



Comportamiento productivo y estabilidad fenotípica de *Hordeum vulgare* L. en Colombia¹

Productive behavior and phenotypic stability of *Hordeum vulgare* L. in Colombia

Luis Fernando Campuzano-Duque², Diego Fernando Avendaño-Avendaño³, Nadia Yurani Luque-Sanabria³

- ¹ Recepción: 28 de octubre, 2020. Aceptación: 13 de julio, 2021. Este trabajo formó parte del macroproyecto titulado “Generación y validación de modelos sostenibles de producción para mejorar la competitividad de la cadena de la papa en Colombia” y financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia.
- ² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación La Libertad, Villavicencio, Colombia. lcampuzano@agrosavia.co (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-1146-4591>).
- ³ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Colombia. davendano@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-7556-6023>); nluque@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-4108-3231>).

Resumen

Introducción. La incorporación de 40 mil hectáreas de cebada (*Hordeum vulgare* L.) para la industria de cerveza en Colombia, con una producción proyectada de 80 mil t año⁻¹ en el periodo 2016 a 2026, permitirá reducir la importación en un 60 %; no obstante, el cumplimiento de esta meta requiere de variedades de cebada de alto rendimiento y calidad. **Objetivo.** Identificar una variedad de cebada con rendimiento de grano estable y superior a 2,6 t ha⁻¹ asociada con tolerancia al volcamiento, menor severidad a la roya amarilla en la hoja y espiga y calidad física del grano para la industria cervecera. **Materiales y métodos.** Entre 2016 y 2017, se realizó una prueba de evaluación agronómica en la región Andina colombiana, en un diseño de bloques completos al azar, con ocho variedades de cebada de dos hileras introducidas a Colombia. Se determinaron: maduración fisiológica, volcamiento, severidad a *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* en la hoja y espiga, rendimiento de grano y peso hectolítrico. **Resultados.** Las variedades Madi y S5 con rendimientos de grano de 2,89 y 2,61 t ha⁻¹, respectivamente, fueron superiores en 24 y 16 % en relación con Metcalfé y 19 y 11 % en comparación con Maltera 5. Ambas variedades presentaron estabilidad fenotípica amplia, tolerancia al volcamiento, menor severidad de la roya en la hoja y espiga y con un peso hectolítrico apropiado para la industria cervecera. **Conclusión.** Las características de producción, estabilidad fenotípica y calidad física del grano, de las variedades Madi y S5, las vuelve candidatas comerciales para la industria cervecera y con dominio de recomendación en el altiplano Cundiboyacense en Colombia, previa validación con una prueba semi comercial.

Palabras clave: adaptación, altiplano Cundiboyacense, cebada maltera, rendimiento de grano.

Abstract

Introduction. The incorporation of 40 thousand hectares of barley (*Hordeum vulgare* L.) for the beer industry in Colombia, with a projected production of 80 thousand t yr⁻¹ in the period 2016 to 2026, will allow to reduce



imports by 60 %. However, meeting this goal requires high-yielding, high-quality barley varieties. **Objective.** To identify a barley variety with stable grain yield and higher than 2.6 t ha⁻¹ associated with tolerance to tipping, lower severity to yellow rust on the leaf and ear, and physical quality of the grain for the brewing industry. **Materials and methods.** Between 2016 and 2017, an agronomic evaluation trial was carried out in the Colombian Andean region, in a randomized complete block design, with eight two-row barley varieties introduced to Colombia. The physiological maturity, tipping, severity to *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* in the leaf and ear, grain yield, and hectoliter weight were determined. **Results.** The Madi and S5 varieties with grain yields of 2.89 and 2.61 t ha⁻¹, respectively, were 24 and 16 % higher than Metcalfe and 19 and 11 % higher than Maltera 5. Both varieties showed broad phenotypic stability, tolerance to tipping, lower severity of leaf and ear rust, and a hectoliter weight suitable for the brewing industry. **Conclusion.** The production characteristics, phenotypic stability, and physical quality of the grain of Madi and S5 varieties make them commercial candidates for the brewing industry and for recommendation in the Cundiboyacense highlands of Colombia, after validation with a semi-commercial trial.

Keywords: adaptation, Cundiboyacense highlands, malting barley, grain yield.

Introducción

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es un cereal originario de Asia y es el cuarto cereal más importante del mundo, se cultiva en más de 100 países en 70 millones de hectáreas, con una producción de 160 millones de toneladas; esto representa una ocupación de área del 9,4 % de la superficie total de cereales cultivados, con un aporte del 7,8 % de la producción mundial (Sato, 2020). Dado que la cebada es uno de los cultivos más antiguos, su domesticación ha evolucionado en muchos caracteres por mutaciones y selección natural, lo que generó un acervo genético amplio asociado con su uso (humano, animal e industrial), y diversidad alélica útil para el mejoramiento genético (Haas et al, 2019; Sato, 2020).

El mejoramiento genético de la cebada se ha centrado en la selección de caracteres como el rendimiento de grano, la resistencia a enfermedades, la calidad de malteado y la tolerancia a estreses abióticos con ganancias genéticas variables asociadas a las condiciones agroecológicas del cultivo y el control genético cuantitativo de los caracteres que involucran loci con efectos pequeños y aditivos, con alta interacción genotipo por ambiente y baja heredabilidad (Laidig et al., 2017; Rodrigues et al., 2020; Sato, 2020).

La ganancia genética de la cebada es heterogénea y está medida en diferentes décadas; de 1968 a 2008 el rendimiento promedio mundial en t ha⁻¹ se movió de 1,7 a 2,6 y de 3,3 a 5,9 en Europa occidental (Riggs et al., 1980); de 1979 a 2006 en Etiopía de 3,2 a 4,4 (Al-Ghzawi et al., 2019), en Perú de 0,8 t ha⁻¹ en el año 1971 a 1,3 t ha⁻¹ en el año 2003 con una ganancia del 62,0 % (Llacsá et al., 2020) y en Argentina en dos periodos diferentes, el primero de 1970 a 1979 con un rendimiento de 41,0 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Abeledo et al., 2003) y en el segundo de 1959 a 2018, de 1,55 t ha⁻¹ a 4,67 t ha⁻¹, con una ganancia genética anual de 3,1 % (Abeledo et al., 2018).

La cebada, tiene una concentración mayor en áreas templadas y en las zonas altas del subtropical y trópico; sin embargo, en esta última zona su cultivo se desarrolla en condiciones agroecológicas con predominio de estreses abióticos y ambientales y en suelos marginales (Haas et al., 2019; Sato, 2020). Uno de los productores de cebada en región de Trópico Alto es Colombia, que ocupa el puesto 54 entre 100 países productores. La historia indica que fue introducida en 1539 para su uso industrial en la década de los sesentas hasta los ochentas con 50 mil hectáreas en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño y con predominio de un modelo de economía campesina con un sistema temporal-espacial de rotación papa-cereales-leguminosas (Vanegas et al., 2018). Por razones estratégicas de mercado asociado con la apertura económica en los años 90, la industria nacional decidió

satisfacer la demanda de materia prima con grano importado, en detrimento de la soberanía alimentaria (Vanegas et al., 2018; Velasco-Laiton et al., 2020).

A partir del año 2016, el sector público en asocio con el privado retomó el cultivo de cebada en Colombia, para incorporar en una primera fase y por un periodo de diez años (2016-2026) 40 mil hectáreas con una producción proyectada de 80 mil t año⁻¹, para reducir en un 60 % la importación y retomar y fortalecer el sistema de economía campesina asociado con el mejoramiento integral de la calidad de vida rural (Vanegas et al., 2018). Esta reactivación permitió en el año 2017, con la introducción y evaluación de dos variedades foráneas Metcalfe y Maltera 5, la siembra de 2957 ha con una producción de 5510 toneladas en los tres principales departamentos productores Cundinamarca, Nariño y Boyacá (Velasco-Laiton, 2020).

En las dos variedades que se cultivan en Colombia, Metcalfe y Maltera 5, se han observado pérdidas en el rendimiento y calidad del grano por efecto del volcamiento de tallo y la susceptibilidad a la roya amarilla en detrimento de la rentabilidad y sostenibilidad del sistema productivo (Velasco-Laiton, 2020). Por esta razón, el retorno de la cebada en Colombia requiere en un contexto del sistema productivo papa-cereales-leguminosas, la conjugación del componente genético y de la agronomía para el desarrollo y la provisión recurrente de nuevas variedades con producción competitiva, sostenible y de calidad industrial. Por ello, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) desarrolló este estudio con el fin de identificar una variedad de cebada con rendimiento de grano estable y superior a 2,6 t ha⁻¹ asociada con tolerancia al volcamiento, menor severidad a la roya amarilla en la hoja y espiga y calidad física del grano para la industria cervecera.

Materiales y métodos

Prueba de evaluación Agronómica (PEA): diseño experimental, localidades y variedades

Se realizó una prueba de evaluación agronómica (PEA), ajustada a la Resolución 067516 (Instituto Colombiano Agropecuario, 2020), en un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA) con siete localidades, diez variedades (ocho foráneas y dos locales como testigo) y cuatro repeticiones. La unidad experimental se constituyó de seis surcos de 4 m de longitud, separados 0,30 m, con una densidad de siembra de 60 kg ha⁻¹.

Las localidades y su ubicación georeferenciada fueron: Localidad 1: Mosquera (4°41'43" N 74°12'02" O), Localidad 2: Cucunuba (5°14'41" N 73°42'44" O), Localidad 3: Tibasosa (5°48'09" N 73°00'18" O), Localidad 4: Duitama (5°50'37" N 73°01'48" O), Localidad 5: Mosquera (4°41'43" N 74°12'02" O), Localidad 6: Cota (4°48'19" N 74°06'32" O) y Localidad 7: Toca (5°35'12" N 73°09'50" O). La PEA en L1, L2, L3, L4, se establecieron en el segundo semestre del año 2016 (octubre) y en L5, L6 y L7 en el primer semestre de 2017 (marzo). Todas las localidades se consideran representativas de la región Andina subregión Altiplano Cundiboyacense y, según la clasificación de Caldas-Lang, corresponden a un clima frío semihúmedo (Fsh) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2017).

El material vegetal estuvo integrado por ocho variedades de cebada foráneas (*H. vulgare* L.) introducidas a Colombia con diferentes procedencias: Bonus (Rep. Checa), Braemar (Gran Bretaña), Erika (Sudáfrica), Laisa (Uruguay), Madi (Uruguay), NRB (Reino Unido), Pewter (Inglaterra) y S5 (Sudáfrica) y como testigos se utilizaron las variedades Metcalfe (Canadá) y Maltera 5 (Australia). Todas las variedades utilizadas en el estudio son de tipo primaveral, de dos hileras y con crecimiento tipo erecto. Metcalfe y Maltera 5 se utilizaron como testigos por ser las que se cultivan en los principales departamentos productores (Cundinamarca, Boyacá y Nariño) asociados con los altiplanos Cundiboyacense y de Nariño; no obstante, estas dos variedades han demostrado un rendimiento promedio de 1,5 t ha⁻¹, considerado bajo, lo cual se asocia con volcamiento y severidad de la roya amarilla en la hoja y en la espiga que reducen la rentabilidad del sistema productivo.

Características del suelo y manejo agronómico

Para conocer el nivel de fertilidad del suelo y aplicar los correctivos y la fertilización apropiada, en cada localidad se tomaron muestras de suelo a una profundidad entre 0 y 20 cm, que permitió determinar la textura y las características químicas de: pH, materia orgánica (%), fósforo (mg kg^{-1}), calcio, magnesio y potasio (cmol kg^{-1}). Estos análisis se realizaron en el laboratorio de química de suelos, aguas y plantas de AGROSAVIA (Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera-Colombia).

El acondicionamiento del suelo en relación con la acidez (pH), solo en la localidad de Tibasosa se aplicó $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ de cal dolomítica. La preparación del suelo se realizó con un pase de arado de cincel vibratorio, dos pases de rastra y un pase de rastra pulidor. La siembra coincidió con el inicio del período de lluvias (de octubre a noviembre en el 2016 y marzo a abril en el 2017) y se realizó de forma manual. En cada localidad la fertilización se hizo con base en el análisis del suelo y el requerimiento nutricional para producir $2,0 \text{ t ha}^{-1}$. Se aplicaron compuestos simples en kg ha^{-1} de N:150, P_2O_5 : 120; K_2O : 90, Ca: 70 y Mg: 25; el nitrógeno se aplicó fraccionado a la siembra y al macollamiento (75:75). Como fuentes simples se usaron urea, superfosfato triple, cloruro de potasio, sulfato de magnesio para nitrógeno, fósforo y potasio y magnesio, respectivamente. Se realizó control de malezas, de gramíneas y de hoja ancha, desde el momento de la siembra con aplicación de preemergente (ácido-4-amino-3,5,6-tricloropicolínico 200 cc ha^{-1}) y poseemergente (Metsulfuron Metil 15 g ha^{-1}).

Variables determinadas

De acuerdo con los estados fenológicos de la cebada (Zadoks et al., 1974) se determinaron en estado lechoso del grano (Zadoks 7,0): a) madurez fisiológica, con base en el número de días de emergencia hasta la cosecha de grano expresado en días, y b) volcamiento de tallo, de forma visual, en cada unidad experimental, el número de plantas del total de la población con volcamiento de tallo, el resultado se expresó en porcentaje y con transformación a raíz cuadrada del arcoseno. El rendimiento de grano se obtuvo en el momento de la madurez (Zadoks 9,0), con la cosecha de los tres surcos centrales de cada unidad experimental y se expresó en t ha^{-1} ajustado con una humedad del 14,0 %. El peso hectolítrico del grano, se extrajo de una muestra de 250 g de grano con la balanza Schopper y expresado en kg hL^{-1} .

En la etapa de anthesis (Zadoks 6) se evaluó la severidad en la roya amarilla en la hoja (*Puccinia striiformis* f. sp *hordei*) con base en la escala de Peterson et al. (1948), donde se combinó la severidad del área foliar afectada en porcentaje entre 0 y 100 y la reacción varietal (resistente=R; moderadamente resistente=MR; moderadamente susceptible (MS), susceptible=S); en el estado pastoso del grano (Zadoks 8). Se determinó de manera visual la severidad de la roya amarilla en la espiga (*Puccinia striiformis* f. sp *hordei*), de acuerdo con la metodología de Stubbs et al. (1977). La valoración de severidad y la reacción varietal se realizaron en condiciones de inóculo natural del patógeno en cada localidad; con los datos en porcentaje se realizó una transformación angular (raíz cuadrada arcoseno), para satisfacer el supuesto de normalidad.

Modelo y análisis estadístico

Con los datos de todas las variables determinadas se verificaron los supuestos del análisis de varianza: 1) prueba de Shapiro & Wilk (1965), para la homogeneidad de varianza, 2) análisis individual de varianza por localidad y la combinación de localidades y 3) comparación de medias con la prueba de Tukey ($p=0,01$). Los procedimientos y análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS versión 9.4 (Statistical Analysis Systems Institute, 2016).

La interacción variedad x localidad se determinó para todas las variables con el modelo de efecto principal aditivo e interacción multiplicativa (AMMI), descrito por Crossa et al. (2002) y Gabriel (1971). Para el análisis de varianza, la localidad y la repetición se consideraron efectos aleatorios y la variedad fue el efecto fijo.

El modelo estadístico utilizado fue el siguiente: $Y_{ijk} = \mu + V_i + L_j + (VL)_{ij} + B_k(j) + E_{ijk}$; donde: Y_{ijk} = promedio variable dependiente del i-ésimo variedad obtenido en el j-ésimo localidad y k-ésima repetición; μ = efecto de la media general; V_i = efecto del i-ésimo variedad; A_j = efecto del j-ésimo localidad; $(VA)_{ij}$ = efecto de la interacción entre el i-ésimo variedad y el j-ésimo localidad; $B_k(j)$ = efecto de la k-ésima repetición en el j-ésimo localidad y E_{ijk} = efecto aleatorio del error experimental asociado al i-ésimo variedad en el j-ésimo localidad y K-ésima repetición, según el modelo lineal aditivo.

Resultados

Características del suelo y clima

Los suelos asociados a las localidades de evaluación por ubicación y geomorfología en el altiplano Cundiboyacense, se clasificaron como ácidos, del orden Inceptisoles, con predominio de textura franco arcillosa y franco arenosa, pH desde 4,7 a 7,3, materia orgánica de 2,7 a 9,0 % y un contenido de bajo a alto de fósforo de 3,5 a 167,3 mg kg⁻¹. Los contenidos de calcio, magnesio y potasio en cmol kg⁻¹, fueron: de 4,3 a 8,6 de calcio; de 0,3 a 3,6 de magnesio y de 0,2 a 0,9 de potasio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características fisicoquímicas del suelo en siete localidades del altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Table 1. Physicochemical characteristics of the soil in seven locations of the Cundiboyacense highlands. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Localidad	Textura	pH	Materia orgánica %	Fósforo mg kg ⁻¹	Calcio cmol kg ⁻¹	Magnesio cmol kg ⁻¹	Potasio cmol kg ⁻¹
Mosquera	FAr	5,4	9,0 M	57,7 A	7,0 A	3,6 A	0,4 A
Cucunubá	FA	5,6	7,7 M	3,5 B	5,0 M	3,6 A	0,9 A
Duitama	FA	5,6	3,0 B	20,5 M	4,3 M	0,3 B	0,1 B
Tibasosa	FAr	4,7	2,7 B	84,0 A	7,0 A	1,1 B	0,6 A
Mosquera	FAr	5,7	9,4 M	63,0 A	7,2 A	1,8 M	0,2 B
Toca	FA	7,3	7,3 M	167,3 A	8,6 A	0,6 B	0,7 A
Cota	FA	5,8	3,4 B	3,5 B	4,8 M	0,4 B	0,2 B

B: bajo; M: medio; A: alto; FA: franco-arenoso; FAr: franco-arcilloso. / B: low; M: medium; A: high; FA: Sandy loam; Far: clay loam.

Las localidades se consideraron óptimas para la producción de cebada, de acuerdo con los requerimientos edafoclimáticos para una producción de 3,0 t ha⁻¹ de grano. Estas se ubican de 2400 a 3300 msnm, presentaron una precipitación de 600 mm, un suelo franco arenoso y arcilloso y un pH entre 5,5 a 7,5, con excepción de Tibasosa con 4,7, razón por la cual se realizó la corrección química con encalamiento. La principal diferencia entre localidades, en relación con el clima, desde germinación hasta la cosecha de grano, fue la precipitación. De acuerdo con el requerimiento de 600 mm de agua, en cinco de las siete localidades (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Cota

y Toca) se satisfizo entre el 95 % y 100 % los requerimientos. En Cucunubá y Duitama se presentó déficit de agua de 38,4 % y 48,5 %, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Altitud, precipitación, temperatura media y agua satisfecha ocurrida entre la emergencia a la cosecha de grano de cebada (*Hordeum vulgare* L.), en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

Table 2. Altitude, precipitation, mean temperature, and satisfied water occurred between the emergence of barley (*Hordeum vulgare* L.) harvest, in seven locations in the Cundiboyacense highlands. Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

Localidad	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)	Agua satisfecha (%)
Mosquera1	2547	600,0	17,4	100,0
Cucunubá	2850	230,8	16,9	38,4
Tibasosa	2488	580,4	17,2	96,7
Duitama	2620	290,8	17,1	48,5
Mosquera2	2547	580,4	15,5	96,7
Cota	2566	578,4	15,2	96,4
Toca	2789	572,6	15,6	95,4

Fuente: IDEAM (2017); *: porcentaje de agua satisfecha sobre la base de requerimiento de agua de 600 mm / Source: IDEAM (2017); *: percentage of water satisfied based on the water requirement of 600 mm.

Rendimiento de grano

El análisis de varianza combinado a través de localidades el rendimiento de grano presentó diferencias altamente significativas ($p=0,01$) para localidad y variedad y significativa ($p=0,05$) para la interacción variedad x localidad. La mayor participación de la variación total del modelo estadístico para rendimiento de grano se debió a los factores localidad y variedad, con un valor de 71,2 % y 13,7 %, respectivamente, mientras que la menor participación correspondió a la interacción variedad x localidad (8,1 %). Con base en el análisis AMMI, se estableció que los dos primeros componentes principales CP1 Y CP2, con una significancia de $\alpha= 0,01$, explicaron el 81,7 % de la interacción genotipo x localidad (Cuadro 3).

Este resultado permite una interpretación confiable del comportamiento de la interacción variedad x localidad, ya que un valor aceptable es una proporción mayor a 75,0 %. El coeficiente de variación observado fue de 9,4 %, el cual es considerado aceptable. La mayor participación del factor localidad en la variación total del modelo estadístico para rendimiento de grano, se atribuyó a un posible efecto del déficit de agua observado en dos de las siete localidades del estudio (L2 y L4) (Cucunubá y Duitama) (Cuadro 2).

El gráfico biplot del AMMI que modeló la interacción variedad x localidad con base en los dos primeros componentes principales CP1 y CP2, con una participación de 49,3 % y 34,2 %, respectivamente, permitió identificar como variedades con adaptación amplia a aquellas asociadas con el punto cero y con adaptación específica a aquellas asociadas al vértice del vector de una o varias localidades. Asimismo, este gráfico permitió reconocer el aporte de cada localidad en la interacción variedad x localidad (a mayor longitud del vector mayor aporte en la interacción y viceversa) y la potencia del modelo para discriminar el comportamiento diferencial de las variedades. Mosquera2 y Cota fueron los de mayor aporte a la interacción variedad x localidad, por su longitud

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado para rendimiento de grano de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Table 3. Combined analysis of variance for grain yield of eight varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.) in seven localities in the Cundiboyacense highlands. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Fuente de variación	Grados de libertad	Rendimiento de grano	CP %
Repetición (L)	19	8,2	
Localidad-L	6	712,6 ** (51,6)	
Variedad-V	9	239,5 ** (26,0)	
V x L	54	20,0 * (13,0)	
CP1	24	30,3**	49,3
CP2	12	17,2**	81,7
CP3	10	16,8	95,1
CP4	8	4,6	100,0
Error	187	4,1	
C. V %		9,4	

C.V: coeficiente de variación; *: diferencias significativas ($p=0,05$) **: diferencias altamente significativas ($p=0,01$). / C. V: coefficient of variation; *: significant differences ($p=0.05$); **: highly significant differences ($p=0.01$).

del vector localidad, mientras que L4 (Duitama) y L2 (Cucunubá) con la menor longitud del vector mostraron el menor aporte (Figura 1).

El rendimiento de grano a través de las localidades fue de 2,99 t ha⁻¹ en L6 (Toca), 2,72 t ha⁻¹ en L1 (Mosquera1), 2,67 t ha⁻¹ en L7 (Cota), 2,56 t ha⁻¹ en L3 (Tibasosa), 2,52 t ha⁻¹ en L5 (Mosquera2), 1,54 t ha⁻¹ en L4 (Duitama) y 0,95 t ha⁻¹ en L2 (Cucunubá) (Cuadro 3). La precipitación ocurrida en cada localidad estuvo asociada con el mayor y menor rendimiento de grano; en las localidades que se satisfizo en mayor medida el requerimiento de agua, se obtuvieron mejores rendimientos (L6, L1, L7, L5 y L3) que en aquellos con déficit hídrico (L2 y L4) (Cuadro 4).

Los rendimientos de grano en t ha⁻¹ según variedad fueron de 2,68 con Madi, 2,51 con S5, 2,39 con Maltera 5, 2,23 con Pewter, 2,21 con Laisa, 2,19 con Braemar, Metcalfe y Erika con 2,14, iguales estadísticamente entre sí ($p=0,05$) y diferentes con los rendimientos de 1,95 con NRB y 1,82 con Bonus, estos dos últimos iguales entre sí ($p=0,05$) (Cuadro 4).

Las variedades Madi y S5 con un rendimiento de grano asociado al vértice cero del gráfico biplot, presentaron estabilidad fenotípica amplia. Las otras ocho variedades, que incluyen los testigos comerciales, mostraron adaptación específica. NRB y Braemar asociado con L1 (Mosquera1) y L3 (Tibasosa), Bonus con L6 (Toca), Erika con L7 (Cota), Pewter con L4 (Duitama), Laisa con L4 (Duitama) y L5 (Mosquera2), los dos testigos comerciales Metcalfe con L1 (Mosquera1), L3 (Tibasosa), y L7 (Cota) y Maltera 5 con L5 (Cota) (Figura 1).

La precipitación acumulada durante el periodo comprendido entre la siembra y la cosecha de grano permitió agrupar las localidades en dos: a) localidades sin restricción de agua (SR) (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Toca, Cota) y b) localidades con restricción de agua (CR) (Cucunubá y Duitama) (Cuadro 2 y 5). En las localidades SR el rendimiento de grano (t ha⁻¹) y su reducción en porcentaje (paréntesis) fue de 1,21 (39,9 %) en Madi y de 0,85 en S5 (30,9 %), diferente a la observada en las localidades CR con 1,61 (56,3 %) para Maltera 5 y 1,62 (60,2) para Metcalfe (Cuadro 5).

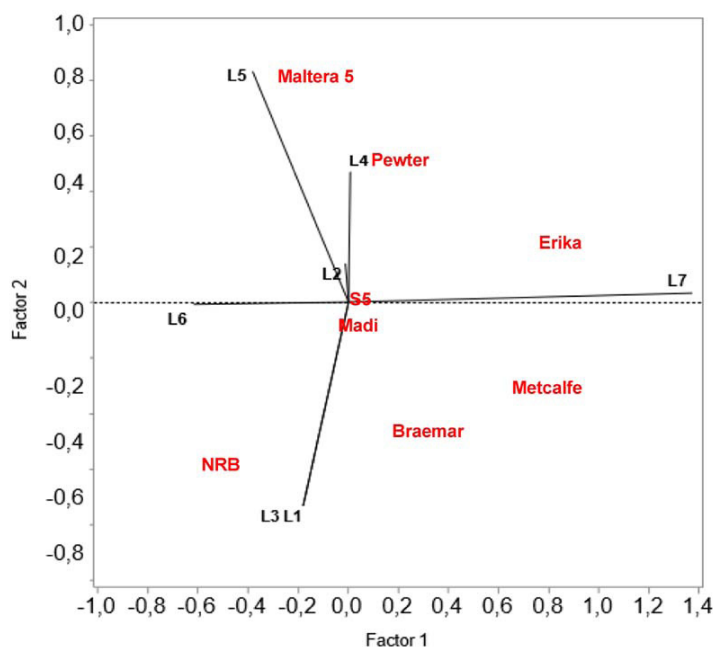


Figura 1. Representación de variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y localidades respecto a los dos primeros componentes CP1 y CP2 del análisis AMMI para el rendimiento de grano de ocho variedades en siete ambientes en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

L1: Mosquera1; L2: Cucunubá; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota.

Figure 1. Representation of varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.) and localities respect to the first two components CP1 and CP2 of the AMMI analysis for the grain yield of eight varieties evaluated in seven environments in the Cundiboyacense highlands. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

L1: Mosquera1; L2: Cucunuba; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota.

Madurez fisiológica, volcamiento de tallo, peso hectolítrico, roya de la hoja y roya de la espiga

El análisis de varianza que combinó localidades para madurez fisiológica y peso hectolítrico, presentó diferencias altamente significativas ($p=0,01$) para los factores localidad y variedad y significativa ($p=0,05$) para la interacción variedad por localidad. En las variables volcamiento de tallo, roya amarilla en la hoja y en la espiga, se observaron diferencias altamente significativas ($p=0,01$) para los tres factores. En todos los casos, los coeficientes de variación fueron menores al 15,0 %, lo cual permite inferir la confiabilidad de los datos (Cuadro 6).

La madurez fisiológica en días presentó un intervalo de valores de 130,0 para NRB en Cucunubá (L2) y 148,8 para Braemar en Cota (L7) con una media para las variedades de 143,8 en Braemar, 141,5 en Erika, 141,4 en NRB, 141,4 en Pewter, 139,2 en Bonus y 139,8 en S5, iguales estadísticamente entre sí ($p=0,05$) y diferentes a la media de 138,3 en Metcalfe y de 137,7 en Laisa. Las variedades que presentaron la menor media fueron Madi con 133,9 y Maltera 5 con 130,9 diferentes estadísticamente entre sí ($p=0,05$), mientras que Madi y S5 difirieron estadísticamente con Maltera 5. La mayor variación se observó entre localidades con un intervalo de 134,6 a 141,8; con una media por localidad de 142,6 en Cota (L7), diferente estadísticamente ($p=0,05$) a Mosquera (L5) con 138,9, Tibasosa (L3) con 138,7, Mosquera1 (L1) con 138,4 y Toca (L6) con 138,1. Las dos menores medias iguales estadísticamente entre sí ($p=0,05$) se obtuvieron en L4 (Duitama) con 135,7 y L2 (Cucunubá) con 134,3 (Cuadro 7).

Cuadro 4. Rendimiento de grano (t ha⁻¹) de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

Table 4. Grain yield (t ha⁻¹) of eight barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in seven locations in the Cundiboyacense highlands. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

Variedad	Localidad							Media
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
Bonus	2,14 c	0,64 d	2,14 c	1,03 c	2,04 c	2,69 b	2,04 b	1,82 c
Braemar	2,66 b	0,55 e	2,32 b	1,31 b	3,47 a	3,67 a	1,32 c	2,19 bc
Erika	2,17 c	0,87 d	2,08 c	1,68 a	2,10 c	2,39 b	3,72 a	2,14 bc
Laisa	2,60 b	0,85 d	2,60 b	0,99 c	2,67 b	2,91 ab	2,83 a	2,21 ab
Madi	3,53 a	1,78 a	3,52 a	1,86 a	2,47 b	3,42 a	3,91 a	2,68 a
NRB	2,82 b	0,69 b	2,34 b	1,62 a	1,60 d	3,01 b	1,60 c	1,95 c
Pewter	2,35 c	1,10 c	2,16 c	1,81 a	2,68 a	2,74 b	2,75 b	2,23 ab
S5	3,51 a	1,83 a	3,50 a	1,96 c	2,41 b	3,66 a	2,41b	2,51 a
Metcalfe	2,73 b	0,55 e	2,62 b	1,33 c	2,68 a	2,50 b	2,93 a	2,19 bc
Maltera5	2,71 ab	0,68 d	2,36 b	1,83 c	3,14 a	2,89 ab	3,18 a	2,39 a
Media	2,72 a	0,95 d	2,56 b	1,54 c	2,52 b	2,99 a	2,67 ab	2,22
C. V (%)	10,8	12,4	14,1	9,8	10,1	10,8	12,5	

Localidades: L1: Mosquera1; L2: Cucunuba; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota; medias con letras iguales entre filas y columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey); C.V: coeficiente de variación. / Localities: L1: Mosquera1; L2: Cucunuba; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota; means with the same letters between rows and columns do not differ statistically ($p \leq 0.05$, Tukey); C. V: coefficient of variation.

Cuadro 5. Rendimiento relativo de grano (t ha⁻¹) de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en dos condiciones de precipitación en el Altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Table 5. Relative grain yield (t ha⁻¹) of eight varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.), under two precipitation conditions in the Cundiboyacense highlands. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Variedad	Localidad		Reducción t ha ⁻¹	Reducción %
	SR	CR		
Madi	3,03	1,82	1,21	39,9
S5	3,75	1,90	0,85	30,9
Maltera 5	2,86	1,25	1,61	56,3
Metcalfe	2,69	1,07	1,62	60,2
Precipitación acumulada (mm)	582,36	260,80	321,56	55,21

SR: localidades sin restricción de agua (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Toca, Cota); CR: localidades con restricción de agua (Cucunubá, Duitama). / SR: localities without water restriction (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Toca, Cota); CR: localities with water restriction (Cucunuba, Duitama).

El volcamiento de tallo no presentó significancia estadística para la localidad y la interacción variedad por localidad. Solo se observó significancia estadística ($p=0,01$) para el factor variedad con un intervalo de valores de 2,0 % a 40,6 %. Los mayores resultados se obtuvieron con los dos testigos comerciales con una media de 34,4 %

Cuadro 6. Cuadrado medio del ANOVA para madurez fisiológica, volcamiento de tallo, peso hectolítrico, roya amarilla en la hoja y en la espiga de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Altiplano Cundiboyacense, Colombia. 2016-2017.

Table 6. Mean square of the ANOVA for physiological maturity, stem overturning, hectoliter weight, yellow leaf rust and yellow spike rust of eight barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in seven localities. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Altiplano Cundiboyacense, Colombia. 2016-2017.

F. de V.	g.l	MF	VT	PH	RAH	RAE
Repetición (L)	19	51,0	228,1	12,4	5,3	3,4
Localidad-L	6	1093,2**	583,7 ns	352,8**	8,0 ns	6,3 ns
Variedad-V	9	482,4**	1267,7**	120,6 **	4310,3**	2655,1**
V x L	54	23,4 *	199,6 ns	20,8 *	11,9 ns	6,5 ns
Error	187	2,9	69,9	4,6	9,2	4,9
C. V %		9,2	14,7	4,2	16,5	9,5

Localidades: L1: Mosquera1; L2: Cucunubá; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota. MF: madurez fisiológica, VT: volcamiento de tallo, PH: peso hectolítrico, RAH: roya amarilla en la hoja y RAE: roya amarilla en la espiga. Medias con letras iguales entre filas y columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey); C. V: coeficiente de variación. / Localities: L1: Mosquera1; L2: Cucunuba; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota. MF: physiological maturity, VT: stem overturning, PH: hectoliter weight, RAH: yellow rust on the leaf and RAE: yellow rust on the ear. Means with the same letters between rows and columns do not differ statistically ($p \leq 0,05$, Tukey); C. V: coefficient of variation.

Cuadro 7. Madurez fisiológica (días) de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Table 7. Physiological maturity (days) of eight varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.) in seven locations in the Cundiboyacense highland. Corporación Colombiana de Investigación. (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Variedad	Localidades							Media
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
Bonus	136,2 bc	132,2 c	141,6 b	134,2 b	142,0 ab	141,8 a	147,0 a	139,2 ab
Braemar	149,8 a	140,2 ab	146,2 a	141,5 a	140,0 b	140,0 a	148,8 a	143,8 a
Erika	136,0 bc	138,9 b	145,9 ab	140,4 a	142,9 ab	139,5 a	146,8 ab	141,5 a
Laisa	135,5 c	132,0 c	136,2 c	138,2 ab	140,0 b	137,8 ab	144,0 b	137,7 b
Madi	135,5 c	132,2 c	135,0 c	130,6 c	132,0 cd	137,3 ab	135,3 c	133,9 c
NRB	146,8 ab	130,0 cd	142,9 b	140,6 a	143,8 a	138,6 b	146,9 ab	141,4 a
Pewter	140,5 b	138,2 b	136,2 c	134,9 b	143,6 a	138,7 b	146,5 ab	139,8 ab
S5	132,2 cd	133,2 c	135,8 cd	134,2 b	134,2 c	134,1 bc	135,9 c	134,2 c
Maltera 5	130,0 d	128,4 d	132,1 d	126,5 d	131,8 d	132,3 c	135,8 c	130,9 d
Metcalfe	141,8 b	138,0 b	134,6 cb	136,3 b	138,4 b	140,3 a	139,0 bc	138,3 b
Media	138,4 b	134,3 c	138,7 b	135,7 c	138,9 b	138,1 b	142,6 a	
C. V (%)	12,6	10,6	10,2	8,6	10,0	12,0	12,4	

Localidades: L1: Mosquera1; L2: Cucunubá; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota; medias con letras iguales entre filas y columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey); C. V: coeficiente de variación. / Localities: L1: Mosquera1; L2: Cucunuba; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota; means with the same letters between rows and columns do not differ statistically ($p \leq 0,05$, Tukey); C. V: coefficient of variation.

en Maltera 5, 37,3 % en Metcalfe, iguales estadísticamente entre sí ($p=0,05$) y diferente estadísticamente ($p=0,05$) con los cinco menores valores de 3,4 % en Bonus, 3,3 % en Braemar, 3,2 % en Madi, 2,9 % en S5 y 3,8 % en Laisa (Figura 2). La menor variación en el volcamiento de tallo entre localidades con un intervalo de 11,7 % a 13,6 %.

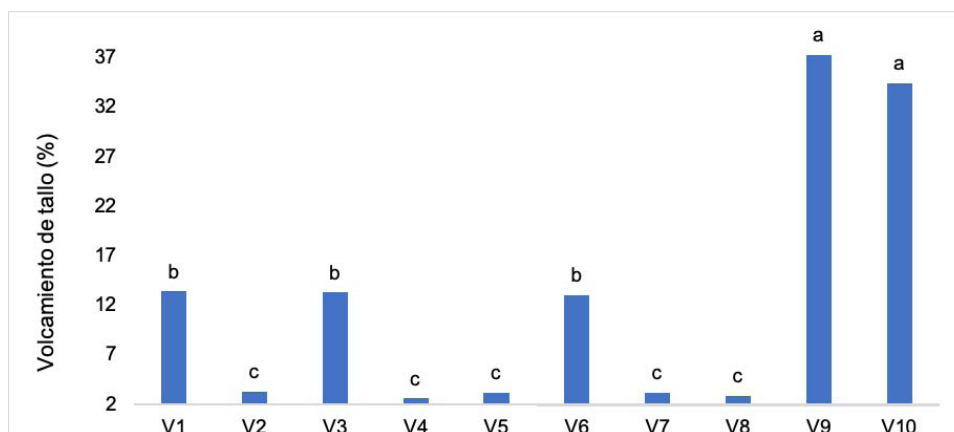


Figura 2. Volcamiento de tallo de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

V1: Bonus, V2: Braemar, V3: Erika, V4: Laisa, V5: Madi, V6: NRB, V7: Pewter, V8: S5, V9: Maltera 5, V10: Metcalfe. Medias con letras iguales en las columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey).

Figure 2. Stem overturning of eight barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in seven localities in the Cundiboyacense highlands. Corporacion Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia. 2016-2017.

V1: Bonus, V2: Braemar, V3: Erika, V4: Laisa, V5: Madi, V6: NRB, V7: Pewter, V8: S5, V9: Maltera 5, V10: Metcalfe; means with the same letters in the columns do not differ statistically ($p \leq 0,05$, Tukey).

El peso hectolítrico en kg hL^{-1} , presentó un intervalo de valores de 60,0 a 66,5. Los resultados más altos se obtuvieron en Madi (64,7), S5 (63,9) y Bonus (62,8), iguales estadísticamente entre sí ($p=0,05$) y diferente con Pewter (61,9), Maltera 5 (61,9), Laisa (61,6), NRB (61,5), Braemar (61,4) y Metcalfe (61,4). El factor localidad presentó valores de 60,5 a 63,2 con una media de 63,2 para Mosquera2 (L5), 63,1 para Mosquera1 y Tibasosa (L1 y L3), 62,8 para Cota (L7), 62,1 para Toca (L6), 60,6 para Cucunubá (L2) y 60,5 para Duitama (L2) (Cuadro 8).

La severidad de la roya amarilla en la hoja solo presentó diferencias estadísticas ($p=0,01$) para el factor variedad con datos entre 2,5 % y 40,0 %. Se observaron tres grupos de variedades con tres niveles de severidad, un primer grupo con los dos testigos comerciales Maltera 5 (34,5 %) y Metcalfe (28,9 %), diferentes estadísticamente entre sí ($p=0,05$); un segundo grupo con los tres menores valores de severidad de 7,9 % en Braemar, 3,7 % en Madi y 3,5 % en S5, iguales estos tres últimos entre sí. Las variedades Laisa con 25,0 %, NRB con 24,9 %, Pewter con 24,5 %, Erika con 12,4 % y Bonus con 12,1 %, conformaron un grupo con valores de severidad intermedia iguales estadísticamente entre sí ($p=0,05$) (Figura 3). La reacción a la roya de la hoja en cada variedad fue resistente (R) para Madi y S5, moderadamente resistente (MR) para Bonus, Braemar y Erika, de moderadamente resistente (MR) a moderadamente susceptible (MS) para Laisa, NRB y Pewter y de moderadamente susceptible (MS) a susceptible (S) para los dos testigos comerciales Maltera 5 y Metcalfe.

La severidad de la roya amarilla en la espiga solo presentó diferencias estadísticas ($p=0,01$) para el factor variedad, con un intervalo de 2,6 % a 40,0 %. Se observaron tres grupos de respuesta que tuvieron valores

Cuadro 8. Peso hectolitro (kg hL⁻¹) de ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y dos testigos comerciales en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Table 8. Hectoliter weight (kg hL⁻¹) of eight varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.) and two commercial controls in seven locations in the Cundiboyacense highlands. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Variedad	Localidades							Media
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	
Bonus	62,5	60,2	64,2	60,3	64,2	64,0	64,0	62,8 ab
Braemar	60,2 c	60,8 b	62,4 b	60,5 a	62,5 b	60,6 c	62,8 b	61,4 b
Erika	62,0 b	60,2 b	60,6 c	60,8 a	62,4 b	60,1 c	62,0 b	61,2 b
Laisa	62,8 b	60,8 b	62,0 b	60,6 a	60,8 c	62,0 b	61,9 bc	61,6 b
Madi	66,0 a	61,8 a	66,2 a	61,9 a	66,0 a	64,2 a	66,5 a	64,7 a
NRB	62,8	60,0 b	63,1 ab	60,1 a	62,0 b	60,7 c	61,6 bc	61,5 b
Pewter	63,6 ab	60,8 b	62,9 b	60,0 a	62,6 b	62,0 b	60,8 c	61,9 b
S5	64,0 a	61,4 a	64,8 a	61,4 a	66,8 a	64,0 a	64,8 a	63,9 a
Metcalfe	62,0 b	60,1 b	62,2 b	60,2 a	62,0 b	61,8 b	62,0 b	61,4 b
Maltera5	64,8 a	60,2 b	62,4 b	60,0 a	63,0 b	62,0 b	61,4 bc	61,9 b
Media	63,1 a	60,6 b	63,1 a	60,5 b	63,2 a	62,1 a	62,8 a	
C. V (%)	4,8	6,2	4,2	5,6	9,0	6,0	4,8	

Localidades: L1: Mosquera1; L2: Cucunubá; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota; grados de libertad para repetición (4), variedad (9) y error (27), medias con letras iguales en las columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey); C. V: coeficiente de variación. / Localities: L1: Mosquera1; L2: Cucunubá; L3: Tibasosa; L4: Duitama; L5: Mosquera2; L6: Toca; L7: Cota; grades degrees of freedom for repetition (4), variety (9), and error (2), means with the same letters in the columns do not differ statistically ($p \leq 0,05$, Tukey); C. V: coefficient of variation.

estadísticamente iguales entre grupos ($p=0,05$), el primero conformado por los dos testigos comerciales (Maltera 5= 34,5 % y Metcalfe= 28,9 %) fue el que mostró mayor severidad, el segundo grupo estuvo integrado con las dos variedades con los menores valores de severidad, Madi (3,7 %) y S5 (3,5 %), y el tercer grupo con valores de severidad intermedios, contuvo las variedades Laisa con 25,0 %, NRB con 24,9 %, Pewter y Braemar con 24,5 % y Erika y Bonus con 24,0 % (Figura 4).

Análisis comparativo de localidades sin restricción y con restricción de agua

Las localidades solo presentaron diferencias estadísticas en rendimiento de grano, madurez fisiológica y peso hectolítrico según la precipitación ocurrida, por lo que se agruparon en: sin restricción (SR) (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Toca y Cota) y con restricción (CR) (Cucunubá, Duitama). El rendimiento de grano, la madurez fisiológica y el peso hectolítrico presentaron valores diferenciados asociados con estos dos grupos de localidades. El rendimiento de grano en SR fue de 2,69 t ha⁻¹ y CR de 1,25 t ha⁻¹, la madurez fisiológica de 139,3 días en SR y de 135,0 días en CR y el peso hectolítrico de 62,9 kg hL⁻¹ en SR y de 60,6 kg hL⁻¹ en CR.

Las condiciones del clima para los dos grupos de localidades fueron: altitud de 2587 m y 2735 m para SR y CR, respectivamente, temperatura media (°C) de 16,2 para SR y 17,0 para CR y precipitación (mm) de 582,3 y 260,8 para SR y CR, respectivamente. Las condiciones del suelo por grupo de localidades fueron: pH fue de 5,8 en SR y 5,6 en CR, materia orgánica (%) de 6,4 para SR y 5,4 para CR, y fósforo (mg kg⁻¹) de 75,1 para SR y 12,0 para CR (Cuadro 9).

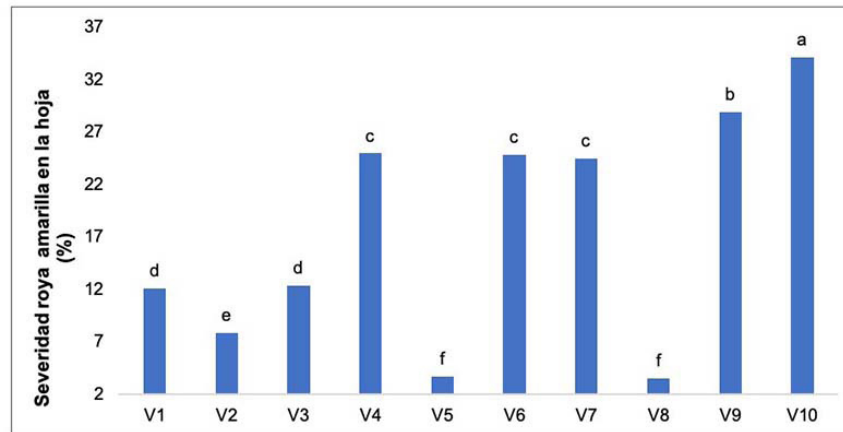


Figura 3. Severidad de la roya amarilla en la hoja (*Puccinia striiformis f. sp. hordei*) en ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

V1=Bonus, V2=Braemar, V3=Erika, V4=Laisa, V5=Madi, V6=NRB, V7=Pewter, V8=S5, V9=Maltera 5, V10=Metcalfe. Medias con letras iguales en las columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey).

Figure 3. Severity of yellow rust on the leaf (*Puccinia striiformis f. sp. hordei*) in eight varieties of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in seven localities in the Cundiboyacense highlands. Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

V1=Bonus, V2=Braemar, V3=Erika, V4=Laisa, V5=Madi, V6=NRB, V7=Pewter, V8=S5, V9=Maltera 5, V10=Metcalfe. Means with the same letters in the columns do not differ statistically ($p \leq 0,05$, Tukey).

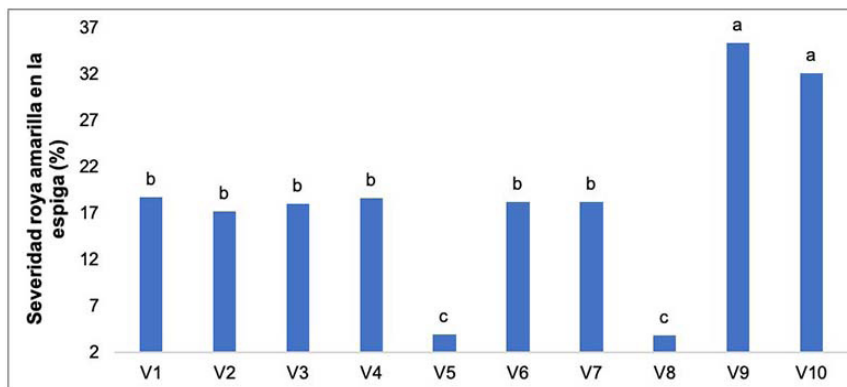


Figura 4. Severidad de la roya amarilla en la espiga (*Puccinia striiformis f. sp. hordei*) en ocho variedades de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en siete localidades en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

V1=Bonus, V2=Braemar, V3=Erika, V4=Laisa, V5=Madi, V6=NRB, V7=Pewter, V8=S5, V9=Maltera 5, V10=Metcalfe. Medias con letras iguales en las columnas no difieren estadísticamente ($p \leq 0,05$, Tukey).

Figure 4. Severity of yellow rust on the spike (*Puccinia striiformis f. sp. hordei*) in eight barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in seven localities in the Cundiboyacense highlands. Corporacion Colombiana de Investigacion Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

V1=Bonus, V2=Braemar, V3=Erika, V4=Laisa, V5=Madi, V6=NRB, V7=Pewter, V8=S5, V9=Maltera 5, V10=Metcalfe. Means with the same letters in the columns do not differ statistically ($p \leq 0,05$, Tukey).

Cuadro 9. Rendimiento de grano, madurez fisiológica y peso hectolítrico de cebada (*Hordeum vulgare* L.), y su relación con el suelo y dos condiciones de precipitación en el altiplano Cundiboyacense. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

Table 9. Grain yield, physiological maturity and hectoliter weight in barley (*Hordeum vulgare* L.), and its relationship with soil and two precipitation conditions. Cundiboyacense highlands Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Colombia. 2016-2017.

VARIABLES Y FACTORES	SR	CR
Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	2,69	1,25
Madurez fisiológica (días)	139,3	135,0
Peso hectolitrito (kg hL ⁻¹)	62,9	60,6
Clima		
Altitud (msnm)	2587	2735
Temperatura (°C)	16,2	17,0
Precipitación acumulada (mm)	582,3	260,8
Suelo		
pH	5,8	5,6
Materia orgánica (%)	6,4	5,4
Fósforo (mg kg ⁻¹)	75,1	12,0

SR: localidades sin restricción de agua (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Toca, Cota); CR: localidades con restricción de agua (Cucunubá, Duitama). / SR: localities without water restriction (Mosquera1, Tibasosa, Mosquera2, Toca, Cota); CR: localities with water restriction (Cucunuba, Duitama).

Discusión

La discusión de los resultados se focalizó en el comportamiento productivo de Madi y S5 en relación con las variedades testigo Maltera 5 y Metcalfe. Las otras seis variedades no mostraron un rendimiento óptimo requerido (2,6 t ha⁻¹).

A pesar, de haberse presentado una interacción significativa entre la variedad y la localidad en el rendimiento de grano, la madurez fisiológica y el peso hectolítrico, no se descartó el análisis del efecto localidad, factor que solo fue significativo en estas tres variables y cuya proporción de participación (entre paréntesis) en el modelo estadístico fue cuatro veces mayor que la interacción variedad por localidad en el rendimiento de grano (51,8 % vs 13,0 %) y madurez fisiológica (51,6 % vs 9,9 %) y dos veces mayor en el peso hectolítrico (40,8 % vs 20,9 %). De hecho, las localidades SR marcaron una condición favorable con 55,3 % y 55,3 % más de agua y fósforo, respectivamente, en relación con las localidades CR, contraste ambiental al cual las variedades fueron sometidas y permitió determinar la estabilidad fenotípica amplia en Madi y S5.

El origen volcánico del suelo en Cucunubá y Duitama del orden Inceptisol (Ramos) se caracteriza por la alta fijación y poca movilidad del fósforo en el suelo (Ramos, 2017); no obstante que en todas las localidades se realizó una fertilización edáfica con 120 kg de P₂O₅ para sostener un rendimiento de 2,0 t ha⁻¹ a 3,0 t ha⁻¹, el fósforo aplicado en las condiciones de estrés hídrico quizás no tuvo la disponibilidad requerida y ocasionó un déficit nutricional en la planta con detrimento del rendimiento de grano. Esta condición de estrés por agua y fósforo ratificó las anotaciones anteriores del contraste ambiental.

La estabilidad amplia de Madi y S5 estuvo asociada con la plasticidad fenotípica, donde la menor reducción del rendimiento de grano en CR vs SR fue de 39,9 % en Madi y 30,9 % en S5; este resultado concuerda con los reportes en cebada de Andrejčíková et al. (2016), Fita et al. (2015) y Pecio & Wach (2015), con reducciones en el rendimiento del 20 al 30 % con estrés hídrico comparado con las reducciones de 50 al 70 % sin estrés. La

estabilidad amplia y la plasticidad fenotípica observada en Madi y S5 en una etapa productiva comercial reduciría el riesgo económico en ambientes heterogéneos a diferencia de los testigos comercial Maltera 5 y Metcalfe, que mostraron el doble de reducción del 56,3 % y 60,2 %, respectivamente.

El rendimiento de las variedades Madi y S5 estuvo acorde con el intervalo de 1,0 a 3,0 t h⁻¹ reportado en el trópico y menor medida al de las regiones septentrionales de 4,0 a 10,0 t ha⁻¹. Este rendimiento se considera mayor al reportado en Perú de 1,5 t ha⁻¹, en Bolivia de 2,3 t ha⁻¹ e inferior al de México de 3,8 t ha⁻¹ y al de Ecuador de 3,9 t ha⁻¹ (García et al., 2017; Llacsá et al., 2020). Las variedades Madi y S5 fueron superiores en rendimiento al promedio nacional en Colombia (2,0 t ha⁻¹); sin embargo, se considera que este aun puede incrementarse, como se demostró en el trópico alto peruano al pasar de 1,1 t ha⁻¹ con variedades de seis hileras a un potencial 3,2 t ha⁻¹ con genética mutante de cebada de dos hileras (Llacsá et al., 2020). Estos resultados abren la posibilidad de reorganizar el programa de mejoramiento con la tropicalización de la cebada, mediante la hibridación intraespecífica con énfasis en incrementar el potencial productivo y mejorar la calidad industrial del grano en las variedades locales antiguas. Esta estrategia, se utiliza con éxito con la introgresión (hibridación interespecífica) de germoplasma tropical del maíz en el temperado para mejorar adaptación en el trópico (Cairns & Prasanna, 2018) y en cebada para ampliar la base genética y la adaptación a estreses abióticos y la calidad (Hernandez et al., 2020).

El grado de severidad a la roya amarilla en la hoja observada en Madi y S5 y comparado con el obtenido en Maltera 5 y Metcalfe, está asociada con la reacción varietal de moderadamente resistente (MR) a resistente (R) en Madi y S5 y de moderadamente susceptible (MS) a susceptible (S) en Maltera 5 y Metcalfe, en ambos casos la escala varietal indicó una relación gene-gene (Parlevliet & Zadoks, 1977), con un mecanismo de resistencia vertical monogénica de alta heredabilidad (Burbano-Figueroa, 2020). La severidad del patógeno en Madi y S5 no sobrepasó el 30 % en el umbral de daño económico entre los 20 a 30 días antes y 10 después de la floración; este nivel de área foliar (95) con una hoja bandera sana debió permitir mayor acumulación y translocación activa de fotosintatos (Sanchez-Bragado et al., 2020) y, por ende, mayor rendimiento a diferencia de Maltera 5 y Metcalfe que presentaron el 60 % de área foliar enfermo y menor rendimiento. Similar situación se observó en la roya amarilla en la espiga, donde Madi y S5 presentaron el 95 % de su espiga sana a diferencia del 60 % sano en Maltera 5 y Metcalfe. La espiga es una estructura fotosintética activa responsable del 10 % al 44 % de los fotosintatos acumulados (Molero et al., 2019; Sanchez-Bragado et al., 2020) y adquiere mayor importancia en condiciones de sequía post-antesis (Molero et al., 2019), situación observada en el ambiente CR propiciado por la restricción hídrica en Cucunubá y Duitama.

En cuanto a la severidad en la roya de la hoja y en la espiga, Madi y S5 en ausencia de una interacción variedad por localidad mostraron condiciones asociadas con la estabilidad fenotípica amplia y coadyuvaron a la estabilidad del rendimiento de grano. Esta relación es común y está reportada en trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) entre la resistencia durable a las royas con la estabilidad del rendimiento (Figueroa et al., 2018; Mohammadi et al., 2010; Verma et al., 2017); también se ha reportado en soya (*Glycine max*) entre la resistencia parcial a *Phakopsora pachyrhizi* con la estabilidad y adaptabilidad del rendimiento (Martins & Juliatti, 2012).

El volcamiento de tallo en Madi y S5 del 5,0 % fue significativamente inferior al de las variedades Maltera 5 con 37,0 % y Metcalfe con 35,0 %. Madi y S5 fueron más precoces a Metcalfe y más tardías en relación con Maltera 5. Aunque esta diferencia fue estadísticamente significativa, la condición precoz o tardía de ellas no superó los cinco días, que en términos biológicos no es importante. Similar comportamiento se observó para madurez fisiológica, con una diferencia de solo 4,3 días entre SR y CR. Igual comportamiento tuvo el peso hectolítrico, donde Madi y S5 obtuvieron 64,7 kg hL⁻¹ y 63,9 kg hL⁻¹, respectivamente, resultados que fueron superiores a Maltera 5 y Metcalfe con 61,4 kg hL⁻¹ y 61,9 kg hL⁻¹, respectivamente, con una diferencia de 2,3 kg hL⁻¹ entre SR vs CR. El valor de peso hectolítrico obtenido en Madi y S5 cumple el requisito mínimo por la industria cervecera de 55 kg hL⁻¹.

Conclusiones

Las mejores variedades de cebada con estabilidad fenotípica fueron Madi con un rendimiento de grano de 2,89 t ha⁻¹ superior en 24 % y 19 % en relación con Metcalfe y Maltera 5, respectivamente y S5 con 2,61 t ha⁻¹, superior en 16,0 % y 11 % en relación con los mismos testigos. Además, ambas variedades (Madi y S5) presentaron tolerancia al volcamiento, menor severidad a roya amarilla y con característica adecuada en el parámetro físico evaluado (peso hectolátrico) requerido por la industria cervecera.

Agradecimientos

Esta investigación y su información hizo parte del informe final del Macroproyecto “Generación y validación de modelos sostenibles de producción para mejorar la competitividad de la cadena de la papa en Colombia” y fue posible gracias al apoyo económico del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

Referencias

- Abeledo, L. G., Calderini, D. F., & Slafer, G. A. (2003). Genetic improvement of barley yield potential and its physiological determinants in Argentina (1944-1998). *Euphytica*, *130*, 325–334. <https://doi.org/10.1023/A:1023089421426>
- Abeledo, L. G., Serrago, R. A., de San Celedonio, R., Lo Valvo, P. J., & Miralle, D. J. (2018). Limitantes al rendimiento en trigo y cebada. *Agronomía y Ambiente*, *38*(1), 71–84.
- Al-Ghzawi, A. K., Al-Ajlouni, Z. I., Al Sane, K. O., Bsoul, E., Musallam, I., Khalaf, Y. B., Al-Hajaj, N., Al-Tawaha, A. R., Aldwairi, Y., & Al-Saqqar, H. (2019). Yield stability and adaptation of four spring barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars under rainfed conditions. *Research on Crops*, *20*(1), 10–18. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.002>
- Andrejčíková, M., Macák, M., & Habán, M. (2016). Yield potential of spring malting barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties in the growing conditions of south-western Slovakia. *Journal Center European Agricultural*, *17*(4), 932–940. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/17.4.1793>
- Burbano-Figueroa, O. (2020). Resistencia de plantas a patógenos: una revisión sobre los conceptos de resistencia vertical y horizontal. *Revista Argentina de Microbiología*, *52*(3), 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.04.006>
- Cairns, J. E., & Prasanna, B. M. (2018). Developing and deploying climate-resilient maize varieties in the developing world. *Current Opinion in Plant Biology*, *45*, 226–230. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.05.004>
- Crossa, J., Cornelius, P., & Yan, W. (2002). Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype environment interaction. *Crop. Science*, *42*, 619–633. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.0619>
- Figueroa, M., Hammond-Kosack, K. E., & Solomon, P.S. (2018). A review of wheat diseases- a field perspective. *Molecular Plant Pathology*, *19*(6), 1523–1536. <https://doi.org/10.1111/mpp.12618>
- Fita, A., Rodríguez-Burruezo, A., Boscaiu, M., Prohens, J., & Vicente, O. (2015). Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production. *Frontiers in Plant Science*, *6*(9), Article 978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00978>

- Gabriel, K. (1971). The biplot graphic of matrices with application to principal component analysis. *Biometrics*, 58, 453–467. <https://doi.org/10.2307/2334381>
- García, C. Y., Hernández, A., Garay, A., Ortega, M. E., Castañeda, C., Bárcena, R., Zaragoza, J. L., & Osorio, G. (2017). Análisis del crecimiento de tres líneas de cebada para producción de forraje, en el valle de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO*, 49(2), 79–92.
- Haas, M., Schreiber, M., & Mascher, M. (2019). Domestication and crop evolution of wheat and barley: Genes, genomics, and future directions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 61(3), 204–225. <https://doi.org/10.1111/jipb.12737>
- Hernandez, J., Meints, B., & Hayes, P. (2020). Introgression breeding in barley: Perspectives and case studies. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 761. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00761>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Clasificaciones climáticas Colombia*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/climas+%5BModo+de+compatibilidad%5D.pdf/d8c85704-a07a-4290-ba65-f2042ce99ff9>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2020). *Resolución No. 067516 del 11 de mayo de 2020: “Por medio de la cual se establecen los requisitos para la inscripción de los cultivares en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales y se dictan otras disposiciones”*. <https://www.ica.gov.co/getattachment/6b7dbbd1-ff9b-4eea-a936-fe57f421ea98/2020R67516.aspx>
- Laidig, F., Piepho, H. P., Rentel, D., Drobek, T., & Meyer, U. (2017). Breeding progress, genotypic and environmental variation and correlation of quality traits in malting barley in German official variety trials between 1983 and 2015. *Theoretical and Applied Genetics*, 130, 2411–2429. <https://doi.org/10.1007/s00122-017-2967-4>
- Llacsá, J., Gamarra, J. A., Gómez, C. A., Martínez, A., Gómez, L. R., & Viera, M. A. (2020). Evaluación de genotipos promisorios de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en los Andes centrales de Perú. *Revista de Investigación Veterinaria del Perú*, 31(2), Artículo e17856. <https://doi.org/10.15381/rivep.v31i2.17856>
- Martins, J., & Juliatti, F. (2012). Adaptability and stability advances lines of semi early cycle for rust resistance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 12(1), 43–51. <https://doi.org/10.1590/S1984-70332012000100006>
- Mohammadi, R., Roostaei, M., Ansari, Y., Aghae, M., & Amri, A. (2010). Relationships of phenotypic stability measures for genotypes of three cereal crops. *Canadian Journal of Plant Science*, 90, 819–830. <https://doi.org/10.4141/CJPS09102>
- Molero, G., Joynson, R., Pinera-Chavez, F. J., Gardiner, L. J., Rivera-Amado, C., Hall, A., & Reynolds, M. P. (2019). Elucidating the genetic basis of biomass accumulation and radiation use efficiency in spring wheat and its role in yield potential. *Plant Biotechnology Journal*, 17, 1276–1288. <https://doi.org/10.1111/pbi.13052>
- Parlevliet, J. E., & Zadoks, J. C. (1977). The integrated concept of disease resistance: A new view including horizontal and vertical resistance in plants. *Euphytica*, 26, 5–21. <https://doi.org/10.1007/BF00032062>
- Pecio, A., & Wach, D. (2015). Grain yield and yield components of spring barley genotypes as the indicators of their tolerance to temporal drought stress. *Polish Journal of Agronomy*, 21, 19–27.
- Peterson, R.F., Campbell, A. B., & Hannah, A. E. (1948). A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canadian Journal of Research*, 26, 496–500. <https://doi.org/10.1139/cjr48c-033>
- Ramos, A. (2017). Identificación de suelos del orden Inceptisol. *Revista Logos Ciencia y Tecnología*, 8(2), 170–181. <http://doi.org/10.22335/rict.v8i2.304>

- Riggs, T. J., Start, N. D., & Armstrong, K. W. (1980). Genotype × environment interaction amongst spring barley lines grown at sites in the northern and southern hemispheres. *Euphytica*, 29, 357–368. <https://doi.org/10.1007/BF00025134>
- Rodrigues, O., Minella, E., & Costenaro, E. (2020). Genetic improvement of barley (*Hordeum vulgare*, L.) in Brazil: Yield increase and associated Traits. *Agricultural Sciences*, 11, 425–438. <https://doi.org/10.4236/as.2020.114025>
- Sanchez-Bragado, R., Vicente, R., Molero, G., Serret, M. D., Maydup, M. L., & Araus, J. L. (2020). New avenues for increasing yield and stability in C3 cereals: exploring ear photosynthesis. *Current opinión in Plant Biology*, 56, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.202.01.001>
- Sato, K. (2020). History and future perspectives of barley genomics. *DNA Research*, 27(4), Article 23. <https://doi.org/10.1093/dnares/dsaa023>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Statistical Analysis Systems Institute. (2016). *The SAS system for Windows* (Release 9.4.). SAS Institute Inc.
- Stubbs, R. W. (1977). Observations on horizontal resistance to yellow rust (*Puccinia striiformis* f.sp. *tritici*). *Cereal Rusts Bulletins*, 5, 27-32.
- Vanegas, H., Sierra, H., Duarte, C., Vargas, H., & Mantilla, H. (2018). Coyuntura cerealista y de leguminosas. *El cerealista*, 126(59), 43–47.
- Velasco-Laiton, Y., Sana-Pulido, W., & Morillo-Coronado, A. (2020). Caracterización agromorfológica de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en el Municipio de Chivata Boyacá, Colombia. *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 18(2), 103–117. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(18\)103-116](https://doi.org/10.18684/BSAA(18)103-116)
- Verma, A, Singh, J., Kumar, V., Kharab, A. S., & Singh, G. P. (2017). Rank based stability measures to select stable and adapted dual purpose barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 5(4), 456–462. [https://doi.org/10.18006/2017.5\(4\).456.462](https://doi.org/10.18006/2017.5(4).456.462)
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzani, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>