



EVALUACIÓN DE TRIGOS CRISTALINOS DE ETIOPÍA POR SU RESISTENCIA A ROYA DE LA HOJA EN MÉXICO

EVALUATION OF ETHIOPIAN DURUM WHEATS FOR RESISTANCE TO LEAF RUST IN MEXICO

Laura Marisa Delgado-Sánchez¹, Julio Huerta-Espino², Karim Ammar³, Ignacio Benítez-Riquelme¹, Víctor Heber Aguilar-Rincón¹, Tarsicio Corona-Torres¹ y René Hortelano-Santa Rosa^{2*}

¹Colegio de Postgraduados, Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. ³Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, El Batán, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (hortelano.rene@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La roya de la hoja, causada por el hongo *Puccinia triticina* E., continúa siendo una de las enfermedades más importantes del trigo cristalino en México y en el mundo. Una de las formas más eficientes de controlar la enfermedad es mediante resistencia genética, lo que implica la necesidad de identificar fuentes de resistencia, ya sea en variedades cultivadas, en especies relacionadas con el género *Triticum*, o en genotipos criollos procedentes de los centros de origen o diversidad. El objetivo de este estudio fue evaluar fenotípicamente en campo y bajo invernadero trigos criollos provenientes de Etiopía. De 194 genotipos evaluados contra las razas de *P. triticina* BBG/BPCG y BBG/BPCJ se identificaron 89 genotipos resistentes, equivalente al 45 %, y 91 contra la raza BBG/BPCJ, que representan el 46 %. El 31 % de los genotipos permanecieron resistentes, con el mismo grado de severidad para ambas razas, pero un 15 % de los genotipos aumentó su nivel de resistencia cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ con respecto a BBG/BPCG, en tanto que, para el 50 % de los genotipos la severidad de la enfermedad aumentó. Es importante que las futuras pruebas de identificación de fuentes de resistencia, así como el seguimiento de la incorporación de las ya identificadas sean realizadas con la raza BBG/BPCJ, que es la de mayor prevalencia desde su aparición en México en 2017. El estudio permitió identificar genotipos resistentes en todas las etapas de desarrollo, así como genotipos con resistencia efectiva sólo en planta adulta. De los genotipos evaluados, 98 criollos y cinco variedades mejoradas fueron seleccionados como resistentes. Estos individuos podrían ser utilizados como fuentes de resistencia en programas de mejoramiento para incorporar resistencia a roya de la hoja.

Palabras clave: *Puccinia triticina*, *Triticum turgidum*, resistencia, trigos criollos.

SUMMARY

Leaf rust, caused by the fungus *Puccinia triticina* E., continues to be one of the most important diseases of durum wheat in Mexico and the world. One of the most efficient ways to control the disease is through genetic resistance, which implies the need to identify sources of resistance, either in cultivated varieties, in species related to the genus *Triticum*, or in landrace genotypes from centers of origin or diversity. The objective of this study was to evaluate phenotypically in the field and greenhouse wheats native to Ethiopia. Of 194 genotypes evaluated against the races of *P. triticina* BBG/BPCG and BBG/

BPCJ, 89 genotypes were identified as resistant against the BBG/BPCG race, equivalent to 45 %, and 91 against the BBG/BPCJ race, representing 46 %. Thirty-one percent of the genotypes remained resistant with the same degree of severity for both races, but 15 % of genotypes increased their level of resistance when evaluated with the BBG/BPCJ race in relation to BBG/BPCG, whereas for 50 % of genotypes the severity of the disease increased. It is important that future tests to identify sources of resistance, as well as the follow-up of the incorporation of those already identified are performed with the BBG/BPCJ race, which is the most prevalent since its appearance in Mexico in 2017. The study allowed to identify resistant genotypes at all stages of development, as well as genotypes with effective resistance only in the adult plant. Of the genotypes evaluated, 98 landraces and five improved varieties were selected as resistant. These individuals could be used as sources of resistance in breeding programs to incorporate resistance to leaf rust.

Index words: *Puccinia triticina*, *Triticum turgidum*, landrace wheats, resistance.

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum* spp.) es un alimento básico y uno de los cultivos más importantes del mundo, ya que proporciona 23 % del suministro de energía de origen vegetal (Sentayehu et al., 2004). El trigo cristalino (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) es uno de los cereales que se adapta a la región del mediterráneo, donde se concentra aproximadamente 75 % de la producción mundial, y se considera como un cultivo mediterráneo tradicional (Sall et al., 2019).

La base genética del trigo cristalino de Etiopía es muy valiosa por sus adaptaciones a estrés abiótico y biótico, y contiene fuentes únicas para el mejoramiento genético (Negassa, 1986). Etiopía se considera un posible centro de origen de la especie tetraploide de *Triticum*, aunque para algunos autores como Giunta et al. (2007), parece ser más bien un centro de diversificación.

Se estima que las pérdidas anuales mundiales por patógenos causantes de las royas del trigo oscilan entre 4.3 y 5.0 mil millones de dólares estadounidenses (Figuroa *et al.*, 2018). Dentro de las enfermedades del trigo cristalino, una de las más importantes es la roya de la hoja, causada por el hongo *Puccinia triticina* E. En México, las pérdidas causadas por las epidemias de roya en trigos cristalinos durante los ciclos agrícolas 2000-2001, 2001-2002 y 2002-2003 fueron estimadas en al menos 32 millones de dólares estadounidenses (Singh *et al.*, 2004).

En general, se acepta que los agricultores pudieron haber seleccionado repetidamente contra susceptibilidad generación tras generación entre las variedades locales de trigo, y no hay evidencia para creer lo contrario en el caso de los trigos criollos cristalinos. La selección natural también pudo haber tenido lugar en áreas propensas a la roya de la hoja, donde ésta afecta el vigor y el llenado de grano; por lo tanto, es probable la coexistencia entre el patógeno y las plantas, donde la selección ha favorecido los genotipos criollos con un nivel adecuado de resistencia (Huerta-Espino *et al.*, 2023).

La conservación del germoplasma y la selección de progenitores con antecedentes genéticos diversos hace que el mejoramiento en los cultivos sea más eficiente (Adenow *et al.*, 1997). En México, con la introducción del trigo en 1529, llegaron nuevas formas de alimentación y mestizaje (DeLacy *et al.*, 2000). En la Mixteca alta del estado de Oaxaca se cultivaron trigos cristalinos criollos conocidos como "trigos ventureros", que llegaron durante la colonia, y su posible origen es la Península Ibérica (Evenson y Lemarie, 1998). Estos genotipos fueron resistentes a la raza BBG/BN de *Puccinia triticina*, y presentaron variabilidad genética para resistencia a esta raza de roya de la hoja (Huerta *et al.*, 2011). Algunas de estas variedades criollas de trigo cristalino son con frecuencia susceptibles y la severidad de la enfermedad suele ser alta (Adenow *et al.*, 1997); sin embargo, también se pueden encontrar genotipos con altos niveles de resistencia que representan nuevas alternativas factibles de utilizar en los programas de mejoramiento genético de la especie; por ejemplo, el gen *Lr79* descubierto recientemente en el trigo criollo australiano Aus26582 (Qureshi *et al.*, 2018).

La búsqueda de fuentes de resistencia a la roya de la hoja en variedades criollas debería ser la primera opción, antes de recurrir a las especies silvestres del género *Triticum*; por ejemplo, la resistencia en el genotipo Camayo procede de una cruce entre un criollo de Etiopía (ETH-LRBR A1-133) y la variedad Altar C84 (Herrera-Foessel *et al.*, 2005), mientras que una línea de la cruce Atil/Camayo se liberó en México como Cirno C2008 (Figuroa-López *et al.*, 2010). Tanto en México como en Etiopía existe una

especialización fisiológica en las poblaciones de *P. triticina*, donde se encuentran razas que preferentemente causan la roya de la hoja en trigos cristalinos (Huerta-Espino y Roelfs 1989; Singh, 1991).

De acuerdo con información de Singh (1991), en México, antes de 2001 sólo existía BBB/BN como raza que atacaba a los trigos cristalinos, como lo muestra la respuesta de plantas diferenciales: *Lr1*, 2a, 2c, 3 (juego 1); *Lr9*, 16, 24, 26 (juego 2); *Lr3Ka*, 11, 17, 30 (juego 3); *Lr3Bg*, 13, 15, 18 (juego 4) y *Lr10*, 19, 23 y 27+31 (juego 5). En 2001 se identificó BBG/BN, que venció la resistencia de Altar C84 (Singh *et al.*, 2004); en el año 2008 la raza BBG/BP venció la resistencia de Jupare C2001 y Banamichi C2008 (Huerta-Espino *et al.*, 2009), y en 2017 una variante de BBG/BP venció la resistencia de Cirno C2008 (Huerta-Espino *et al.*, 2017).

El agente causal de la roya de la hoja, que preferentemente ataca trigos cristalinos, no se ha definido como una forma especial (*durum* o *duri*) ya que *P. triticina* tiene el mismo hospedante alterno, aunque se ha reportado una forma especial (*duri*) presente en el norte de África y sur de Portugal y España (Huerta-Espino *et al.*, 2023). Con el propósito de seguir la evolución de las razas de *P. triticina* que atacan los trigos cristalinos se consideró necesario agregar juegos adicionales de plantas diferenciales, propuestos por Singh (1991), un sexto juego de diferenciales fue integrado por los genes *Lr14a*, *Lr28*, *Lr61* y *Lr72* al identificarse una variante de BBB/BN virulenta a *Lr61* (Delgado-Sánchez *et al.*, 2016). En 2017 se identificó una raza que adquirió virulencia para hacer inefectiva la resistencia de la variedad Cirno C2008, (Huerta-Espino *et al.*, 2017). Para distinguir esta raza de la inmediata anterior (BBG/BPC) se agregó como sufijo al final de las letras que definen la raza como BBG/BPC-cirno que resultó impráctico, por lo que se adicionó otro juego de diferenciales constituido por *LrGza* (Gaza), *Lr33*, *LrCam* (Camayo) y *Lr51* que permite diferenciar la BBG/BPCG avirulenta en Cirno C2008 de BBG/BPCJ virulenta (Huerta-Espino *et al.*, 2017). Con la nueva nomenclatura las razas se designarían como: BBB/BNGQ (Singh, 1991), BBB/BNJQ (Delgado-Sánchez *et al.*, 2016), BBG/BNCG, BCG/BNCG (Singh *et al.*, 2004), BBG/BPCG, CBG/BPCG (Huerta-Espino *et al.*, 2009) y BBG/BPCJ con virulencia a *LrCam* (Huerta-Espino *et al.*, 2017).

Con la constante evolución de *P. triticina* que afecta los trigos cristalinos es menester identificar fuentes de resistencia; por ejemplo, en un estudio reciente (Huerta-Espino *et al.*, 2023), altos niveles de diversidad para resistencia a la roya de la hoja y otros atributos agronómicos fueron reportados en un subconjunto de trigos criollos cristalinos procedentes de diversos países, lo que sugirió que existe suficiente variación y que, a corto plazo, no es necesario mirar más allá en el genoma

secundario de *T. turgidum* que no sea en los parientes más cercanos tetraploides como *T. diccicum* y *T. diccoides* que pueden ser incorporados en el desarrollo de variedades resistentes a roya de la hoja.

La formación de variedades resistentes es la manera más efectiva para el control de roya de la hoja, y ante la necesidad de identificar nuevas fuentes de resistencia, el objetivo de este estudio fue evaluar fenotípicamente en campo y bajo invernadero 194 genotipos de trigo cristalino provenientes de Etiopía, en contra de dos razas de *P. triticina* e identificar las mejores fuentes de resistencia a roya de la hoja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pruebas de invernadero y campo: material genético

Se evaluaron 169 genotipos criollos y 25 mejorados de trigo cristalino procedentes de Etiopía. Estos materiales se establecieron en México para seleccionar progenitores con resistencia a roya de la hoja. Los 194 genotipos se sembraron en el CIMMYT, El Batán, Texcoco, Estado de México durante el verano 2016, en un surco sencillo de 1.5 m de largo con separación de 15 cm, utilizando 5 g de semilla. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los mismos genotipos fueron sembrados en el CIMMYT-CENEB ubicado en el Valle del Yaqui en Sonora, México durante el invierno 2016/2017 con el mismo diseño y tamaño de parcela.

Razas del patógeno

Para la evaluación de la resistencia, en el CIMMYT-Batán se utilizó la raza BBG/BPCG, mientras que en el CIMMYT-CENEB se utilizó BBG/BPCJ. La fórmula de avirulencia/virulencia de BBG/BPCG es: *Lr1*, *Lr2a*, *Lr2b*, *Lr2c*, *Lr3*, *Lr3ka*, *Lr3bg*, *Lr9*, *Lr13*, *Lr14a*, *Lr15*, *Lr16*, *Lr17*, *Lr18*, *Lr19*, *Lr21*, *Lr24*, *Lr25*, *Lr26*, *Lr28*, *Lr29*, *Lr30*, *Lr32*, *Lr35*, *Lr36*, *Lr37*, *Lr61*, *LrCam/Lr10*, *Lr11*, *Lr14b*, *Lr20*, *Lr23*, *Lr27* + *Lr31*, *Lr33*, *Lr72*, mientras que la fórmula de BBG/BPCJ es similar a la anterior, pero con virulencia a *LrCam* (Huerta-Espino *et al.*, 2009).

Inoculación en campo

Para inducir la epidemia en los lotes donde se sembraron los trigos cristalinos en CIMMYT-Batán y en CIMMYT-CENEB se sembró la variedad Banamichi en 2016 y Cirno C2008 en 2017 como bordos susceptibles. Los bordos fueron inoculados con una suspensión de esporas de las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ, respectivamente, en una concentración 1×10^6 esporas mL⁻¹ en aceite mineral Soltrol®, 40 días después de la siembra. A la segunda

y tercera semana después de la primera inoculación se inocularon nuevamente los bordos para asegurar el establecimiento del hongo causante de la enfermedad.

Evaluación de la respuesta a roya de la hoja en el CIMMYT-Batán y CIMMYT-CENEB

Se hicieron tres evaluaciones en cada genotipo, la primera cuando los progenitores susceptibles Atred#1 y Atred#2 presentaron 20 % de severidad en la hoja bandera; la segunda ocho días después de la primera, y la tercera cuando los progenitores susceptibles Atred#1 y Atred#2 presentaron 100 % de severidad en la hoja bandera. En todos los casos la evaluación de la enfermedad se realizó empleando la escala modificada de Cobb (Peterson *et al.*, 1948).

Clasificación de los genotipos

Los genotipos se agruparon de acuerdo con la severidad final de la enfermedad; éstos se clasificaron en ocho grupos con base en la metodología de Huerta-Espino *et al.* (2020), donde: casi inmune (CI = 0-1 % de severidad), resistente (R = 5-10 % de severidad), resistente a moderadamente resistente (RMR = 15-20 % de severidad), moderadamente resistente (MR = 30 % de severidad), moderadamente resistente a moderadamente susceptible (MRMS = 40 % de severidad), moderadamente susceptible (MS = 50-60 % de severidad), moderadamente susceptible a susceptible (MSS = 70-80 % de severidad) y susceptible (S = 90-100 % de severidad).

Determinación del progreso de la roya de la hoja

Se calculó el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) a través de la severidad, con la fórmula $ABCPE = \{[Y_i + (Y_i + 1)] / 2\} \{t_i + 1 - t_i\}$ (Van der Plank, 1975), donde: Y_i es la intensidad de la enfermedad (%), que se obtiene con base en la severidad observada; t_i es el período de evaluación en días, por lo que las unidades son % d⁻¹. La tasa de intensidad de la enfermedad (TIE) representa la velocidad con que se desarrolla una epidemia y se expresa en % d⁻¹: $TI = [Y_t - (Y_{t-1})] / [t - (t - 1)]$, donde: t y $t - 1$ son las fechas en que se cuantificó la enfermedad, y Y_t y Y_{t-1} representan el porcentaje de enfermedad registradas en cada fecha.

Evaluación de plántula en el invernadero con la raza BBG/BPCJ

En 2017 los genotipos se sembraron en charolas de plástico de 20 cm de largo × 30 cm de ancho × 6 cm de profundidad en una mezcla de sustrato (tierra + turba peatmoss en proporción 1:1). Se marcaron 48 orificios

de 1.0 cm de diámetro × 2.0 cm de profundidad con una plancha de acero de ocho hileras y seis columnas. Se sembraron 10 semillas de cada uno de los genotipos. Las charolas se etiquetaron y colocaron en invernadero a una temperatura de 18 ± 2 °C durante la noche y 20 ± 2 °C en el día. Las plántulas se fertilizaron con la fórmula 17-17-17 (N-P-K) disuelta en agua y se aplicaron 125 mL por charola. La inoculación se realizó 10 días después de la siembra, cuando se extendió por completo la hoja primaria, mediante aspersión con una suspensión de esporas de la raza BBG/BPCJ en aceite mineral Soltrol 170® (Chevron Phillips Chemical Company, The Woodlands, Texas, EUA) a una concentración de 1.0×10^6 mL⁻¹. Las plantas inoculadas se dejaron secar por 20 min y luego se colocaron por 16 h en una cámara con un humidificador (Hydrofogger, H₂OTEK, Monterrey, México) que permitió alcanzar 100 % de humedad relativa; posteriormente, las plántulas se trasladaron a invernadero con temperatura entre 20 y 24 °C hasta la aparición de los síntomas de la enfermedad. La infección se evaluó a los 10 días después de la inoculación, mediante la escala de 0 a 4 propuesta por Roelfs *et al.* (1992), donde las plántulas con infección de 0 a 2 se consideraron resistentes, mientras que aquellas con infección 3-4 se identificaron como susceptibles.

Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza con el ABCPE para después realizar comparación de medias mediante la prueba DMS ($P \leq 0.05$) con el paquete estadístico SAS v. 9.4 (SAS Institute, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los 194 genotipos se agruparon de acuerdo con su respuesta a la infección en campo a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ. Los genotipos con mayor resistencia fueron criollos en su mayoría. Se identificaron 89 genotipos resistentes, equivalente al 46 % (CI y R) en contra de la raza BBG/BPCG y para la raza BBG/BPCJ los genotipos resistentes (CI y R) fueron 91, lo que representa el 47 % (Cuadro 1). Los genotipos que presentaron menores índices de resistencia (MRMS, MS, MSS y S) fueron 59 para el caso de la raza BBG/BPCG, lo que representó el 30 %; sin embargo, para la raza BBG/BPCJ, la cual venció la resistencia de Cirno C2008, se encontraron 98 genotipos, equivalentes al 50 % (Cuadro 1). Este incremento de genotipos más susceptibles a la raza BBG/BPCJ podría indicar que éstos comparten la misma fuente de resistencia que Camayo (Herrera-Foessel *et al.*, 2005); la importancia radica en que ésta procede de la cruce de un trigo criollo de Etiopía con la variedad mexicana Altar C84 (Herrera-Foessel *et al.*, 2005), y que una línea de la cruce Atil/Camayo se liberó en México como Cirno C2008

(Figuroa-López *et al.*, 2010), variedad que ha sido exitosa y que actualmente es susceptible a roya de la hoja en México. Es notable el incremento de genotipos susceptibles cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ, lo que indica que esta raza podría poseer virulencia adicional, además de virulencia para Cirno C2008 (Huerta-Espino *et al.*, 2017).

Además de la severidad final, el desarrollo de la enfermedad en diferentes etapas permitió calcular el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) en respuesta a las dos razas con las que se evaluaron los genotipos. El análisis de varianza indicó valores altamente significativos y se reporta el valor de DMS al 5 % en la Figura 1; en este caso, los niveles bajos de ABCPE coincidieron con los niveles más bajos de la severidad final de la enfermedad (CI a R).

Algunos investigadores, como Roelfs *et al.* (1992), llegaron a la conclusión de que el ABCPE no es una medición útil si predomina la resistencia de raza específica o de genes mayores; sin embargo, en el caso donde sólo existen genes de efectos menores y la comparación es obligada con los testigos susceptibles y el progreso de la enfermedad es lenta comparada con el progreso rápido de la enfermedad en los genotipos susceptibles, dicho parámetro es una herramienta útil.

Los trigos cristalinos de Etiopía tienen varios aspectos que los distinguen, el de mayor importancia es la resistencia a roya de la hoja (Belay *et al.*, 1991). Aun cuando algunos genes de resistencia han perdido su efectividad, como en el caso del criollo de Etiopía usado en el desarrollo de Camayo y de Cirno C2008 (Huerta-Espino *et al.*, 2017), en general, el comportamiento de los genotipos fue diferente ante cada una de las dos razas de *P. triticina*, lo que permitió hacer una clasificación en tres grupos (A, B y C), de acuerdo con el comportamiento de cada genotipo.

Los 194 genotipos se agruparon de acuerdo con su respuesta a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ como sigue: Grupo A, aquellos que permanecieron resistentes con el mismo grado de severidad para ambas razas y que representan el 31.4 % del total (61 genotipos), dentro de los cuales sólo cuatro fueron genotipos mejorados, de este grupo y mediante la respuesta de severidad final a la enfermedad se lograron identificar 54 genotipos como CI, cinco como R, uno como RMR y uno como MR, siendo éste el grupo más importante. En el Grupo B (30 genotipos, 15.4 %), que considera genotipos que se incluyeron en los grupos RMR, MR, MS a la raza BBG/BPCG, pero que su nivel de resistencia aumentó cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ y se clasificaron como CI, R y RMR, lo que es algo que normalmente no ocurre al evaluar genotipos en contra de una raza que adquirió nuevos

Cuadro 1. Agrupación de los 194 genotipos evaluados de acuerdo con el porcentaje de severidad final en campo en respuesta a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ de *P. triticina* E.

Grupos [†]	BBG/BPCG ^{††}	(%)	BBG/BPCJ [†]	(%)
CI	58	29	78	39
R	31	16	13	7
R-MR	19	10	1	1
MR	27	14	4	3
MR-MS	23	12	3	2
MS	31	16	13	7
MS-S	5	3	15	8
S	0	0	67	33
Total	194	100	194	100

[†]CI: casi inmune, R: resistente, R-MR: resistente a moderadamente resistente, MR: moderadamente resistente, MR-MS: moderadamente resistente a moderadamente susceptible, MS: moderadamente susceptible, MS-S: moderadamente susceptible a susceptible, S: susceptible (Huerta-Espino *et al.*, 2020). ^{††}•Número de genotipos en cada grupo. %: porcentaje de los genotipos con respecto al total.

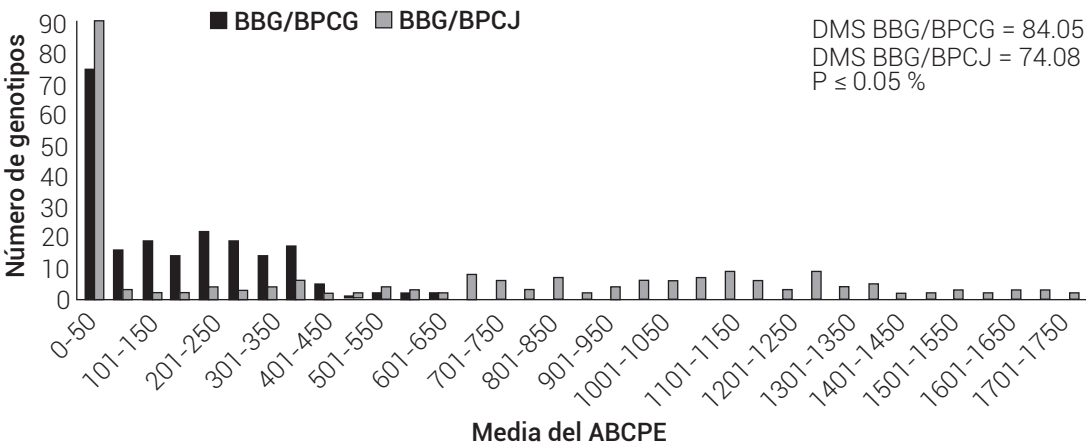


Figura 1. Distribución de medias del ABCPE de roya de la hoja en los genotipos de trigo cristalino en respuesta a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ.

genes de virulencia; sin embargo, se han reportado razas que ganan virulencia para algunos genes, pero pierden virulencia para otros (Huerta-Espino y Singh, 1996); otra explicación es que la caracterización de las razas de *P. triticina* se basa en unos cuantos genes que consiste en siete juegos de cuatro diferenciales cada uno (28) y que ambas razas, en este caso, pueden diferir en su contenido de genes de avirulencia/virulencia para los cuales no se han identificado plantas diferenciales. En el Grupo C, al que corresponden 103 genotipos (53.1 % del total) la severidad de la enfermedad aumentó. Algunos genotipos pasaron de ser CI o R en respuesta a la raza BBG/BPCG a susceptibles cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ; este grupo incluye aquellos genotipos que no tienen un valor agronómico inmediato desde el punto de vista del

mejoramiento para resistencia a roya de la hoja.

Se identificaron genotipos con niveles altos de resistencia en contra de las dos razas utilizadas en el estudio, lo que hace suponer que dichos materiales contienen genes diferentes a los que teóricamente Camayo posee. Cada raza de *P. triticina* que afecta al trigo cristalino contiene genes de virulencia o avirulencia que hacen su grado de complejidad diferente. Los trigos criollos cristalinos (cuando existen) deberían tener prioridad sobre las especies silvestres en la búsqueda de fuentes de resistencia a roya de la hoja, ya que es más fácil su introgresión sin necesidad de recurrir al rescate de embriones y se evaden los problemas causados por las diferencias cromosómicas (Huerta *et al.*, 2011; Huerta-Espino *et al.*, 2009; 2023).

Entre otros ejemplos de evaluación de trigos criollos, una selección de 482 accesiones de trigos tetraploides de diferentes países se evaluó en invernadero y campo durante 2015 contra las razas CBG/BP y BBG/BP identificadas en 2008 (Huerta-Espino *et al.*, 2009); entre las accesiones, se identificaron 68 resistentes en todas las etapas de crecimiento, además de 41 genotipos susceptibles en plántula, pero resistentes en planta adulta; adicionalmente, 79 genotipos resistentes en plántula se probaron contra 15 razas diferentes, incluyendo razas que atacan trigos harineros y cristalinos y entre las 79 accesiones evaluadas, 35 fueron resistentes a todas las razas, resaltando 17 genotipos criollos de Etiopía; sin embargo, siete de éstos al ser evaluados con la raza BBG/BPCJ se tornaron susceptibles (Huerta-Espino *et al.*, 2023).

La caracterización subsecuente de los trigos cristalinos provenientes de Etiopía en contra de la raza BBG/BPCJ de *P. triticina*, tanto en plántula como en planta adulta, permitió identificar los cuatro grupos que se muestran en el Cuadro 2.

En los criollos se encontró una mayor proporción de genotipos resistentes que susceptibles, mientras que entre los mejorados la mayoría fueron susceptibles y sólo cuatro resistentes. En los 98 genotipos criollos que se identificaron como resistentes a la raza BBG/BPCJ, que representan el 50 % del total de los genotipos evaluados, una subsecuente caracterización permitió identificar dos grupos principales (Cuadros 2 y 3), el primero de ellos posee resistencia que se manifiesta desde el estado de plántula hasta planta adulta en un 55 % (54) entre los criollos y el segundo grupo, que incluyó 45 % (44) de los criollos, se caracteriza por mostrar susceptibilidad en estado de plántula, pero en planta adulta y principalmente en la hoja bandera, los niveles de infección fueron muy bajos.

Entre los genotipos mejorados que se evaluaron contra

la raza BBG/BPCJ, sólo Selam, Werer, Flakit y Oda fueron resistentes, mientras que Yerer fue susceptible en plántula, pero con resistencia intermedia en planta adulta. Los resultados del presente estudio indican una frecuencia alta de genotipos resistentes. En estudios similares en trigos cristalinos se han identificado genotipos resistentes y susceptibles, tanto para roya de la hoja (Aoun *et al.*, 2016; Huerta-Espino *et al.*, 2023; Martínez-Moreno *et al.*, 2021), como para roya del tallo (Olivera *et al.*, 2021).

Al analizar los orígenes de las colectas se identificaron 23 posibles fuentes de resistencia (Cuadro 3), aunque no se descarta la posibilidad que a nivel de genes de resistencia éstos puedan ser similares. En 11 de los orígenes de las colectas se identificaron los dos grupos de resistencia indicados en el Cuadro 3, mientras que en otras siete sólo se identificaron genotipos resistentes en planta adulta, y en cinco orígenes, genotipos con resistencia en plántula y planta adulta. Los resultados en la identificación de trigos criollos resistentes a la roya de la hoja provenientes de Etiopía ponen de manifiesto la importancia de mantener la diversidad genética en los centros de diversificación, ya sea en los bancos de germoplasma o cuando sea posible *in situ*.

CONCLUSIONES

De 194 genotipos de trigo cristalino provenientes de Etiopía se identificaron 98 genotipos criollos y cinco mejorados resistentes a la raza BBG/BPCJ de *P. triticina*. Algunos genotipos resistentes a la raza BBG/BPCJ fueron susceptibles a la raza BBG/BPCJ. Entre los genotipos criollos resistentes se identificaron genotipos con resistencia en todas las etapas de crecimiento, y genotipos con resistencia sólo en planta adulta. Los genotipos resistentes pueden ser utilizados como progenitores en programas de mejoramiento genético para incorporar resistencia a roya de la hoja en trigos cristalinos.

Cuadro 2. Grupos de genotipos criollos y mejorados con base en su respuesta en plántula y planta adulta ante la inoculación con la raza BBG/BPCJ de *P. triticina*.

Plántula	Planta adulta	Criollos [†]	%	Mejorados [†]	%
Resistentes	Resistentes	51	30	4	16
Resistentes	Intermedios	6	4	1	4
Susceptibles	Resistentes	41	24	0	0
Susceptibles	Susceptibles	71	42	20	80
Totales		169	100	25	100

[†] Número de genotipos en cada grupo, %: porcentaje relativo de genotipos con respecto al total.

Cuadro 3. Grupos de genotipos criollos susceptibles en plántula y resistentes en planta adulta (SPL/RPA), y resistentes en plántula y planta adulta (RPL/RPA).

Grupos	SPL/RPA [†]	RPL/RPA ^{††}	Total por grupo
1	2000/01 population 25-23 BDI	6	13
2	DW-A-I	4	6
3	WC-2	2	6
4	DW-K-I	1	6
5	CD-1	4	5
6	2000/01 population FR	2	3
7	2000/01 population 75-51 FR	1	3
8	2000/01 population 37-30 BDI	3	1
9	DW-K2	2	1
10	WC-4	1	1
11	DW-B1	1	0
12	WC-12	4	0
13	WC-14	2	0
14	DW-A-3	4	0
15	DW-B-3	3	0
16	WC-16	2	0
17	2000/01 population 14	1	0
18	WC-5	1	0
19	WC-1	0	1
20	Shoa-28	0	1
21	Gojam-24	0	2
22	DW-A-4	0	2
23	Gojam-23	0	2
Total por tipo de resistencia		44	54
			98

[†]SPL/RPA: susceptibles en plántula y resistentes en planta adulta, ^{††}RPL/RPA: resistentes en plántula y planta adulta.

BIBLIOGRAFÍA

- Adenow Y., M. Hulluak, G. Belay and Tesemma (1997) Resistance and tolerance to leaf rust in Ethiopian tetraploid wheat landraces. *Plant Breeding* 116:533-536, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1997.tb02185.x>
- Aoun M., M. Breiland, M. K. Turner, A. Loladze, S. Chao, S. S. Xu and M. Acevedo (2016) Genome-wide association mapping of leaf rust response in a durum wheat worldwide germplasm collection. *The Plant Genome* 9:plantgenome2016.01.0008, <https://doi.org/10.3835/plantgenome2016.01.0008>
- Belay G., T. Tesemma and K. Mohammed (1991) Utilization of exotic durum wheat germplasm in Ethiopia. In: Proceedings of the Sixth Regional Wheat Workshop for Eastern, Central and Southern Africa. D. G. Tanner, M. van Ginkel and W. Muangi (eds). CIMMYT. Mexico, D. F. pp:52-58.
- DeLacy I. H., B. Skovmand and J. Huerta (2000) Characterization of Mexican wheat landraces using agronomically useful attributes. *Genetic Resources and Crop Evolution* 47:591-602, <https://doi.org/10.1023/A:1026550624037>
- Delgado-Sánchez L. M., J. Huerta-Espino, M. C. López-Peralta, I. Benítez-Riquelme y E. Hernández-Meneses (2016) Genética de la resistencia a *Puccinia triticina* Eriks en trigos cristalinos invernales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:133-139, <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.2.133-139>
- Evenson R. E. and S. Lemaire (1998) Optimal collection and search for crop genetic resources. In: Farmers, Gene Banks and Crop Breeding: Economic Analyses of Diversity in Wheat, Maize, and Rice. M. Smale (ed.). Kluwer Academic Publishers. London, UK. pp:79-92, https://doi.org/10.1007/978-94-009-0011-0_5
- Figueroa M., K. E. Hammond-Kosack and P. S. Solomon (2018) A review of wheat diseases—a field perspective. *Molecular Plant Pathology* 19:1523-1536, <https://doi.org/10.1111/mpp.12618>
- Figueroa-Lopez P., J. L. Félix-Fuentes, G. Fuentes-Dávila, V. Valenzuela-Herrera, G. Chávez-Villalba y J. A. Mendoza-Lugo (2010) CIRNO C2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:739-744.
- Giunta F., R. Motzo and R. Pruneddu (2007) Trends since 1900 in the yield potential of Italian-bred durum wheat cultivars. *European Journal of Agronomy* 27:12-24, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.01.009>
- Herrera-Foessel S. A., R. P. Singh, J. Huerta-Espino, J. Yuen and A. Djurle (2005) New genes for resistance to leaf rust in CIMMYT durum wheats. *Plant Disease* 89:809-814, <https://doi.org/10.1094>

- PD-89-0809
- Huerta E. J., M. E. Rodríguez C., M. F. Rodríguez G., H. E. Villaseñor M., S. G. Leyva M. y E. Espitia R. (2011) Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* E. en trigos duros de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34:35-41, <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.1.35>
- Huerta-Espino J. and A. P. Roelfs (1989) Physiological specialization of leaf rust on durum wheat. *Phytopathology* 79:1218.
- Huerta-Espino J. and R. P. Singh (1996) Misconceptions on the durability of some adult plant resistance genes in wheat. Proceedings of the 9th European and Mediterranean Cereal Rusts and Powdery Mildew Conference. Lunteren, The Netherlands. pp:109-111.
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, S. A. Herrera-Foessel, J. B. Perez-Lopez and P. Figueroa-López (2009) First detection of virulence in *Puccinia triticina* to resistance genes *Lr27 + Lr31* present in durum wheat in Mexico. *Plant Disease* 93:110, <http://doi.org/10.1094/PDIS-93-1-0110C>
- Huerta-Espino J., H. E. Villaseñor-Mir, R. P. Singh, J. B. Pérez-López, K. Ammar, E. García-León y E. Solís-Moya (2017) Evaluación de líneas y variedades de trigo cristalino a la raza de la roya de la hoja BBG/BP_CIRNO causada por *Puccinia triticina* E. que venció la resistencia de Cirno C2008. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35:S96-S97.
- Huerta-Espino J., R. Singh, L. A. Crespo-Herrera, H. E. Villaseñor-Mir, M. F. Rodríguez-García, S. Dreisigacker, ... and E. Lagudah (2020) Adult plant slow rusting genes confer high levels of resistance to rusts in bread wheat cultivars from Mexico. *Frontiers in Plant Science* 11:824, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00824>
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, H. E. Villaseñor-Mir and K. Ammar (2023) Mining sources of resistance to durum leaf rust among tetraploid wheat accessions from CIMMYT's germplasm bank. *Plants* 12:49, <https://doi.org/10.3390/plants12010049>
- Martínez-Moreno F., P. Giraldo, M. M. Cátedra and M. Ruiz (2021) Evaluation of leaf rust resistance in the Spanish core collection of tetraploid wheat landraces and association with ecogeographical variables. *Agriculture* 11:277, <https://doi.org/10.3390/agriculture11040277>
- Negassa M. (1986) Estimates of phenotypic diversity and breeding potential of Ethiopian wheat. *Hereditas* 104:41-48, <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1986.tb00515.x>
- Olivera P. D., W. D. Bulbula, A. Badebo, H. E. Bockelman, E. A. Ede and Y. Jin (2021) Field resistance to wheat stem rust in durum wheat accessions deposited at the USDA National Small Grains Collection. *Crop science* 61:2565-2578, <https://doi.org/10.1002/csc.2.20466>
- Peterson R. F., A. B. Campbell and A. E. Hannah (1948) A diagrammatic scale for estimating rust intensity of leaves and stem of cereals. *Canadian Journal of Research* 26C:496-500, <https://doi.org/10.1139/cjr48c-033>
- Qureshi N., H. Bariana, V. V. Kumran, S. Muruga, K. L. Forrest, M. J. Hayden and U. Bansal (2018) A new leaf rust resistance gene *Lr79* mapped in chromosome 3BL from the durum wheat landrace Aus26582. *Theoretical and Applied Genetics* 131:1091-1098, <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3060-3>
- Roelfs A. P., R. P. Singh y E. E. Saari (1992) Las Royas del Trigo: Conceptos y Métodos para el Manejo de esas Enfermedades. CIMMYT. México, D. F. 81 p.
- Sall A. T., T. Chiari, W. Legesse, K. Seid-Ahmed, R. Ortiz, M. van Ginkel and F. M. Basi (2019) Durum wheat (*Triticum durum* Desf.): origin, cultivation, and potential expansion in Sub-Saharan Africa. *Agronomy* 9:263, <https://doi.org/10.3390/agronomy9050263>
- SAS Institute (2022) The SAS System for Windows User's Guide. Release 9.4. SAS Institute. Cary, North Carolina, USA. 35 p.
- Sentayehu A. S., S. Chebotar, X. Huang, M. Röder and A. Börner (2004) Genetic diversity in Ethiopian hexaploid and tetraploid wheat germplasm assessed by microsatellite markers. *Genetic Resources and Crop Evolution* 51:559-567, <https://doi.org/10.1023/B:GRES.0000024164.80444.f0>
- Singh R. P. (1991) Pathogenicity variations of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* and *P. graminis* f. sp. *tritici* in wheat-growing areas of Mexico during 1988 and 1989. *Plant Disease* 75:790-794.
- Singh R. P., J. Huerta-Espino, W. Pfeiffer and P. Figueroa-López (2004) Occurrence and impact of a new leaf rust race on durum wheat in Northwestern Mexico from 2001 to 2003. *Plant Disease* 88:703-708, <https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.7.703>
- Van der Plank J. E. (1975) Principles of Plant Infection. Academic Press. New York, USA. 216 p <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-711460-6.50002-6>