

Variability of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, resistance and agronomic behavior of two-row barley germplasm

Variabilidad de *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, resistencia y comportamiento agronómico de germoplasma de cebada de dos hileras

María Florencia Rodríguez-García, Miguel González-González*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Carretera Los Reyes-Texcoco Km 13.5 Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, CP 56250, México. **Andrés Mandujano-Bueno**, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío, Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5, Celaya, Guanajuato, CP 38110, México.

*Corresponding author: gonzalez.miguel@inifap.gob.mx.

Received: August 03, 2022.

Accepted: December 14, 2022.

Rodríguez-García MF, González-González M and Mandujano-Bueno A. 2023. Variability of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, resistance and agronomic behavior of two-row barley germplasm. Mexican Journal of Phytopathology 41(1).

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2208-1>

First DOI publication: December 25, 2022.

Primera publicación DOI: 25 de December, 2022.

Abstract. Barley crop production in Mexico in recent years has been affected by rust, of which yellow rust (YR) has regained its importance. This investigation aimed to identify the variability of YR and to evaluate the resistance level of seedlings and adult plants, the agronomic behavior of 15 advanced lines, and one control variety of two-row barley. During the 2021 spring-summer season, YR samples were collected from locations in the Highland Valleys of Central Mexico. Establishment

Resumen. La producción del cultivo de cebada en México en los últimos años ha sido afectada por las royas, de las cuales, la roya amarilla (RA) ha recobrado importancia. El objetivo de la investigación fue identificar la variabilidad de la RA y evaluar el nivel de resistencia en plántula y planta adulta, además del comportamiento agronómico de 15 líneas avanzadas y una variedad testigo de cebada de dos hileras. Durante el ciclo primavera-verano 2021 se colectaron muestras de RA de localidades de los Valles Altos del Centro de México y se estableció, en tres localidades un ensayo en campo para evaluar el comportamiento agronómico y resistencia en planta adulta; en invernadero se evaluó la resistencia en plántula. Se identificaron nueve aislamientos de RA, de los cuales el más frecuente fue CMEX/21.9 (27%). 12 líneas expresaron resistencia en plántula y planta adulta. Alexia “s” es la línea candidata con inmunidad a roya amarilla. Los resultados de la resistencia (campo e invernadero) y comportamiento agronómico permitió identificar

of a field test in three locations allowed estimation of the agronomic behavior and resistance in adult plants; while evaluation of seedlings resistance was in a greenhouse. Nine YR isolations were identified, of which the most frequent (27%) was CMEX/21.9. Twelve lines expressed resistance in seedlings and adult plants. Alexia “s” is the candidate line with immunity to yellow rust. The results of resistance (field and greenhouse) and agronomic behavior allowed germplasm identification with outstanding characteristics. The release of varieties with genetic resistance to diseases contributes to the reduction of environmental deterioration.

Key words: virulence, races, isolates.

Barley (*Hordeum vulgare*) is a cereal whose production is used for animal and human consumption. In Mexico it is cultivated mainly as raw material for the brewing industry using awned varieties with six and two-grain rows on the ear. The SIAP (2022) reported in 2021 that the planted area in the country was 345.4 thousand hectares, of which 21% were under irrigation conditions during the autumn-winter cycle and 79% under rainfed conditions in the spring-summer cycle.

In Mexico, barley production has been an alternative for producers in the Highland Valleys of Central Mexico. According to González *et al.* (2021), in recent years the malting-brewing industry demand has increased in requirement of two-row varieties, with yield potential, quality and disease tolerance.

Among the main diseases of economic importance worldwide are those of fungal origin, where those caused by the genus *Puccinia* stand out (Dean *et al.*, 2012). Hamwieh *et al.* (2018) indicate that the most important limiting factors in barley-producing areas are yellow rust caused by *Puccinia*

germplasma con características sobresalientes. La liberación de variedades con resistencia genética a enfermedades contribuye en la disminución del deterioro del medio ambiente.

Palabras clave: virulencia, razas, aislamientos.

La cebada (*Hordeum vulgare*) es un cereal cuya producción es aprovechada para consumo animal y humano. En México se cultiva principalmente como materia prima para la industria cervecera utilizándose variedades aristadas de seis y dos hileras de grano en la espiga. El SIAP (2022) reportó que en 2021 la superficie sembrada en el país fue de 345.4 mil hectáreas de las cuales el 21% fue establecida bajo condiciones de riego durante el ciclo otoño-invierno y el 79% bajo condiciones de temporal en el ciclo primavera-verano.

En México, la producción de cebada ha sido una alternativa para los productores de la región de los Valles Altos de la Mesa Central de México. De acuerdo con González *et al.* (2021), en los últimos años se ha incrementado la demanda de la industria maltera-cervecera en el requerimiento de variedades de dos hileras, con potencial de rendimiento, calidad y tolerancia a enfermedades.

Dentro de las principales enfermedades de importancia económica a nivel mundial se encuentran las de origen fungoso, donde destacan las causadas por el género *Puccinia* (Dean *et al.*, 2012). Hamwieh *et al.* (2018) indican que los factores limitantes más importantes de áreas productoras de cebada son la roya amarilla causada por *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, la roya de la hoja (*P. hordei*) y la roya del tallo (*P. graminis*). La roya amarilla de la cebada es una enfermedad de importancia económica en zonas productoras de todo el mundo. Se han reportado grandes epidemias a nivel mundial. González *et al.* (2021) mencionan que en 1988

striiformis f. sp. *hordei*, leaf rust (*P. hordei*) and stem rust (*P. graminis*). Yellow rust of barley is a disease of economic importance in producing areas throughout the world. Large epidemics have been reported worldwide. Gonzalez *et al.* (2021) mention that in 1988 yellow rust caused losses of up to 50% of the yield of all the improved Mexican barley varieties sown in rainfed conditions in the Highland Valleys of Central Mexico. Smaller losses were determined in the El Bajío crops under irrigated conditions. Rodriguez *et al.* (2021) report losses in grain yield up to 53% due to yellow rust effect. In the last production cycles in Mexico, yellow rust has regained importance (Rodríguez *et al.*, 2021), partly due to climate change, the lack of resistance in the currently planted varieties and pathogen virulence change. Rodriguez *et al.* (2010) indicated that rusts in cereals could overcome the specific resistance of resistant varieties by evolving towards new pathogen biotypes or physiological races with new virulence genes, in addition, the pathogens reproduce rapidly and can move long distances.

Physiological races of economically important yellow rust have been identified in barley, such was the case of race 24 identified in Colombia in 1975 as mentioned by Dubin and Stubbs (1986) and which later spread over South America. In Mexico it appeared in 1988 and later this same race was reported in Texas in 1991 as indicated by Roelfs *et al.* (1992). Marshall and Sutton (1995) report for the United States the dominance of race 24 and the existence of race 23, later Chen (2007) reports the presence of 22 new physiological races identified since 2000 in the United States. Prashar *et al.* (2014) report for India five pathotypes of *P. striiformis* f. sp. *hordei* identified during the years 2004-2005 to 2010-2011. In Iran, Safavi *et al.* (2017) identified the presence of 10 new physiological races during 2012-2013 and indicated that it was the first report

la roya amarilla causó pérdidas de hasta 50% del rendimiento de todas las variedades de cebada mejoradas mexicanas que se sembraban en temporal en los Valles Altos Centrales del país. Pérdidas de menor cuantía se determinaron en las siembras de El Bajío en condiciones de riego. Rodríguez *et al.* (2021) reportan pérdidas en rendimiento de grano hasta de un 53% por efecto de la roya amarilla. En los últimos ciclos de producción en México, la roya amarilla ha recobrado su importancia (Rodríguez *et al.*, 2021), esto debido en parte al cambio climático, a la falta de resistencia en las variedades sembradas actualmente y al cambio de virulencia del patógeno. Rodríguez *et al.* (2010) indicaron que las royas en cereales pueden vencer la resistencia específica de variedades resistentes por la evolución hacia nuevos biotipos del patógeno o razas fisiológicas con nuevos genes de virulencia, aunado a esto los patógenos se reproducen rápidamente y pueden moverse a grandes distancias.

En cebada se han identificado razas fisiológicas de roya amarilla de importancia económica, tal fue el caso de la raza 24 identificada en Colombia en 1975 como lo mencionan Dubin y Stubbs (1986) y que posteriormente se extendió a gran parte de Sudamérica. En México se presentó en 1988 y posteriormente esta misma raza se reportó en Texas en 1991 como lo indican Roelfs *et al.* (1992). Marshall y Sutton (1995) reportan para Estados Unidos la dominancia de la raza 24 y la existencia de la raza 23, posteriormente Chen (2007) reporta la presencia de 22 nuevas razas fisiológicas identificadas desde el 2000 en Estados Unidos. Prashar *et al.* (2014) reportan para la India cinco patotipos de *P. striiformis* f. sp. *hordei* identificados durante los años 2004-2005 al 2010-2011. En Irán, Safavi *et al.* (2017) identificaron la presencia de 10 nuevas razas fisiológicas durante 2012-2013 e indicaron que fue el primer reporte de razas fisiológicas de *P. striiformis* f. sp. *hordei* en ese país.

of physiological races of *P. striiformis* f. sp. *hordei* in that country.

Rodríguez *et al.* (2019), Brown *et al.* (2001) and Gangwar *et al.* (2018) indicate that the best strategy to battle rusts in cereals worldwide is genetic control, based on the use of varieties with resistance to the various physiological races of rusts that exist in the producing regions. Sandoval *et al.* (1999; 2007), Niks (2014), and Gangwar *et al.* (2018) mention that two types of resistance have been identified in barley pathosystem; seedling resistance, which is correlated in the adult plant, and partial resistance, which is characterized by presenting susceptible seedlings, but low percentages of damaged leaf area in the adult plant. Chen and Line (2002) report 27 resistance genes for barley yellow rust.

Currently in Mexico the sowing of barley with two grain rows in the ear has increased, largely displacing the sowing of six-row genotypes, for which the objective of the present work was to identify the pathogenic variability of *P. striiformis* f. sp. *hordei* and identify genotypes of two rows with resistance to yellow rust and good agronomic behavior.

MATERIALS AND METHODS

Isolate identification. 45 samples of leaves with yellow rust urediniospores were collected during the spring-summer/2021 cycle from the towns of Terrenate, Nanacamilpa and Tlaxco, Tlaxcala; Apan, Hidalgo; Chapingo and Santa Lucia, Texcoco and Toluca, State of Mexico, included within the rainfed barley producing areas of the Highland Valleys of Central Mexico. The samples were transferred, for their evaluation and conservation, to National Laboratory for Rust and other Cereal Diseases (Laboratorio Nacional de Royas y Otras Enfermedades de

Rodríguez *et al.* (2019), Brown *et al.* (2001) y Gangwar *et al.* (2018) indican que la estrategia que mejor combate las royas en cereales en todo el mundo es el control genético, basado en la utilización de variedades con resistencia a las diversas razas fisiológicas de royas que existen en las regiones productoras. Sandoval *et al.* (1999; 2007), Niks (2014) y Gangwar *et al.* (2018) mencionan que en el patosistema cebada se han identificado dos tipos de resistencia; la resistencia en plántula, la cual esta correlacionada en planta adulta y la resistencia parcial, la cual se caracteriza por presentar plántulas susceptibles, pero porcentajes bajos de área foliar dañada en planta adulta. Chen y Line (2002) reportan 27 genes de resistencia para roya amarilla de la cebada.

En México, actualmente la siembra de cebada de dos hileras de grano en la espiga se ha incrementado desplazando en gran medida la siembra de genotipos de seis hileras, por lo cual el objetivo de la presente investigación fue identificar la variabilidad patogénica de *P. striiformis* f. sp. *hordei* e identificar genotipos de dos hileras con resistencia a roya amarilla y buen comportamiento agronómico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Identificación de aislamientos. Se recolectaron 45 muestras de hojas con urediniosporas de roya amarilla durante el ciclo P-V/2021 de las localidades de Terrenate, Nanacamilpa y Tlaxco, Tlaxcala; Apan, Hidalgo; Chapingo y Santa Lucia, Texcoco y Toluca, Estado de México, incluidas dentro de las zonas productoras de cebada de temporal de los Valles Altos del Centro de México. Las muestras se trasladaron, para su evaluación y conservación, al Laboratorio Nacional de Royas y Otras Enfermedades de Cereales (LANAREC) ubicado en El Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX),

Cereales- LANAREC) located in Valley Mexico Experimental Field (Campo Experimental Valle de Mexico-CEVAMEX), belonging to National Forestry, Agriculture and Husbandry Institute (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias - INIFAP). The samples with yellow rust urediniospores were increased for the Apizaco variety because it was considered from susceptible to moderately susceptible to yellow rust. To do this, in polystyrene cups containing a mixture of sterile soil and Peat Moss, 60:40, 12 seeds per cup were sown. Five days after sowing, all the seedlings were treated with maleic acid (MH30®) to regulate their growth. Each sample was inoculated in a glass with eight-day-old Apizaco seedlings, suspending the urediniospores in mineral oil (Sotrol® 170; Chevron Phillips Chemical Company, The Woodlands, Texas, United States), and spraying on the leaf blades with an atomizer connected to an electric compressor. The inoculated seedlings were allowed to dry for a period of 20 min, then they were transferred to a bioclimatic chamber with temperatures of 4 °C and 100% dew for 24 hours. After that period, the inoculated seedlings were transferred to a greenhouse whose temperature fluctuated between 18-20 °C. Each glass containing the seedlings was placed in individual plastic cages. Fifteen days after inoculation, isolated urediniospores were collected from each isolate, using special collectors connected to an electric compressor and storing in gelatin capsules. To obtain sufficient and pure inoculum, the collected urediniospores were increased again for the Apizaco variety, following the procedure described above.

For isolates identification, a group of 16 barley genotypes listed in Table 1 were used, which were planted, per group, in 20 × 30 × 6 cm plastic trays containing a mixture of sterile soil and Peat moss, 60:40. During planting, small holes were marked

perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Las muestras con urediniosporas de roya amarilla fueron incrementadas en la variedad Apizaco por considerarse susceptible a moderadamente susceptible a roya amarilla. Para ello, en vasos de unicel conteniendo una mezcla de tierra estéril y Peat Moss en una proporción 60:40, fueron sembradas 12 semillas por vaso. Cinco días después de la siembra todas las plántulas fueron tratadas con ácido maleico (MH30®) para regular su crecimiento. Cada muestra fue inoculada en un vaso con plántulas de Apizaco de ocho días de edad, suspendiendo las urediniosporas en aceite mineral (Sotrol® 170; Chevron Phillips Chemical Company, The Woodlands, Texas, Estados Unidos), y asperjando sobre la lámina de las hojas, con un atomizador conectado a un compresor eléctrico. Las plántulas inoculadas se dejaron secar por un período de 20 min posteriormente se pasaron a una cámara bioclimática con temperaturas de 4 °C y rocío al 100% durante 24 horas. Después de ese período las plántulas inoculadas se trasladaron a un invernadero cuya temperatura fluctuó entre 18-20 °C. Cada vaso conteniendo las plántulas se colocaron en jaulas de plástico individuales. A los 15 días después de la inoculación se colectaron de cada aislamiento urediniosporas aisladas, usando colectores especiales conectados a un compresor eléctrico y almacenándolas en cápsulas de gelatina. Con la finalidad de obtener inoculo suficiente y puro, las urediniosporas colectadas se incrementaron nuevamente en la variedad Apizaco, siguiendo el procedimiento antes descrito.

Para la identificación de los aislamientos se utilizaron un grupo de 16 genotipos de cebada enlistados en el Cuadro 1, los cuales fueron sembrados, por grupo, en charolas de plástico de 20 × 30 × 6 cm conteniendo una mezcla de tierra estéril y Peat moss en una proporción 60:40. Durante la siembra se

Table 1. Genotypes used to identify isolates of *P. striiformis* f. sp. *hordei* in laboratory.

Cuadro 1. Genotipos utilizados para identificar los aislamientos de *P. striiformis* f. sp. *hordei* en laboratorio.

No.	Genotipo o variedad	No.	Genotipo o variedad
1	Heils Franken	9	Armida
2	Apizaco	10	Doña Josefa
3	Puebla	11	ABI Growler
4	Kaputar	12	ABI Voyager
5	Esmeralda	13	AC Metcalfe
6	Guanajuato	14	Maravilla
7	Esperanza	15	Brennus
8	Alina	16	Meztli

in the substrate of each tray and 8 to 9 seeds were placed per genotype, originating the same number of seedlings; subsequently, 15 days after sowing, the group of genotypes were inoculated individually with each of the isolates (45) previously increased and following the methodology described above for the purification and increase of the inoculum. 15 days after inoculation, the reaction of the genotypes was recorded using the 0-9 scale described by Roelfs *et al.* (1992). For isolation designation, the abbreviation MEXC was used, which indicates that it is an isolation identified in Mexico in the barley crop, followed by the year and number of the registered isolation.

Evaluation of genotypes in seedling. At LANAREC, under greenhouse conditions (T min. 18 °C - T max. 20 °C), the seedling resistance of 15 advanced two-row barley lines from the Barley Genetic Breeding Program of INIFAP was evaluated. CEVAMEX and a control variety (Meztli). The 16 genotypes were sown in plastic trays, small holes were marked and 8 to 9 seeds per genotype were placed, 13 days after sowing the seedlings were inoculated with a suspension of urediniospores of the isolates MEXC/21.5 and MEXC/21.9, at a concentration of 1×10^6

marcaron pequeños orificios en el sustrato de cada charola y se colocaron de 8 a 9 semillas por genotipo, originando igual número de plántulas; posteriormente, a los 15 días después de la siembra, el grupo de genotipos se inocularon individualmente con cada uno de los aislamientos (45) previamente incrementados y siguiendo la metodología descrita anteriormente para la purificación e incremento del inóculo. A los 15 días después de la inoculación se registró la reacción de los genotipos utilizando la escala del 0-9 descrita por Roelfs *et al.* (1992). Para la designación del aislamiento se utilizó la abreviatura MEXC que indica que es un aislamiento identificado en México en el cultivo de cebada, seguido del año y número de aislamiento registrado.

Evaluación de genotipos en plántula. En el LANAREC, bajo condiciones de invernadero (T min. 18 °C - T máx. 20 °C) se evaluó la resistencia en plántula de 15 líneas avanzadas de cebadas de dos hileras, provenientes del Programa de Mejoramiento Genético de Cebada del INIFAP-CEVAMEX y una variedad testigo (Meztli). Se sembraron los 16 genotipos en charolas de plástico, se marcaron pequeños orificios y se colocaron de 8 a 9 semillas por genotipo, posteriormente a los 13 días después de la siembra las plántulas se inocularon con una

urediniospores/mL⁻¹. The MEXC/21.5 isolate was identified as the one with the lowest virulence spectrum, while MEXC/21.9 was one of the most virulent and frequent. The urediniospores were suspended in mineral oil (Soltrol® 170) and sprayed with an atomizer connected to a compressor. The inoculated seedlings were placed in a bioclimatic chamber with temperatures of 4-7 °C for 24 hours and dew at 100%. Subsequently, they were transferred to the greenhouse and 15 days after inoculation, the response to yellow rust was recorded on the 0-9 scale proposed by Roelfs *et al.* (1992), where the values of 0, 1, 2, 3, 4, 5 and 6 are considered as a resistance reaction and 7, 8 and 9 as a susceptibility reaction.

Evaluation of genotypes in the field. The field evaluation was carried out during the spring-summer cycle of 2021 in three representative localities of the rainfed barley producing area of the Highland Valleys of Central Mexico: 1) Terrenate, Tlaxcala, located at 19° 26' 55.9" LN and 97° 56' 23.3" LW and at an altitude of 2,530 masl; 2) Nanacamilpa, Tlaxcala, at 19° 30' 8.3" LN, 98° 31' 9.6" LW and an altitude of 2,701 masl, 3) Chapingo, Texcoco, State of México, at 19° 29' 14.8" LN, 98° 53' 49.3" LW at 2,252 masl. The experimental design used was complete randomized blocks with 16 treatments (genotypes) and four repetitions, giving a total of 64 experimental units or plots for each location. The experimental unit consisted of four furrows three meters long and spaced at 30 cm, corresponding to a surface of 3.6 m², considered a useful plot. Fifteen advanced lines were evaluated (three of them in the process of being described for their official registration with the National Seed Inspection and Certification Service - SNICS) and the Meztli variety, recently introduced to Mexico. All germplasm was from two rows. The incidence of yellow rust occurred naturally from the growth

suspension of urediniosporas de los aislamientos MEXC/21.5 y MEXC/21.9, a una concentración de 1 x 10⁶ urediniosporas mL⁻¹. El aislamiento MEXC/21.5 se identificó como el de menor espectro de virulencia; mientras que MEXC/21.9 fue de los más virulentos y el de mayor frecuencia. Las urediniosporas fueron suspendidas en aceite mineral (Soltrol® 170) y asperjadas con un atomizador conectado a un compresor. Las plántulas inoculadas se colocaron en una cámara bioclimática con temperaturas de 4-7 °C por 24 horas y roció al 100%. Posteriormente se trasladaron al invernadero y después de 15 días de la inoculación se registró la respuesta a la roya amarilla en la escala del 0-9 propuesta por Roelfs *et al.* (1992), donde los valores de 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 se consideran como reacción de resistencia y 7, 8 y 9 reacción de susceptibilidad.

Evaluación de genotipos en campo. La evaluación en campo se realizó durante el ciclo primavera-verano del 2021 en tres localidades representativas de la zona productora de cebada de temporal de los Valles Altos de la Mesa Central de México: 1) Terrenate, Tlaxcala, ubicada a 19° 26' 55.9" de LN y 97° 56' 23.3" de LO y una altitud de 2 530 msnm; 2) Nanacamilpa, Tlaxcala, a 19° 30' 8.3" LN, 98° 31' 9.6" LO y una altura de 2 701 msnm, 3) Chapingo, Texcoco, Estado de México, a 19° 29' 14.8" LN, 98° 53' 49.3" LO a 2 252 msnm. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con 16 tratamientos (genotipos) y cuatro repeticiones, dando un total de 64 unidades experimentales o parcelas por cada localidad. La unidad experimental fue de cuatro surcos de tres metros de largo y espaciados a 30 cm, que corresponde a una superficie de 3.6 m², considerada como parcela útil. Se evaluaron 15 líneas avanzadas (tres de ellas en proceso de descripción para su registro oficial ante el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de

stage of booting (development stage 41-49; Zadoks *et al.*, 1974) since the three locations present favorable climatic conditions for the development of the disease, such as cold to warm temperatures (5 to 18 °C) and the formation of dew. The registered variables were: 1) Days to heading (DE), days elapsed from sowing to the moment in which 50% of the plants presented visible spikes; 2) Days to physiological maturity (DM), days elapsed from sowing to the moment the spike peduncle turned hay yellow; 3) Plant height (AP), height in centimeters from the soil surface to the tip of the terminal or higher spike; 4) Grain yield (REND), grain weight produced by all the spikes of each useful plot, registered in grams, which was subsequently transformed into kg ha⁻¹; 5) Test weight (PH), grain weight per unit volume (kg hL⁻¹); 6) Final disease severity (SFE), maximum level of damaged leaf area, registered as a percentage and using the scale suggested by Roelfs *et al.* (1992). With the severity readings taken in time intervals (three), the Area Under the Disease Progress Curve (AUDPC) was calculated using the equation described by Bjarko and Line (1988). The data of the variables obtained in the three locations were analyzed statistically in jointly with the SAS 9.3 program (SAS, 2016) and mean comparisons were made for the variables under study using the DMS test ($p \leq 0.01$).

RESULTS AND DISCUSSION

Virulence of *P. striiformis* f. sp. *hordei*

In the spring-summer 2021 cycle, nine isolates of *P. striiformis* f. sp. *hordei* were identified in seven locations in Tlaxcala, State of Mexico, and Hidalgo. These isolates are shown in Table 2, where MEXC/21.9, MEXC/21.16 and MEXC/21.23 were the most virulent, while MEXC/21.5 was the least virulent. All the isolates were avirulent in the Heils

Semillas - SNICS) y la variedad Meztli, de reciente introducción a México. Todo el germoplasma fue de dos hileras. La incidencia de la roya amarilla se presentó de forma natural a partir de la etapa de embuche (etapa de desarrollo 41-49; Zadoks *et al.*, 1974) ya que las tres localidades presentan condiciones climáticas favorables para el desarrollo de la enfermedad, como temperaturas de frías a templadas (5 a 18 °C) y la formación de rocío.

Se registraron las variables: 1) Días a espigamiento (DE), días transcurridos desde la siembra hasta el momento en que el 50% de las plantas presentaban espigas visibles; 2) Días a madurez fisiológica (DM), días transcurridos desde la siembra hasta el momento en que el pedúnculo de la espiga cambió a un color amarillo paja; 3) Altura de planta (AP), altura en centímetros desde la superficie del suelo hasta la punta de la espiguilla terminal de la espiga principal o superior; 4) Rendimiento de grano (REND), peso de grano producido por todas las espigas de cada parcela útil, registrado en gramos, la cual posteriormente se transformó en kg ha⁻¹; 5) Peso hectolítrico (PH), peso del grano por unidad de volumen (kg hL⁻¹); 6) Severidad final de la enfermedad (SFE), nivel máximo del área foliar dañada, registrada en porcentaje y utilizando la escala sugerida por Roelfs *et al.* (1992). Con las lecturas de severidad (tres) tomadas en intervalos de tiempo se calculó el Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) utilizando la ecuación descrita por Bjarko y Line (1988). Los datos de las variables obtenidas en las tres localidades fueron analizados estadísticamente de manera conjunta con el programa SAS 9.3 (SAS, 2016) y se realizaron comparaciones de medias para las variables en estudio mediante la prueba DMS ($p \leq 0.01$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Virulencia de *P. striiformis* f. sp. *hordei*. En el ciclo primavera-verano del 2021 se identificaron

Table 2. Isolates of *P. striiformis* f. sp. *hordei* identified in the spring-summer/2021 cycle.
Cuadro 2. Aislamientos de *P. striiformis* f. sp. *hordei* identificados en el ciclo P-V/2021.

No.	Aislamiento	Virulencia ^z	Avirulencia ^z	Frecuencia (%)
1	MEXC/21.5	2,11	1,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14,15,16	9
2	MEXC/21.7	2,3,4,11,12,13,16	1,5,6,7,8,9,10,14,15	13
3	MEXC/21.9	2,3,4,6,11,12,13,16	1,5,7,8,9,10,14,15	27
4	MEXC/21.10	2,4,11,12,13,16	1,3,5,6,7,8,9,10,14,15	11
5	MEXC/21.11	2,3,4,6,11,12,13	1,5,7,8,9,10,14,15,16	7
6	MEXC/21.16	2,3,4,5,6,11,12,13,16	1,7,8,9,10,14,15	7
7	MEXC/21.18	3,4,6,11,12,13,16	1,2,5,7,8,9,10,14,15	4
8	MEXC/21.23	3,4,5,6,11,12,13,16	1,2,7,8,9,10,14,15	11
9	MEXC/21.35	4,11,12,13,16	1,2,3,5,6,7,8,9,10,14,15	11

^z The number refers to the barley genotypes indicated in Table 1. / ^zEl número hace referencia a los genotipos de cebada indicados en el Cuadro 1.

Franken, Esperanza, Alina, Armida, Doña Josefa, Maravilla and Brennus genotypes, and virulent to ABI Growler.

Table 3 shows the isolates identified by locality and state, where it is observed that the greatest diversity (four isolates) was identified in Terrenate, Tlax. In this locality, the MEXC/21.9 isolate was also identified with greater frequency, 27%, and it was also identified in Nanacamilpa, Tlax. On the other hand, the isolate MEXC/21.18 was identified in Tlaxco, Tlax. and Apan, Hgo. It is worth mentioning that these locations are within the most important barley production areas in the states of Hidalgo and Tlaxcala.

nueve aislamientos de *P. striiformis* f. sp. *hordei* en siete localidades de Tlaxcala, Estado de México e Hidalgo. Dichos aislamientos se muestran en el Cuadro 2, donde se observa que el MEXC/21.9, MEXC/21.16 y MEXC/21.23 fueron los de mayor virulencia, mientras que el MEXC/21.5 fue el menos virulento. Todos los aislamientos fueron avirulentos en los genotipos Heils Franken, Esperanza, Alina, Armida, Doña Josefa, Maravilla y Brennus; y virulentos a ABI Growler.

En el Cuadro 3 se presentan los aislamientos identificados por localidad y estado, donde se observa que la mayor diversidad (cuatro aislamientos) se identificó en Terrenate, Tlax. En esta localidad

Table 3. Isolates of *P. striiformis* f. sp. *hordei* identified in seven locations in Valles Altos during the spring-summer/2021 cycle.**Cuadro 3. Aislamientos de *P. striiformis* f. sp. *hordei* identificados en siete localidades de Valles Altos durante el ciclo P-V/2021.**

Estado	Localidad	Aislamiento
Tlaxcala	Terrenate	MEXC/21.7, MEXC/21.9 MEXC/21.10, MEXC/21.35
	Nanacamilpa	MEXC/21.9
	Tlaxco	MEXC/21.18, MEXC/21.9
Estado de México	Chapingo	MEXC/21.5, MEXC/21.16
	Santa Lucia	MEXC/21.23
	Toluca	MEXC/21.11
Hidalgo	Apan	MEXC/21.16, MEXC/21.18

Barley yellow rust (Figure 1) did not exist in Mexico until 1986 and according to Calhoun *et al.* (1988) and Sandoval *et al.* (1999), during the summer of 1987, this disease was detected in the Highland Valleys of Central Mexico, by 1988 it caused yield losses of up to 50% as indicated by González *et al.* (2021). This epidemic was attributed mainly to race 24, which was characterized by its virulence for the Heils Franken genotype as indicated by Stubbs (1985) and Line (2002) and which possesses the resistance genes *Rps4* and *RpsHF*. None of the nine isolates identified showed virulence for Heils Franken; however, they share some similarity with race 23 previously identified by Stubbs (1985) and later reported by Marshall and Sutton (1995), this race is avirulent to Heils Franken. The virulence/avirulence results observed in Heils Franken suggest that the isolates identified in this study could be derived from race 23 and not from race 24.

The Esperanza, Alina, Armida and Maravilla barley varieties were resistant to all the isolates identified. Esmeralda was only susceptible to the isolates MEXC/21.16 and MEXC/21.23. This variety has been moderately resistant to yellow rust since its release and was described by Zamora *et al.* (1997) as the first variety developed in Mexico for rainfed conditions that has tolerance to yellow rust and that, until 2015, occupied 80% of the sown area of rainfed barley. However, González *et al.* (2021) indicate that INIFAP has obtained great achievements in varieties release, the most important being Esperanza and Esmeralda, which due to their resistance to stripe or yellow rust, allowed the production of barley for brewing both under irrigation and rainfed conditions; achieving national self-sufficiency in the year 2000.

Response in seedling and adult plant. Under controlled laboratory and greenhouse conditions,

también se identificó el aislamiento MEXC/21.9 con mayor frecuencia, 27%, y asimismo se identificó en Nanacamilpa, Tlax. Por otra parte, el aislamiento MEXC/21.18 se identificó en Tlaxco, Tlax. y Apan, Hgo. Cabe mencionar que estas localidades se encuentran dentro de las zonas de mayor importancia en producción de cebada de los estados de Hidalgo y Tlaxcala.

La roya amarilla de la cebada (Figura 1) no existía en México hasta antes de 1986 y de acuerdo con Calhoun *et al.* (1988) y Sandoval *et al.* (1999), durante el verano de 1987, esta enfermedad se detectó en los Valles Altos de la Mesa Central de México, para 1988 causó pérdidas de rendimiento hasta del 50% como lo indicaron González *et al.* (2021). Dicha epidemia fue adjudicada principalmente a la raza 24 que se caracterizó por su virulencia para el genotipo Heils Franken como lo indicaron Stubbs (1985) y Line (2002) y que posee los genes de resistencia *Rps4* y *RpsHF*. Ninguno de los nueve aislamientos identificados mostró virulencia para Heils Franken; sin embargo, comparten cierta similitud con la raza 23 previamente identificada por Stubbs (1985) y posteriormente reportada por Marshall y Sutton (1995), dicha raza es avirulenta a Heils Franken. Los resultados de virulencia/avirulencia observados en Heils Franken sugieren que los aislamientos identificados en este estudio podrían derivarse de la raza 23 y no de la raza 24.

Las variedades de cebada Esperanza, Alina, Armida y Maravilla fueron resistentes a todos los aislamientos identificados. Esmeralda solo fue susceptible a los aislamientos MEXC/21.16 y MEXC/21.23. Dicha variedad ha sido moderadamente resistente a roya amarilla desde su liberación, y fue descrita por Zamora *et al.* (1997) como la primera variedad desarrollada en México para condiciones de temporal que tiene tolerancia a la roya amarilla y que hasta el 2015 ocupaba el 80% de la superficie sembrada de cebada de temporal.



Figure 1. Symptoms of *P. striiformis* f. sp. *hordei* in seedling and adult plant in barley genotypes. A. Adult plants with susceptibility reaction; B. Adult plants with resistance reaction; C. Uredia in leaf of adult plant; D. Uredia and telia in grains and awns; E. Telias in sheath; F. Susceptibility response in the seedling stage; G. Uredias on seedling leaf.

Figura 1. Síntomas de *P. striiformis* f. sp. *hordei* en plántula y planta adulta en genotipos de cebada. A. Plantas adultas con reacción de susceptibilidad; B. Plantas adultas con reacción de resistencia; C. Uredias en hoja de planta adulta; D. Uredias y telias en granos y aristas; E. Telias en vaina; F. Respuesta de susceptibilidad en estado de plántula; G. Uredias en hoja de plántula.

the response was evaluated in seedlings of 15 lines and a two-row barley control variety. Table 4 shows the seedling response to two isolates, MEXC/21.9 with its virulence/avirulence formula: Apizaco, Puebla, Kaputar, Guanajuato, ABI Growler, ABI Voyager, AC Metcalfe, Meztli/Heils Franken, Esmeralda, Esperanza, Alina, Armida, Doña Josefa, Maravilla, Brennus; and MEXC/21.5: Apizaco, ABI Growler/Heils Franken, Puebla, Kaputar, Esmeralda, Guanajuato, Esperanza, Alina, Armida, Doña Josefa, ABI Voyager, AC Metcalfe, Maravilla, Brennus, Meztli. Lines L-3, L-4, L-5 and the Meztli variety were susceptible to the two isolates evaluated, and L-10 was only susceptible to the MEXC/21.5 isolate. In 80% of the lines evaluated, a resistance response was observed with readings of 0 to 6 of infection according to the scale of Roelfs *et al.* (1992).

Regarding resistance in adult plants, Table 4 indicates the percentage of final severity observed in the towns of Terrenate and Nanacamilpa,

No obstante González *et al.* (2021) indican que el INIFAP ha obtenido grandes logros en la liberación de variedades, siendo las más importantes Esperanza y Esmeralda que por su resistencia a roya lineal o amarilla, permitieron la producción de cebada para cervecería tanto en condiciones de riego como de temporal; logrando la autosuficiencia nacional en el año 2000.

Respuesta en plántula y planta adulta. Bajo condiciones controladas en laboratorio e invernadero, se evaluó la respuesta en plántula de 15 líneas y una variedad testigo de cebada de dos hileras. En el Cuadro 4 se presenta la respuesta en plántula a dos aislamientos, MEXC/21.9 con su fórmula de virulencia/avirulencia: Apizaco, Puebla, Kaputar, Guanajuato, ABI Growler, ABI Voyager, AC Metcalfe, Meztli/Heils Franken, Esmeralda, Esperanza, Alina, Armida, Doña Josefa, Maravilla, Brennus; y MEXC/21.5: Apizaco, ABI Growler/Heils Franken, Puebla, Kaputar, Esmeralda, Guanajuato,

Table 4. Response in seedling and adult plant to *P. striiformis* f. sp. *hordei* in 16 two-row barley genotypes.
Cuadro 4. Respuesta en plántula y planta adulta a *P. striiformis* f. sp. *hordei* en 16 genotipos de cebada de dos hileras.

Línea	Resistencia en plántula		Resistencia en planta adulta		
	MEXC/21.9	MEXC/21.5	Terrenate, Tlax.	Nanacamilpa, Tlax.	Chapingo, Edo. Mex
L-1	4	5	10MS ^z	10MS	5MR
L-2	5	6	1R	0R	0R
L-3	7	7	20MS	10MS	5MR
L-4	8	7	15MS	5MR	5MR
L-5	7	7	5MR	5MR	5MR
L-6	4	5	5MR	0MR	0MR
L-7	4	4	10MS	1R	0R
L-8	4	5	0R	1R	0R
L-9	3	5	0R	5MR	0R
L-10	4	8	0R	0R	0R
L-11	5	6	0R	0R	0R
L-12	4	4	5MR	1MR	0R
L-13 (Salome "s")	4	3	1R	0R	0R
L-14 (Frida "s")	4	4	0R	5MR	5MR
L-15 (Alexia "s")	4	4	0R	0R	0R
Meztli	7	7	15MS	10MS	5MS

^z R=Resistant; MR=Moderate Resistance; MS=Moderate Susceptibility.

Tlaxcala and Chapingo, Texcoco, State of Mexico. Most of the lines evaluated showed satisfactory levels of resistance in adult plants with readings of 0 to 10% infection. Lines 3 and 4 were moderately resistant to moderately susceptible, with readings of 15 to 20% infection. The control variety (Meztli) was moderately resistant to moderately susceptible (5 to 15% severity), it should be noted that it is a recently introduced variety for cultivation under the two planting conditions in Mexico (irrigated and rainfed) and it is likely that share a similarity with the germplasm introduced from other countries (USA and Canada) by the brewing consortia, for which its observed resistance levels are not satisfactory. In the candidate lines for release (Frida "s" and Alexia "s") good resistance was observed to *P. striiformis* f. sp. *hordei* in seedlings, as well as in adult plants in all evaluation locations.

Based on the resistance response to yellow rust observed in the evaluated genotypes, it can be inferred that monogenic resistance predominates over polygenic resistance in the barley program, since of the 15 lines evaluated, 10 were resistant in seedlings and adult plants; however, three lines were also identified (L-3, L-4 and L-5) that were susceptible in seedlings while in adult plants they were moderately resistant to moderately susceptible, which infers that they have polygenic type resistance. The results shown coincide with what was reported by Sandoval *et al.* (1999; 2007); Niks (2014); Gangwar *et al.* (2018) who indicate that in the barley-yellow rust pathosystem, two types of resistance have been identified; seedling resistance, which is correlated in the adult plant, and partial resistance, which is characterized by presenting susceptible seedlings, but low percentages of damaged leaf area in the adult plant.

Agronomic behavior. In barley as in other crops, agronomic variables are the main factors to consider when generating and releasing a variety,

Esperanza, Alina, Armida, Doña Josefa, ABI Voyager, AC Metcalfe, Maravilla, Brennus, Meztli. Las líneas L-3, L-4, L-5 y la variedad Meztli fueron susceptibles a los dos aislamientos evaluados, y la L-10 solamente fue susceptible al aislamiento MEXC/21.5. En el 80% de las líneas evaluadas se observó respuesta de resistencia con lecturas de 0 a 6 de infección según la escala de Roelfs *et al.* (1992).

En cuanto a resistencia en planta adulta en el Cuadro 4, se indican el porcentaje de severidad final observado en las localidades de Terrenate y Nancamilpa, Tlaxcala y Chapingo, Texcoco, Estado de México. La mayoría de las líneas evaluadas mostró niveles satisfactorios de resistencia en planta adulta con lecturas de 0 a 10% de infección. Las líneas 3 y 4 fueron moderadamente resistentes a moderadamente susceptibles, con lecturas del 15 a 20% de infección. La variedad testigo (Meztli) fue moderadamente resistente a moderadamente susceptible (5 a 15% de severidad), cabe indicar que es una variedad de reciente introducción para su cultivo en las dos condiciones de siembra en México (riego y temporal) y es probable que comparta similitud con el germoplasma introducido de otros países (EUA y Canadá) por los consorcios cerveceros por lo cual sus niveles de resistencia observados no son satisfactorios. En las líneas candidatas a liberación (Frida "s" y Alexia "s") se observó buena resistencia a *P. striiformis* f. sp. *hordei* en plántula, así como también en planta adulta en todas las localidades de evaluación.

Con base a la respuesta de resistencia a roya amarilla observada en los genotipos evaluados, se puede inferir que en el programada de cebada predomina la resistencia monogénica sobre la resistencia poligénica, ya que de las 15 líneas evaluadas, 10 fueron resistentes en plántula y planta adulta; no obstante, también se identificaron tres líneas (L-3, L-4 y L-5) que fueron susceptibles en plántula mientras que en planta adulta fueron de moderadamente

so evaluating the agronomic behavior in the field allows us to observe the potential of each genotype. Table 5 shows the comparison of means by location of the variables days to heading (DE), days to maturity (DM), plant height (AP), test weight (PH) and grain yield (REND) of the 15 lines and control variety. For DE, the town of Chapingo was where the genotypes expressed greater earliness. For DM, Nanacamilpa and Terrenate were statistically the same; in both locations, the crop cycle was longer, unlike Chapingo, where the average physiological maturity of the germplasm was 105 days. Similar results were reported by González *et al.* (2016), who indicate that the specific conditions of each environment determine the duration of the crop cycle. Regarding AP, in the town of Terrenate the largest plant sizes were observed and the smallest in Nanacamilpa (Table 5). For PH, the highest values for this variable were obtained in Chapingo (61.06 kg hL⁻¹), followed by Nanacamilpa (59.49 kg hL⁻¹). Only the town of Terrenate registered an average PH value lower than what is established in the standard for the commercialization of the products. According to González *et al.* (2013), the test weight (PH) is a quality factor related to the texture of the endosperm or the protein content

resistentes a moderadamente susceptibles, con lo que se infiere que poseen resistencia de tipo poligénica. Los resultados mostrados coinciden con lo reportado por Sandoval *et al.* (1999; 2007); Niks (2014); Gangwar *et al.* (2018) quienes indican que en el patosistema cebada-roya amarilla, se han identificado dos tipos de resistencia; la resistencia en plántula, la cual esta correlacionada en planta adulta y la resistencia parcial, la cual se caracteriza por presentar plántulas susceptibles, pero porcentajes bajos de área foliar dañada en planta adulta.

Comportamiento agronómico. En cebada como en otros cultivos, las variables agronómicas son los principales factores a considerar cuando se genera y libera una variedad, por lo que evaluar el comportamiento agronómico en campo permite observar el potencial de cada genotipo. En el Cuadro 5 se presenta la comparación de medias por localidad de las variables días a espigamiento (DE), días a madurez (DM), altura de planta (AP), peso hectolítico (PH) y rendimiento de grano (REND) de las 15 líneas y variedad testigo. Para DE la localidad de Chapingo fue en donde los genotipos expresaron mayor precocidad. Para DM en Nanacamilpa y Terrenate fueron estadísticamente iguales; en ambas

Table 5. Comparison of means of the agronomic behavior of 16 two-row barley genotypes in three locations in Tlaxcala and State of Mexico, during the Spring-Summer cycle, 2021.

Cuadro 5. Comparación de medias del comportamiento agronómico de 16 genotipos de cebada de dos hileras en tres localidades de Tlaxcala y Edo. De México, durante el ciclo Primavera-Verano, 2021.

Localidades	Días a espigamiento	Días a madurez fisiológica	Altura de planta	Peso hectolítico (kg ha ⁻¹)	Rendimiento de grano means ⁻¹)
Chapingo	52 c ^z	105 b	92 b	61.06 a	5282 a
Nanacamilpa	64 a	126 a	78 c	59.49 b	4356 b
Terrenate	61 b	121 a	104 a	55.57 c	4166 b
media	59	117	91	58.71	46012
DMS	0.75	6.41	6.94	0.60	253.15

^zMeans with the same letter within columns are not statistically different (DMS, $p \leq 0.01$). / ^zMedias con la misma letra dentro de columnas no son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0.01$).

of the grain, being a very important parameter in the industrialization of malting barley because its values directly influence the performance and quality of finished products. The grain yield (REND) was higher in Chapingo with 5,282 kg ha⁻¹; for the towns of Nanacamilpa and Terrenate, no significant statistical differences were observed in the yield obtained. In general, the best agronomic performance was observed in Chapingo, State of Mexico, and although the best PH and yield values were recorded in this locality, these variables are not correlated. However, genotypes with high values for these two variables are preferred.

Table 6 shows the comparison of means for the 16 genotypes including the control variety, where statistical differences are observed between them for all the variables evaluated. For days to heading

localidades el ciclo de cultivo fue más largo a diferencia de Chapingo donde en promedio la madurez fisiológica del germoplasma fue de 105 días. Resultados similares fueron reportados por González *et al.* (2016), quienes indican que las condiciones específicas de cada ambiente determinan la duración del ciclo de cultivo. En cuanto a AP, en la localidad de Terrenate se observaron los mayores portes de planta y los menores en Nanacamilpa (Cuadro 5). Para PH los valores más altos para esta variable fueron obtenidos en Chapingo (61.06 kg hL⁻¹), seguido de Nanacamilpa (59.49 kg hL⁻¹). Únicamente la localidad de Terrenate registró un valor promedio de PH inferior a lo establecido en la norma para la comercialización de los productos. De acuerdo con González *et al.* (2013), el peso hectolítrico (PH) es un factor de calidad que se le relaciona con la

Table 6. Comparison of means in 16 two-row barley lines for the variables DE, DM, AP, PH, REND, SFE and AUDPC from three locations during the Spring-Summer cycle, 2021.

Cuadro 6. Comparación de medias en 16 líneas de cebada de dos hileras para las variables DE, DM, AP, PH, REND, SFE y ABCPE de tres localidades durante el ciclo Primavera-Verano, 2021.

Línea	Días a espigamiento	Días a madurez fisiológica	Altura de planta	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)	Severidad final de la enfermedad	ABCPE ^y
L-1	59 de	117 bcd	92 cdef	58.03 cdef	3611 gh	4.3 bc	46.3 cd ^z
L-2	60 cd	117 bcd	91 def	57.06 f	3864 gh	0.2 d	2.5 d
L-3	56 h	110 gh	99 a	58.30 cdef	4899 de	7.7 b	102.5 ab
L-4	58 efgh	114 defg	97 ab	59.16 bcdef	3653 gh	3.7 cd	55.0 bc
L-5	59 de	116 bcdef	92 bcdef	58.47 cdef	3465 h	1.8 cd	26.3 cd
L-6	57 gh	112 efg	95 abcd	60.14 bc	3935 g	1.0 cd	15.0 cd
L-7	59 de	118 bcd	93 bcdef	59.67 bcde	5442 bc	2.0 cd	28.8 cd
L-8	62 b	120 b	89 f	59.54 bcde	6097 a	0.2 d	1.3 d
L-9	60 bcd	120 b	92 cdef	57.54 ef	5776 ab	0.3 d	2.5 d
L-10	61 bc	117 bcd	96 abc	57.76 ef	4456 f	0.0 d	0.0 d
L-11	57 gh	114 defg	95 abcd	60.95 ab	4374 f	0.0 d	0.0 d
L-12	52 i	112 efg	83 g	60.01 bcd	4539 ef	1.0 cd	11.3 cd
L-13 (Salome s ^o)	49 j	106 h	77 h	63.12 a	3792 gh	0.2 d	2.5 d
L-14 (Frida "s")	62 b	119 b	94 bcde	58.42 cdef	5706 ab	1.0 cd	8.8 cd
L-15 (Alexia "s")	62 b	119 b	91 ef	58.35 cdef	5119 cd	0.0 d	0.0 d
Meztli	71 a	141 a	83 g	53.71 g	4896 de	14.2 a	145 a
DMS	1.98	4.69	4.45	2.20	433.47	3.96	49.75

^yAUDPC = area under the disease progress curve. ^z Means with the same letter within columns are not statistically different (DMS, $p \leq 0.01$). / ^yABCPE= área bajo la curva del progreso de la enfermedad. ^zMedias con la misma letra dentro de columnas no son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0.01$).

(DE) line 13 (L-13) was the earliest (49 days), while the latest (71) was the control variety Meztli. For days to maturity (DM) L-3 and L-13 were the earliest, while Meztli (control) was the latest; the late cycle shown in the control is commonly observed in the introduced materials (Rodríguez *et al.*, 2021) and recommended by the brewing consortiums. It is likely that the main cause is they were not generated for the growing conditions present in Mexico. For plant height (AP), the L-3 was the largest (99 cm), the rest of the genotypes had smaller sizes in relation to this line, with the L-13 line being the genotype with the lowest plant height. According to González *et al.* (2016) these plant sizes are considered intermediate and suitable for growing barley, higher heights than those registered here favor lodging problems and subsequent problems during harvest. The L-13 was the one that registered the highest test weight (PH) on average (63.12 kg hL⁻¹), followed by L-11, while the lowest value was observed in Meztli (53.71 kg hL⁻¹), being 10 units lower than the value obtained in the best line, which represents a 17% superiority of the experimental line over the control. The registered PH values show a great variation between the germplasm evaluated as a response of the genotype to the production environment (Kangor *et al.*, 2017; González *et al.*, 2016). Regarding grain yield, six lines outperformed the commercial control. The highest yields were observed in L-8 (6,097 kg ha⁻¹), L-9 (5,776 kg ha⁻¹) and L-14 (5,706 kg ha⁻¹), which were statistically equal. The L-8 line yielded 1,200 kg more than the control Meztli, which was equivalent to 24.5% more gain. Regarding Final Disease Severity (SFE) and Area Under the Disease Progress Curve (AUDPC), Meztli was the variety where the highest values were observed (145), followed by L-3 and L-1 for these variables (Table 6).

In general, most of the lines evaluated showed adequate agronomic and physical characteristics,

textura del endospermo o con el contenido de proteína del grano, siendo un parámetro muy importante en la industrialización de la cebada maltera debido a que sus valores influyen directamente en el rendimiento y calidad de los productos terminados. El rendimiento de grano (REND) fue superior en Chapingo con 5,282 kg ha⁻¹; para las localidades de Nanacamilpa y Terrenate no se observaron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento obtenido. En general, el mejor comportamiento agronómico fue observado en Chapingo, Estado de México, y aunque en esta localidad se registraron los mejores valores de PH y rendimiento, estas variables no están correlacionadas. Sin embargo, se prefieren genotipos con valores altos para estas dos variables.

En el Cuadro 6 se presenta la comparación de medias para los 16 genotipos incluida la variedad testigo, donde se observan diferencias estadísticas entre ellas para todas las variables evaluadas. Para días a espigamiento (DE) la línea 13 (L-13) fue la más precoz (49 días), mientras que la más tardía (71) fue la variedad testigo Meztli. Para días a madurez (DM) la L-3 y L-13 fueron las más precoces, mientras que Meztli (testigo), fue la más tardía; el ciclo tardío mostrado en el testigo es común observarlo en los materiales introducidos (Rodríguez *et al.*, 2021) y recomendados por los consorcios cerveceros. Es probable que la causa principal sea debido a que no fueron generados para las condiciones de cultivo presentes en México. Para altura de planta (AP), la L-3 fue la de mayor porte (99 cm), el resto de los genotipos tuvieron portes menores con relación a esta línea, siendo la línea L-13 el genotipo con la menor altura de planta. De acuerdo con González *et al.* (2016) estos portes de planta son considerados intermedias y adecuadas para el cultivo de cebada, alturas con mayor porte que las aquí registradas favorecen problemas de acame y posteriores problemas durante la cosecha. La L-13 fue la que en promedio registró el peso hectolítrico

of which grain yield and hectoliter weight are the most important parameters for choosing the genotypes that can be released. In accordance with the NMX-FF-043-SCFI-2003 standard, the minimum value of two-row barley to be considered for brewing industrialization will be 58 kg hL⁻¹. Of the 15 lines evaluated, 12 of them on average presented test weight values according to the established standard.

Few studies have been reported in Mexico that focus on evaluating the pathogenic variability of *P. striiformis* in barley; however, in recent agricultural cycles yellow rust is occurring more frequently in the country, as mentioned by Rodríguez *et al.* (2019). In other countries such as the USA, Chen and Penman (2005) report the presence of 15 physiological races that they identified in 2004 in California and Oregon. Subsequently, Wang and Chen (2012) detected the presence of 11 physiological races in 2008 and five in 2009 in Oregon and Washington. Wang and Chen (2019) reported the presence of 12 races primarily identified in the western USA. Studies conducted by Prashar *et al.* (2014) reported five pathotypes for India, while Safavi *et al.* (2017) identified the presence of 10 physiological races in Iran. Recently Bai *et al.* (2022), mention that in the United States the pathogenic diversity of *P. striiformis* increased from 2010 to 2017, observing rapid changes in virulence from one year to the next. Given this evidence, it is essential to monitor the pathogenic variability of *P. striiformis*, which will allow any change in virulence to be known in time, being an important strategy to consider in breeding programs as indicated by Rodríguez *et al.* (2010) who, when analyzing the virulence of yellow rust in wheat crops, highlight the importance of identifying physiological races of the pathogen, being a useful tool in genetic improvement, which allows creating and releasing new varieties with the most effective genetic combinations for disease control.

(PH) más alto (63.12 kg hL⁻¹), seguido de la L-11, mientras que el menor valor se observó en Meztli (53.71 kg hL⁻¹), siendo 10 unidades inferior al valor obtenido en la mejor línea lo cual representa un 17% de superioridad de la línea experimental sobre el testigo. Los valores de PH registrados muestran una gran variación entre el germoplasma evaluado como respuesta del genotipo al ambiente de producción (Kangor *et al.*, 2017; González *et al.*, 2016). En cuanto al rendimiento de grano, seis líneas superaron en rendimiento al testigo comercial. Los rendimientos más altos se observaron en L-8 (6,097 kg ha⁻¹), L-9 (5,776 kg ha⁻¹) y L-14 (5,706 kg ha⁻¹) las cuales fueron estadísticamente iguales. La línea L-8 rindió 1,200 kg más que el testigo Meztli lo que equivalió a un 24.5% más de ganancia. En cuanto a Severidad Final de la Enfermedad (SFE) y Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE), Meztli fue la variedad en donde se observaron los valores más altos (145), seguido de la L-3 y L-1 para estas variables (Cuadro 6).

En general la mayoría de las líneas evaluadas mostraron adecuadas características agronómicas y físicas, de las cuales, el rendimiento de grano y el peso hectolítrico, son los parámetros de mayor importancia para elegir a los genotipos que podrán ser liberados. De acuerdo con la norma NMX-FF-043-SCFI-2003 las cebadas de dos hileras para ser consideradas en la industrialización cervecera, su valor mínimo será de 58 kg hL⁻¹. De las 15 líneas evaluadas, 12 de ellas en promedio presentaron valores de peso hectolítrico conforme a la norma establecida.

En México se han reportado pocos estudios que se enfoquen a evaluar la variabilidad patogénica de *P. striiformis* en cebada; sin embargo, en los últimos ciclos agrícolas la roya amarilla se está presentando con mayor frecuencia en el país, como lo mencionan Rodríguez *et al.* (2019). En otros países como EUA, Chen y Penman (2005), reportan la presencia 15 razas fisiológicas que identificaron en

Due to its resistance in the field to *P. striiformis* f. sp. *hordei*, under natural incidence, lines L-10, L-11 and L-15 were identified as immune; however, in general, the resistance levels observed in most two-row barley lines are satisfactory. These results coincide with what was reported by Xi *et al.* (2013) who indicated that, when evaluating two-row and six-row barley germplasm, they found a greater number of two-row genotypes with resistance to yellow rust. However, in the INIFAP barley improvement program, in recent years the germplasm obtained has been tested for natural infection in the field and in the greenhouse with selected isolates. This strategy has allowed the selection of lines with high resistance levels, this strategy used in Mexico is also applied in barley improvement programs in various countries, including the USA, as mentioned by Chen (2007). On the other hand, Brown *et al.* (2001) indicated that genetic resistance is an effective, practical and economic mean for the management of barley yellow rust. Ambula *et al.* (2022) also indicated that genetic resistance is an effective alternative if resistant genotypes are incorporated into the new varieties, allowing to improve the productivity of the barley crop by reducing the effects of rusts. Furthermore, Czembor *et al.* (2022) mention that adult plant resistance (APR) is potentially more durable and effective for disease control in barley, avoiding yield losses.

Considering the variability of *P. striiformis* f. sp. *hordei* present in Mexico and the level of resistance that the varieties and lines have, it is important to continue with the evaluation and rotation of germplasm in contrasting environments to avoid the decrease in resistance already obtained in breeding programs.

2004 en California y Oregón. Posteriormente Wang y Chen (2012) detectaron la presencia de 11 razas fisiológicas en 2008 y cinco en 2009 en Oregón y Washington. Wang y Chen (2019) indicaron la presencia de 12 razas principalmente identificada en el oeste de EUA. Estudios realizados por Prashar *et al.* (2014) reportaron para la India cinco patotipos; mientras que Safavi *et al.* (2017) identificaron la presencia de 10 razas fisiológicas en Irán. Recientemente Bail *et al.* (2022), mencionan que en Estados Unidos la diversidad patogénica de *P. striiformis* fue en aumento del 2010 al 2017 observándose cambios rápidos de virulencia de un año a otro. Ante estas evidencias, es imprescindible monitorear la variabilidad patogénica *P. striiformis* lo que permitirá conocer en tiempo cualquier cambio de virulencia siendo una estrategia importante a considerar en los programas de mejoramiento como lo indican Rodríguez *et al.* (2010) quienes al analizar la virulencia de la roya amarilla en el cultivo de trigo resaltan la importancia en la identificación de razas fisiológicas del patógeno siendo una herramienta útil en el mejoramiento genético, que permite crear y liberar nuevas variedades con las combinaciones genéticas más efectivas para el control de la enfermedad.

Por su resistencia en campo a *P. striiformis* f. sp. *hordei*, bajo incidencia natural, las líneas L-10, L-11 y L-15 fueron identificadas como inmunes; sin embargo, en general, los niveles de resistencia observados en la mayoría de las líneas de cebada de dos hileras son satisfactorios. Dichos resultados coinciden con lo reportado por Xi *et al.* (2013) quienes indicaron que, al evaluar germoplasma de cebada de dos y seis hileras, encontraron un mayor número de genotipos de dos hileras con resistencia a roya amarilla. No obstante, en el programa de

CONCLUSIONS

Nine yellow rust isolates of barley were identified in the spring-summer/2021 cycle. No virulence was identified for the Heils Franken genotype, therefore race 24 was not detected. Most of the two-row barley lines showed monogenic resistance. Line L-8 was the one with the highest yield potential and resistance to yellow rust in seedlings and adult plants. Alexia “s” is the candidate line with immunity to yellow rust. The evaluation of resistance in the greenhouse and in the field under contrasting environments is a viable strategy for the identification of germplasm resistant to yellow rust in barley that will allow the release of varieties with genetic resistance.

ACKNOWLEDGMENTS

Research funded by the project: Genetic improvement of barley to obtain high productivity and disease tolerant forage lines. SIGI No: 12532434778.

CITED LITERATURE

- Ambula KV, James O and Charimbu MK. 2022. Evaluation of advanced Kenyan barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes for resistance to stem rust (*Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. & E. Henn.) race Ttksk and its variants. Journal of Experimental Agriculture International 44(9):10-20. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2022/v44i930844>
- Bail Q, Liu T, Wan A, Wang M, See DR and Chen X. 2022. Changes of barley stripe rust populations in the United States from 1993 to 2017. Phytopathology 112(11):2391-2402. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-22-0135-R>
- Bjarko ME and Line RF. 1988. Heritability and number of genes controlling leaf rust resistance in four cultivars of wheat. Phytopathology 78:457-461.
- Brown WM, Hill JP and Velasco VR. 2001. Barley yellow rust in North America. Annual Review of Phytopathology 39:367-384.
- Calhoun DS, Luna A and Vivar FHE. 1988. Chemical control of barley stripe rust, a new disease for North America. Barley Newsletter 32:109-112.
- Czembor JH, Czembor E, Suchecki R and Watson HNS. 2022. Genome wide association study for Power Mildew and rust adult plant resistance in European spring barley from polish gene bank. Agronomy 12(7):1-24. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010007>

mejoramiento de cebada del INIFAP en los últimos años el germoplasma obtenido se ha probado bajo infección natural en campo e invernadero con aislamientos seleccionados. Dicha estrategia ha permitido seleccionar líneas con niveles de resistencia altos, esta estrategia utilizada en México también se aplica en los programas de mejoramiento de cebada de diversos países, entre ellos EUA, como lo menciona Chen (2007). Por otra parte, Brown *et al.* (2001) indicaron que la resistencia genética es un medio efectivo, práctico y económico para el manejo de la roya amarilla de la cebada. Ambula *et al.* (2022) también indicaron que la resistencia genética es una alternativa efectiva si se incorporan en las nuevas variedades los genotipos resistentes, permitiendo mejorar la productividad del cultivo de cebada al reducir los efectos de las royas. Además, Czembor *et al.* (2022) mencionan que la resistencia en planta adulta (RPA) es potencialmente más durable y efectiva para el control de enfermedades en cebada evitando pérdidas en el rendimiento. Considerando la variabilidad de *P. striiformis* f. sp. *hordei* presente en México y el nivel de resistencia que poseen las variedades y líneas, es importante continuar con la evaluación y rotación de germoplasma en ambientes contrastantes para evitar la disminución en la resistencia ya obtenida en los programas de mejoramiento.

CONCLUSIONES

Se identificaron nueve aislamientos de roya amarilla de la cebada en el ciclo P-V/2021. No se identificó virulencia para el genotipo Heils Franken por lo cual no se detectó la raza 24. Las líneas de cebada de dos hileras en su mayoría mostraron resistencia monogénica. La línea L-8, fue la de mayor potencial de rendimiento y resistente a roya amarilla en plántula y planta adulta. Alexia “s” es la línea candidata con inmunidad a roya amarilla.

- Chen XM 2007. Challenges and solutions for stripe rust control in the United States. *Australian Journal of Agricultural Research* 58:648-655. <https://doi.org/10.1071/AR07045>
- Chen X and Line RF. 2002. Identification of genes for resistance to *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* in 18 barley genotypes. *Euphytica* 129(1):127-145. <https://doi.org/10.1023/A:1021585907493>
- Chen X and Penman L. 2005. Races of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, the pathogen of barley stripe rust in the United States in 2004. *Barley Genetics Newsletter* 35:23-26
- Dean R, Kan JALV, Pretorius ZA, Hammond-Kosack KE, Pietro Ad, Spanu PD, Rudd JJ, Dickman M, Kahmann R, Ellis J and Foster GD. 2012. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology* 13(4):414-430. <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2011.00783.X>
- Dubin HJ and Stubbs RW. 1986. Epidemic spread of barley stripe rust in South America. *Plant Disease* 70(2):141-144.
- Gangwar OP, Bhardwaj SC, Singh GP, Prasad P and Kumar S. 2018. Barley disease and their management: An Indian perspective. *Wheat and Barley Research* 10(3):138-150. <https://doi.org/10.25174/22494065/2018/83844>
- González GM, Zamora DM, Huerta ZR y Solano HS. 2013. Eficacia de tres fungicidas para controlar roya de la hoja en cebada maltera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(8):1237-1250. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n8/v4n8a10.pdf>
- González GM, Zamora DM y Solano HS. 2016. Evaluación agronómica y física en líneas avanzadas de cebada maltera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(1): 159-171. <http://www.scielo.org.mx/pdf/>
- González GM, Zamora DM, Solano HS, Huerta ZR, Gómez MR y Rojas MI. 2021. Mejoramiento genético de cebada en el INIFAP (1985-2020). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* PE (25):15-19. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2807>
- Hamwieh A, Alo F and Ahmed S. 2018. Molecular Tools Developed for disease resistant genes in wheat, barley, lentil and chickpea: A Review. *Arab Journal of Plant Protection* 36(1):50-56. <https://doi.org/10.22268/AJPP-036.1.050056>
- Kangor T, Sooväli P, Tamm Y, Tamm I and Koppel M. 2017. Malting Barley Diseases, yield and quality-responses to using various agro-technology regimes. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences* 71(1-2): 57-62. <https://doi.org/10.1515/prolas-2017-0010>
- Line RF. 2002. Stripe rust of wheat and barley in North America: A retrospective historical review. *Annual Review of Phytopathology* 40:75-118. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.40.020102.111645>
- Marshall D and Sutton RL. 1995. Epidemiology of stripe rust, virulence of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, and yield loss in barley. *Plant Disease* 79(7):732-737.
- Niks RE. 2014. How Specific is Non-Hypersensitive Host and Nonhost Resistance of Barley to Rust and Mildew Fungi?

La evaluación de la resistencia en invernadero y en campo bajo ambientes contrastantes es una estrategia viable para la identificación de germoplasma resistente a roya amarilla en cebada que permitirá liberar variedades con resistencia genética.

AGRADECIMIENTOS

Investigación financiada por el proyecto: Mejoramiento genético de cebada para obtener líneas forrajeras de alta productividad y tolerantes a enfermedades. No. SIGI: 12532434778.

~~~~~ Fin de la versión en Español ~~~~~

- Journal of Integrative Agriculture* 13(2):244-254. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60648-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60648-6)
- Prashar M, Bhardwaj SC, Gangwar OP and Jain SK. 2014. Virulence distribution and frequency of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, causing stripe rust of barley in northern parts of India. *Indian Phytopathology* 67(1):38-41.
- Rodríguez GMF, González GM, Huerta EJ and Solano HS. 2021. Fungicides evaluation against yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*) in six barley cultivars. *Mexican Journal of Phytopathology* 39(3):414-434. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2106-5>
- Rodríguez GMF, González GM, Huerta EJ, Solano HS y Villaseñor MHE. 2019. Evaluación de fungicidas para el control de la roya lineal amarilla en cebada. *Revista Mexicana de Fitopatología* 37(Suplemento): S89. <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen372019/S372019.pdf>
- Rodríguez GMF, Huerta EJ, Villaseñor MHE, Sandoval IJS y Singh RP. 2010. Análisis de virulencia de la roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) del trigo (*Triticum aestivum* L.) en los Valles Altos de México. *Agrociencia* 44(4):491-502.
- Roelfs AP, Huerta-Espino J and Marshall D. 1992. Barley stripe rust in Texas. *Plant Disease* 76:538.
- Safavi SA, Afshari F and Arzanlou M. 2017. First report of new races of barley yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*) in Iran. *Journal of Plant Pathology* 99(3):799-818.
- Sandoval IJS, Osada KS, Vivar FH y Benítez RI. 1999. Correlación entre resistencia en plántula y resistencia en planta adulta a la roya amarilla y a la escaladura de la cebada. *Agrociencia* 33(4):415-422.
- Sandoval IJS, Broers LHM, Mora AG, Parlevliet JE, Osada KS and Vivar HE. 2007. Quantitative resistance and its components in 16 barley cultivars to yellow rust, *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*. *Euphytica* 153:295-308.

- Statistical Analysis System (SAS). 2016. Release 9.3 for Windows. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2022. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México. <http://www.gob.mx/siap>, junio 2022.
- Stubbs RW. 1985. Stripe Rust. In: The Cereal Rust Vol. II Diseases, Distribution, Epidemiology, and control. Roelfs AP and Bushnell WR (eds.). Academic Press, Inc. (London) LTD. 61-91 pp.
- Wang M and Chen X. 2012. Virulence, frequency, and distribution of races of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* f. sp. *hordei* identified in the United States in 2008 and 2009. Plant Disease 96(1):67-74. <https://dx.doi.org/10.1094/PDIS-02-11-0119>
- Wang M and Chen X. 2019. Stripe rust epidemics of wheat and barley and races of *Puccinia striiformis* identified in the United States in 2018. (Abstr.) Phytopathology 109:S2.84. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-109-10-S2.1>
- Xi K, Chen XM, Capettini F, Falconi E, Yang RC, Helm JH, Holtz MD, Juskiw P, Kumar K, Nyachiro J and Turkington TK. 2013. Multivariate analysis of stripe rust assessment and reactions of barley in multi-location nurseries. Canadian Journal of Plant Science 93(2): 209-219. <https://doi.org/10.4141/CJPS2012-051>
- Zadoks JC, Chang TT and Konzak CF. 1974. A Decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research 14(6):415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zamora DM, Márquez CLA, Ramirez PF e Ibañez CAM. 1997. ESMERALDA Variedad de cebada maltera para los Valles Altos. Campo Experimental Valle de México, INIFAP. Folleto Técnico No. 5. Chapingo, Edo. de Méx., México. 20 p.