717-75182005000300010>
- McIntosh M. S. (1983) Analysis of combined experiments. *Agronomy Journal* 75:153-155, <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500010041x>
- Mirosavljević M., V. Momčilović, S. Denčić, S. Mikić, D. Trkulja and N. Pržulj (2018) Grain number and grain weight as determinants of triticale, wheat, two-rowed and six-rowed barley yield in the Pannonian environment. *Spanish Journal of Agricultural Research* 16:e0903, <https://doi.org/10.5424/sjar/2018163-11388>
- Ni S. J., H. F. Zhao and G. P. Zhang (2020) Effects of post-heading high temperature on some quality traits of malt barley. *Journal of Integrative Agriculture* 19:2674-2679, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62878-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62878-9)
- Obadi M., J. Sun and B. Xu (2021) Highland barley: chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications. *Food Research International* 140:110065, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110065>
- Pal P., Reddy, M. D. Reddy, G. Pandey and A. Kumar (2018) Effect of different dates of sowing on barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties under limited irrigation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* SP2:88-91.
- Pérez R. J. A., J. A. Mejía C., M. Zamora D., S. Solano H. y A. Hernández L. (2015) Evaluación de la fecha de siembra de diez genotipos de cebada maltera. Región Bajío. *Ciencia desde el Occidente* 2:18-28.
- Pérez-Ruiz J. A., M. Zamora-Díaz, J. A. Mejía-Contreras, A. Hernández-Livera y S. Solano-Hernández (2016a) Evaluación de 10 genotipos de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en cinco fechas de siembra y dos ciclos agrícolas. *Agrociencia* 50: 201-213.
- Pérez-Ruiz J., M. Zamora-Díaz, J. Mejía-Contreras, A. Hernández-Livera y S. Solano-Hernández (2016b) Estabilidad del rendimiento de grano en cebada maltera en El Bajío, México. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 32:12-19, <https://doi.org/10.4067/S0719-38902016000100002>
- Rani H. and R. D. Bhardwaj (2021) Quality attributes for barley malt: "The backbone of beer". *Journal of Food Science* 86:3322-3340, <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15858>
- Rezaei E. E., L. Vargas R., W. Zhu and D. Cammarano (2022) The potential of crop models in simulation of barley quality traits under changing climates: a review. *Field Crops Research* 286:108624, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108624>
- Rodríguez-García M. F., M. González-González y A. Mandujano-Bueno (2022) Variability of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, resistance and agronomic behavior of two-row barley germplasm. *Mexican Journal of Phytopathology* 41:5-25, <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2208-1>
- SAS Institute (2022) SAS/STAT® User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- SE, Secretaría de Economía (2003) NMX-FF-043-SCFI-2003 Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – cereal – cebada maltera (*Hordeum vulgare* L. y *Hordeum distichum* L.) – especificaciones y métodos de prueba. Secretaría de Economía. México, D. F. https://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-FF-043-SCFI-2003_cebada.pdf (Febrero 2025).
- Serrago R. A., G. A. García, R. Savin, D. J. Miralles and G. A. Slafer (2023) Determinants of grain number responding to environmental and genetic factors in two- and six-rowed barley types. *Field Crops Research* 302:109073, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109073>
- Shivhare P., M. D. Reddy, G. Pandey and A. Kumar (2020) Performance of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties to different sowing dates under irrigated conditions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 9:2216-2223, <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.904.265>
- Shvachko N. A., I. G. Loskutov, T. V. Semilet, V. S. Popov, O. N. Kovaleva and A. V. Konarev (2021) Bioactive components in oat and barley grain as a promising breeding trend for functional food production. *Molecules* 26:2260, <https://doi.org/10.3390/molecules26082260>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México, México. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ (Abril 2024).