

RENDIMIENTO DE GRANO Y RESISTENCIA A ROYA EN POBLACIONES DE TRIGO OBTENIDAS MEDIANTE SELECCIÓN

GRAIN YIELD AND YELLOW RUST RESISTANCE IN POPULATIONS OF WHEAT OBTAINED BY SELECTION

Ernesto Solís Moya^{1*}, José D. Molina Galán², Héctor Eduardo Villaseñor Mir³ y José Sergio Sandoval Islas⁴

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental El Bajío, Programa de Trigo. Apdo. Postal 112 Celaya Gto. Tel. 01 (461) 15431 y 15262. Correo electrónico: esolism6@prodigy.net.mx ² Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Especialidad de Genética. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. C.P. 56230. Montecillo Estado. de México. Tel. y Fax: 01(595) 95-20200. ³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Valle de México. Programa de Trigo. Apdo. Postal 10. C.P. 56230, Chapingo, Estado de México. ⁴ Colegio de Postgraduados, Instituto de Fitosanidad, Especialidad de Fitopatología. Carr. México-Texcoco. C.P. 56230. Montecillo Estado de México. Tel. y Fax: 01(595) 95-20200 Ext. 1619.

* Autor responsable

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo con el propósito de evaluar pérdidas de rendimiento de grano de trigo ocasionadas por roya lineal amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) y valorar la efectividad de la selección masal visual recurrente para generar genotipos con alto rendimiento de grano y resistentes a la roya lineal amarilla. Se evaluaron los ciclos de selección C₀ a C₇ generados mediante la metodología MSFRS (Male Sterile Facilited Recurrent Selection), alternada en Chapingo, Estado de México (verano) y Roque, Guanajuato (invierno), de 1992 a 1997. En el ciclo de cultivo de otoño - invierno (OI) 1998-99 se realizaron cuatro experimentos en dos fechas de siembra (1 y 16 de diciembre): dos bajo la presión de la roya lineal amarilla y dos libres de ella. El tratamiento con protección contra la roya lineal amarilla mediante fungicida rindió en promedio 30 % más grano por unidad de superficie que el tratamiento sin protección. Al considerar las cinco mejores familias de cada ciclo de selección, se observó que las de mayor rendimiento de grano fueron las más susceptibles a roya lineal amarilla; sin embargo, al considerar las 240 familias incluidas en el estudio, es posible detectar variedades con alto potencial de rendimiento y resistentes a la roya lineal amarilla.

Palabras clave: *Triticum aestivum*, *Puccinia striiformis*, selección masal, pérdidas en rendimiento, resistencia a la roya lineal amarilla.

SUMMARY

The purpose of this work was to evaluate the grain yield losses caused by yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*), as well as to evaluate the effectiveness of the recurrent visual selection to produce high yield and high resistance to yellow rust genotypes. The cycles C₀ to C₇ of recurrent visual selection generated by application of the MSFRS (Male Sterile Facilited Recurrent Selection) methodology alternated at Chapingo, México (Summer) and Roque, Guanajuato (Winter) during the 1992 to 1997 were evaluated. In the Autumn - Winter 1998-99 cycle four experiments were carried out in two planting dates (December 1 and 16): two of such experiments were conducted under yellow rust infection and the other two were yellow rust free by chemical treatment. The later yielded 30 % more than the treatment without protection. When considering the best five families of each selection cycle, it was observed that those families with highest grain yield were also the most susceptible to yellow rust; however,

when considering the 240 families included in the study, it was possible to detect varieties with best high yield potential and resistant to yellow rust.

Index words: *Triticum aestivum*, *Puccinia striiformis*, mass selection, yield losses, yellow rust resistance.

INTRODUCCIÓN

En el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.), las enfermedades que atacan las hojas u otras partes de las plantas merman el rendimiento del grano al reducir la cantidad y composición de asimilados disponibles para el desarrollo del grano (Cox *et al.*, 1997). La roya lineal amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) es una enfermedad que causa daños importantes al trigo a nivel mundial (Zwer y Qualset, 1994). Torabi y Nazari (1998) observaron pérdidas de 30 % en el rendimiento y Roelfs (1978) de hasta 75 %. Tales pérdidas se deben generalmente al arrugamiento del grano, pero cuando la enfermedad es severa antes del embuche también puede disminuir el número de macollos (Roelfs *et al.*, 1992). La resistencia genética de las plantas a estas enfermedades se ha considerado el mejor método de control desde el punto de vista económico y ambiental (Ma *et al.*, 1997).

Con el propósito de generar genotipos resistentes a enfermedades, los mejoradores han usado, entre otros métodos, la hibridación interespecífica para enriquecer la base de genes del trigo para resistencia (Cox *et al.*, 1997). McIntosh *et al.* (1995) encontraron que 20 de los 43 genes de trigo que confieren resistencia a roya de la hoja fueron transferidos de otras especies. En la última década se han explorado varias especies de *Triticum* en busca de fuentes de resistencia a roya lineal, entre ellas *T. monococcum*, *T. dicoccoides* y varias especies de *Aegilops* (Ma *et al.*,

1997). La resistencia a enfermedades o la resistencia a algún tipo de estrés, está asociada a una reducción en el rendimiento potencial en maíz (*Zea mays* L.) (Martín y Russell, 1984).

En muchos casos se desconoce si la reducción en la capacidad productiva del cultivo es debida a los costos metabólicos del carácter *per se*, a efectos pleiotrópicos o al ligamiento con factores negativos para el rendimiento del grano, como fue establecido para el caso de pepino (*Cucumis sativus* L.) cuando se seleccionó por resistencia a varias enfermedades (Staub y Grumet, 1993). En maíz se observó una relación negativa entre el rendimiento y la resistencia al acame (Davis y Crane, 1976). En trigo, Knott (1989) transfirió genes de resistencia a roya de la hoja (*Puccinia triticina* E. sp. *tritici* antes *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*) de nueve especies a cultivares comerciales de trigo; de cinco de las fuentes se desarrollaron líneas con rendimiento de grano equivalente al de los testigos, pero ello no fue posible en las poblaciones derivadas de las otras cuatro fuentes. Según Cox *et al.* (1997), dos de los siete genes de resistencia a roya del tallo provenientes de especies relacionadas, están asociados con una depresión del rendimiento de grano del trigo.

El gene *Lr34* se ha utilizado exitosamente para incorporar resistencia a roya de la hoja a nivel mundial (McIntosh *et al.*, 1995); sin embargo, tal gene está ligado al que produce la necrosis apical en la hoja bandera, cuyos síntomas se presentan alrededor de la floración, y se manifiesta como una necrosis de 2 a 3 cm en la punta de las hojas y que en ocasiones se extiende de 3 a 4 cm adicionales (Singh, 1992). Drijepondt *et al.* (1990) y Singh y Huerta-Espino (1997) consignan el posible efecto negativo de la necrosis de la punta de la hoja, como el responsable de la reducción del rendimiento de grano en parcelas libres de la enfermedad. Singh y Huerta-Espino (1997), al evaluar líneas casi isogénicas derivadas de la variedad Jupateco 73 con y sin el gene *Lr34*, encontraron que el rendimiento de Jupateco 73R (resistente) fue 5.3 % menor ($P \leq 0.05$) que el de Jupateco 73S (susceptible), así como reducciones significativas en biomasa, semillas por espiga y granos por metro cuadrado en ausencia de roya de la hoja; en parcelas no protegidas contra la roya, los genotipos portadores del gene *Lr34* alcanzaron un nivel de enfermedad de hasta 40 % y esto redujo el rendimiento en 15 %, mientras que en las líneas que no poseían este gene (Jupateco 73S), las pérdidas en rendimiento fueron entre 43 y 84 %.

La selección recurrente es un procedimiento efectivo para incrementar en forma progresiva la frecuencia de genes favorables a la expresión de caracteres de naturaleza cuantitativa (Villaseñor, 1996); también reduce el tiempo entre ciclos de recombinación, proporciona avances gené-

ticos altos, mantiene la variabilidad genética en las poblaciones recombinantes, y posiblemente rompe bloques de ligamiento (Benítez, 1998). Entonces, en poblaciones androestériles de trigo después de varios ciclos de recombinación sería posible obtener genotipos con alto potencial productivo y con resistencia a las royas. El presente trabajo tuvo como base esta hipótesis y sus objetivos fueron evaluar el efecto de la roya lineal amarilla sobre el rendimiento de grano de siete ciclos de selección masal visual recurrente para rendimiento de grano en trigo, y valorar la efectividad de esta estrategia de mejoramiento en la generación de genotipos altamente productivos y resistentes a roya lineal amarilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en Roque, Celaya, Guanajuato (20° 32' L. N; 100° 48' L. O; 1752 m.s.n.m.; con precipitación y temperatura media anual de 578 mm y 19.8 °C, respectivamente). Se midió bajo riego el rendimiento de grano y el daño causado por roya lineal amarilla, en 30 familias F₅ de cada una de ocho poblaciones de trigo (C₀-C₇), en las cinco variedades con las que se formó la población C₀, la cual se identificó en este trabajo como C₈, y la población C₉ formada por cinco variedades testigo adaptadas a las condiciones de cultivo de El Bajío (Cuadro 1). Todas las variedades son de trigo harinero.

Cuadro 1. Ciclos de selección, progenitores y testigos evaluados en los experimentos.

Ciclos de selección	Progenitores (C ₈)	Variedades testigo (C ₉)
C ₀	Arandas F90	Cortazar S94
C ₁	Gálvez M87	Salamanca S75
C ₂	Temporalera M87	Eneida F94
C ₃	Seri M82	Gracia
C ₄	Pavón F76	Saturno S86
C ₅		
C ₆		
C ₇		

Los compuestos C₁ a C₇ se generaron mediante selección masal visual recurrente para rendimiento de grano, a partir de la población C₀; la selección se hizo alternadamente en Chapingo, Estado de México en verano y Roque, Celaya, Guanajuato en invierno, de 1992 a 1997. Se utilizó la metodología descrita por Villaseñor (1996), conocida como MSFRS (male sterile facilitated recurrent selection). Durante la selección no se ejerció presión del patógeno.

Se sembraron dos experimentos el 1 de diciembre de 1998 y dos el 16 del mismo mes y año; un experimento de cada fecha de siembra se mantuvo bajo el ataque de roya lineal amarilla y en el otro se controló esta enfermedad mediante dos aplicaciones de Folicur 250 CE (Tebuconazole) a una dosis de 125 g de I. A. ha⁻¹.

Se usó un diseño experimental alfa láctico, de 25 bloques incompletos, sublotos de 10 genotipos y dos repeticiones. La parcela experimental constó de cuatro surcos de tres metros de largo y 30 cm de separación, dejando un surco libre entre parcelas para facilitar la toma de lecturas de roya. Las parcelas fueron separadas por calles de un metro de ancho. En los experimentos sin control químico de la roya se sembraron en las calles, frente a cada parcela, semillas de la variedad Moroco, altamente susceptible a la roya lineal amarilla (Broers, 1997), para que las plantas sirvieran como diseminadoras de la enfermedad. Para iniciar la epidemia, las plántulas de Moroco se inocularon 28 días después de la siembra (estado de crecimiento 21-30, del código decimal de Zadoks *et al.*, 1974). La inoculación se hizo mediante la inyección de 0.5 mL de una suspensión de esporas de *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici.*, aislamiento virulento para el gene *Yr9*, patotipo 96.11, que tiene la siguiente fórmula de avirulencia/virulencia *Yr1*, 4, 5, 8, 15, 17/2, 3, 6, 7, 9, 10, 27, basado en las líneas diferenciales derivadas de Avocet (Singh *et al.*, 2000). La suspensión inyectada se preparó con aproximadamente 2 g de esporas liofilizadas por litro de agua, más seis gotas de Tween 20.

Se hicieron lecturas por parcela de la severidad de la roya lineal amarilla con base en la escala modificada de Cobb (Peterson *et al.*, 1948). Las lecturas se tomaron con intervalo de una semana, desde la aparición de los primeros síntomas en la hoja bandera hasta que el cultivar más susceptible llegó a 100 % de daño, lo cual sucedió cuatro semanas después de iniciada la infección.

Con las lecturas se calculó el área bajo la curva de progreso de la roya lineal amarilla (ABCRL), de acuerdo con la fórmula de Pandey *et al.* (1989):

$$ABCRL = \sum_{i=1}^n [(X_i + X_{i+1}) / 2] t_i$$

donde: X_i = porcentaje de severidad en el tiempo i
 t_i = tiempo en días entre la observación X_i y X_{i+1}
 n = número de observaciones.

También se determinó el porcentaje de severidad final de roya (Y_i), en cada parcela, cuando los genotipos susceptibles alcanzaron 100 % de infección.

Se registraron las siguientes etapas fenológicas en número de días: amacollo (inicio), encañe (aparición del primer nudo), embuche (espiga envuelta por la vaina de la hoja bandera y barbas visibles), espigamiento (emisión completa de al menos 50 % de las espigas en la parcela), floración (anteras visibles en al menos 50 % de las espi-

gas), grano lechoso (en la porción central de la espiga, y en al menos en 50 % de las espigas, el endospermo es de apariencia lechosa), grano masoso (los granos de la porción central de la espiga contienen endospermo sólido) y madurez fisiológica (la hoja bandera y el cuello de la espiga se tornan de un color amarillento).

Durante el desarrollo de los experimentos se tomaron datos de temperatura con las cuales se calcularon las unidades calor para cada etapa fenológica registrada, empleando una temperatura base de 5 °C con el método residual (Villalpando, 1984).

Se midió el rendimiento de grano de cada parcela, ajustado a 12 % de humedad. Se hizo un análisis de varianza y se hicieron pruebas de comparaciones de medias (Tukey 0.05) para la variable rendimiento de grano entre tratamientos de fungicida, fechas de siembra (FS) y ciclos de selección, utilizando los datos de las 30 familias, de las 10 y de las 5 mejores familias de cada ciclo. Se calculó la correlación fenotípica entre el rendimiento de grano y ABCRL y Y_i entre las 30 familias de cada ciclo, en el total de 240 entradas, así como en las 10 mejores familias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se presentan los datos fenológicos de los genotipos, agrupados por tratamiento de fungicida, fecha de siembra y ciclo. La roya tuvo un ligero efecto sobre la duración del ciclo biológico promedio (floración y madurez fisiológica) de los materiales genéticos probados. La fecha de siembra tuvo un mayor efecto sobre el ciclo biológico, acentuándose a partir del embuche; en la primera FS se requirió de periodos más largos que en la segunda FS, para alcanzar la siguiente etapa fenológica. Las poblaciones presentaron diferencias hasta después de la etapa de amacollamiento; el ciclo C_3 fue el más precoz y los ciclos C_5 , C_7 y las variedades progenitoras las más tardías, aunque la diferencia entre estas últimas y C_3 sólo fue de cuatro días desde la siembra hasta la madurez. Al comparar el ciclo biológico promedio de las poblaciones con el de las variedades progenitoras, se encontró que la selección masal visual recurrente produjo una disminución del ciclo, particularmente entre las etapas de encañe a floración, aunque no se observó una tendencia con el avance generacional. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Martínez *et al.* (1999) en maíz, quienes encontraron que la duración del ciclo se incrementó por efecto de la selección masal visual estratificada.

La epidemia comenzó en la etapa de espigamiento de los genotipos en la primera FS y en la etapa de embuche en la segunda FS (Figura 1). Después de detectarse las primeras pústulas de roya sobre la hoja bandera, la

Cuadro 2. Número de días por etapa fenológica de siete ciclos de selección (C0 a C7) progenitores (C8) y testigos (C9) evaluados con y sin control químico de la roya lineal amarilla en dos fechas de siembra y unidades calor acumuladas en cada estado fenológico.

Tratamiento	Amacollamiento (21)*	Encañe (31)	Embucho (49)	Espigamiento (59)	Floración (65)	Lechoso medio (75)	Masoso suave (85)	Madurez fisiológica (91)
Funguicida								
Con	25	56	80	89	94	112	130	141
Sin	25	56	80	90	95	112	129	139
FS								
I	26 (256)**	56 (491)	82 (756)	93 (876)	98 (932)	116 (1147)	135 (1431)	146 (1598)
II	24 (212)	56 (512)	77 (717)	86 (819)	91 (874)	108 (1092)	124 (1343)	134 (1500)
Ciclo								
0	25	56	80	90	95	112	130	140
1	25	55	79	89	94	111	129	139
2	25	56	80	89	94	112	129	139
3	25	52	76	85	91	109	127	138
4	25	56	80	89	94	112	129	139
5	25	57	81	91	96	113	130	141
6	25	56	80	89	94	112	129	140
7	25	57	80	90	96	113	130	141
8***	25	61	86	96	101	117	132	142
9***	25	56	77	87	91	110	128	139

* Etapa fenológica de acuerdo al código decimal de Zadoks *et al.* (1974); ** unidades calor (temperatura base 5 °C); *** promedio de 40 observaciones.

enfermedad tuvo un desarrollo lento en la primera semana en las dos FS y un desarrollo rápido en el periodo entre la tercera y cuarta lectura, intervalo en el cual varios genotipos alcanzaron 100 % de infección. A excepción de las variedades progenitoras, los ciclos de selección presentaron valores muy similares de severidad en las dos primeras lecturas; no así en la tercera y cuarta lecturas en la que el ciclo C5 registró valores muy bajos en comparación con los ciclos más susceptibles (C3 y C4). Estos resultados se atribuyen a que sólo los ciclos C4 y C5 fueron seleccionados en El Bajío en el ciclo O-I, ambiente donde es común la roya lineal amarilla; sin embargo como no se practicó la inoculación artificial, no hubo roya en el material donde se obtuvo el ciclo C4, lo cual propició la selección de genotipos susceptibles. Los reducidos valores de infección observados en el promedio de las variedades progenitoras, hacen suponer que la susceptibilidad de las poblaciones a la roya amarilla se debe a la fuente de androesterilidad usada en la formación de la población objeto de estudio.

Por otra parte si bien se inoculó con una raza de roya nueva en la región (la común hasta 1996 era la 14E14), se esperaba que al menos las familias de los ciclos de selección más avanzados mostraran resistencia en la fase adulta de la planta, la cual es considerada poligénica (Robinson, 2000); sin embargo, los valores promedio, tanto de los ciclos iniciales de selección como de los más avanzados, fueron más altos que el de las variedades progenitoras, lo cual indica que es necesaria la inoculación artificial para obtener genotipos resistentes a roya lineal amarilla.

En presencia de roya lineal amarilla, los 250 genotipos evaluados registraron valores promedio de 54.5 y 50 % de ABCRL y severidad final, respectivamente (Cuadro 3).

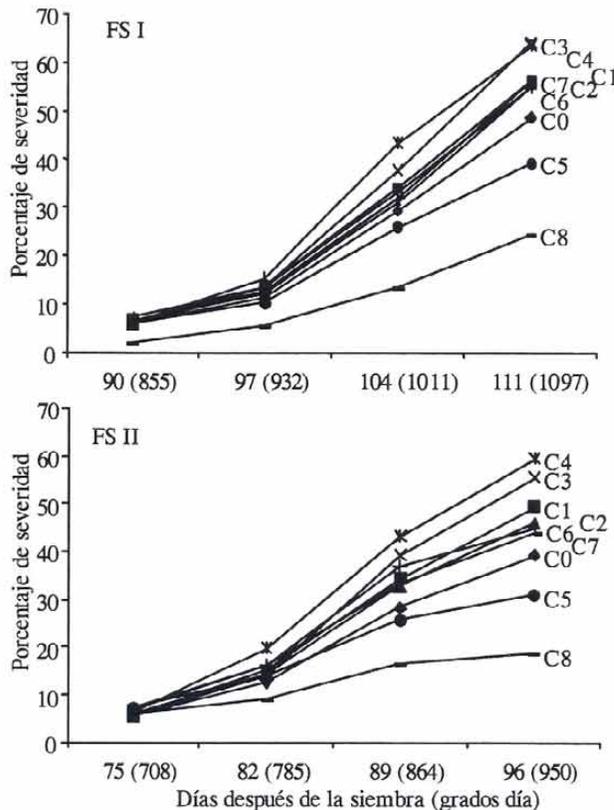


Figura 1. Severidad de la roya lineal amarilla sobre la hoja bandera de ocho poblaciones de trigo generadas por selección recurrente y variedades progenitoras (C8) evaluadas en dos fechas de siembra FS I y FS II (1 y 16 de diciembre de 1998).

Los valores de ABCRL no mostraron diferencias significativas entre FS, pero las hubo para la variable Yr. Las parcelas sin protección de fungicida, mostraron altos valores de severidad por roya y rindieron 30.1 % menos grano que las protegidas; esta diferencia fue más de tres veces

Cuadro 3. Efecto medio de la roya lineal amarilla sobre el rendimiento de grano de 250 genotipos de trigo harinero evaluados con y sin fungicida en dos fechas de siembra.

Tratamiento	ABCRL	Y _t	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Diferencias
Fungicida				
Con	0	0	6261 a*	1882
Sin	545	50	4379 b	
Sin fungicida				
FS I	547 a	54 a	4648 a	540
FS II	543 a	45 b	4108 b	
Con fungicida				
FS I			6509 a	496
FS II			6013 b	

* Valores con la misma letra en la misma columna son iguales (Tukey, 0.05).

mayor que la inducida por el factor FS en ausencia de la roya; en ambos casos las diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$) para la variable rendimiento de grano. Las pérdidas en el rendimiento de grano inducidas por la FS tardía (16 de diciembre) en los tratamientos sin protección de fungicidas (11.6 %), fueron ligeramente mayores a las registradas entre fechas de siembra con control de roya (7.6 %). La roya lineal redujo en 28.5 % el rendimiento de los genotipos sembrados en la primera FS, y en 31.7 % en la segunda FS. Esto quizás se debió a que la segunda FS estuvo expuesta desde etapas fenológicas más tempranas al daño de la roya, lo que propició que los genotipos más susceptibles alcanzaran 100 % de infección alrededor del periodo de antesis; en cambio, en la primera FS, este nivel de daño se alcanzó hasta la etapa de grano lechoso.

Es importante resaltar el valor que tiene la etapa fenológica cuando se alcanza un nivel de infección de 100 %. Al respecto, Castro y Ramos (1981) consignan la reducción del rendimiento cuando se alcanza 100 % de infección de roya de la hoja en las siguientes etapas fenológicas: entre el estado de plántula y el amacollamiento, 95 %; en el ancañe, 70 %; en el embuche, 50 %; en floración, 35 %; en el estado lechoso del grano, 20 % y en el estado masoso del grano 10 %. En el presente estudio las pérdidas fueron de 28.5 % y 31.7 % para la primera y segunda FS, respectivamente, en las parcelas sin control de roya. La infección de 100 % sólo se observó en algunos genotipos, y cuando esto sucedió, el promedio de severidad para la primera y segunda fechas fue de 54 y 45 %, respectivamente.

Al considerar las 30 familias por ciclo de selección, se observó que no hubo un incremento en la resistencia a la roya lineal en los ciclos más avanzados (Cuadro 4), como resultado de la aplicación de la selección masal visual recurrente para rendimiento de grano; así mismo, aunque estos ciclos estuvieron entre los de mayor rendimiento, no mostraron un incremento lineal en este carácter. Las familias que conformaron el C₅ tuvieron los promedios más ba-

jos de ABCRL y Y_t, y los rendimientos de grano más altos en los tratamientos con y sin control de roya, en las dos fechas de siembra. El C₄ alcanzó los niveles de roya más altos en ambas FS y fue el de más bajo rendimiento de grano en el tratamiento con roya; en cambio, en el tratamiento sin roya superó numéricamente a los ciclos C₀, C₁ y C₃ en la primera FS y a los ciclos C₀, C₁, C₂, C₃, C₆ y C₇ en la segunda fecha. El C₃ fue el ciclo más susceptible a roya después del C₄ y en el tratamiento sin roya presentó el rendimiento más bajo en la primera FS y obtuvo rendimientos superiores numéricamente a los ciclos C₀ y C₁ en la segunda FS.

Los resultados obtenidos con el C₅ indican una tendencia negativa entre rendimiento y resistencia a roya lineal. El comportamiento del C₃ apoya también esta relación, ya que en él hubo altos niveles de roya y rendimientos muy bajos. Sin embargo, los datos de C₄ contradicen estos resultados, tal vez porque este ciclo está formado por líneas que tienen rendimientos altos y son susceptibles a la roya lineal, lo que pudiera indicar que en los primeros ciclos de selección (C₁ a C₄) no existe aún la suficiente recombinación genética que permita a un genotipo mostrar alta productividad y resistencia a royas.

Al analizar el rendimiento de las mejores 10 familias de cada población en el tratamiento con aplicación de fungicida (Cuadro 5), se observaron diferencias numéricas en la primera FS y significativas ($P \leq 0.05$) en la segunda. En este caso los ciclos más avanzados superaron numéricamente al ciclo C₅ que fue el más productivo al considerar las 30 familias, aunque en la segunda fecha los ciclos C₆ y C₇ mostraron rendimientos numéricos inferiores a C₅. En el tratamiento con roya los ciclos con las familias más resistentes presentaron los mayores rendimientos de grano en ambas fechas de siembra. Las 10 mejores familias de los ciclos C₅, C₆, C₇ y C₀ presentaron estadísticamente el mismo nivel de resistencia a roya (Y_t) en la primera fecha; sin embargo, el C₀ obtuvo el menor rendimiento de las ocho poblaciones y fue superado numéricamente por los ciclos C₂, C₃, C₄ y C₁, que registraron mayor nivel de infección de roya.

Estos resultados indican que los ciclos con mayor recombinación genética, como son los ciclos C₅, C₆ y C₇, expresaron altos rendimientos y mayor resistencia a roya lineal al menos en la primera fecha de siembra; en cambio, el ciclo con menor recombinación genética (C₀) obtuvo un nivel de resistencia similar a los ciclos más avanzados, pero con rendimientos más bajos. Esto sugiere que con mayor recombinación genética sería posible obtener genotipos altamente productivos y resistentes a royas.

Cuadro 4. Efecto de la roya lineal amarilla sobre el rendimiento de grano (kg ha⁻¹) de ocho poblaciones, variedades progenitoras y variedades regionales de trigo harinero evaluadas en dos fechas de siembra y dos tratamientos de fungicida.

Ciclos	Fecha de siembra I				Fecha de siembra II			
	ABCRL	Y _r	RENCR	RENSR	ABCRL	Y _r	RENCR	RENSR
4	675 a*	63 a	4296 c	6552 ab	693 a	59 a	3695 c	6147 ab
3	623 ab	64 a	4549 bc	6179 b	609 b	55 a	4076 b	5907 b
1	577 b	56 b	4591 bc	6252 b	560 bc	49 b	4064 b	5723 b
6	567 b	54 bc	4665 b	6673 a	581 bc	45 b	4085 b	6080 ab
7	555 bc	56 b	4645 b	6628 ab	555 bc	44 bc	3989 b	5925 ab
2	538 bc	55 b	4564 bc	6567 ab	535 c	46 b	4169 b	5980 ab
0	494 c	48 c	4585 bc	6222 b	463 d	39 c	4029 b	5838 b
5	432 d	39 d	5004 a	6759 a	437 d	31 d	4497 a	6232 a
DSH	61	7	299	390	56	6	200	325

ABCRL = área bajo la curva de progreso de la roya lineal amarilla; Y_r = porcentaje de severidad final; RENCRCR = rendimiento de grano de parcelas sin protección a roya; RENSRCR = rendimiento de grano de parcelas con protección a roya; Valores con la misma letra dentro de la misma columna son iguales (Tukey, 0.05).

Cuadro 5. Efecto de la roya lineal amarilla sobre el rendimiento de grano (kg ha⁻¹) de las mejores 10 familias de ocho poblaciones obtenidas por selección masal visual recurrente para rendimiento de grano, evaluadas en dos fechas de siembra y dos tratamientos de fungicida

Ciclos	Fecha de siembra I				Fecha de siembra II			
	ABCRL	Y _r	RENCR	RENSR	ABCRL	Y _r	RENCR	RENSR
7	494 bc*	45 c	4872 b	7617 a	460 c	31 b	4541 b	6635 a
6	500 bc	44 c	5157 a	7571 a	444 c	34 b	4631 ab	7021 a
5	391 c	38 c	5530 a	7568 a	490 c	33 b	4937 a	7045 a
2	576 b	62 b	4629 b	7415 a	456 c	37 b	4571 ab	6597 a
3	551 b	58 b	5353 a	7397 a	601 b	56 a	4535 b	6524 b
4	783 a	72 a	4008 c	7373 a	716 a	56 a	4107 c	6784 a
1	549 bc	56 b	5141 a	7200 a	469 c	37 b	4458 bc	6786 a
0	443 c	48 c	5155 a	7156 a	451 c	38 b	4492 b	6901 a
DSH	108	11	536	707	97	12	377	467

ABCRL = área bajo la curva de progreso de la roya lineal amarilla; Y_r = porcentaje de severidad final; RENCRCR = rendimiento de grano de parcelas sin protección a roya; RENSRCR = rendimiento de grano de parcelas con protección a roya; * Valores con la misma letra dentro de la misma columna son iguales entre sí (Tukey, 0.05).

Al considerar el rendimiento de las cinco mejores familias de cada ciclo de selección, se observó que, en el tratamiento con protección de roya de la primera fecha, los ciclos C₀, C₃ y C₄ superaron significativamente a las variedades progenitoras y con el resto presentó sólo superioridad numérica (Cuadro 6). En la segunda fecha todos los ciclos superaron significativamente (P ≤ 0.05) a las variedades progenitoras. Las variedades testigo produjeron rendimientos estadísticamente iguales a los mejores ciclos de selección en ambas fechas de siembra. Con relación al porcentaje de severidad final de roya lineal amarilla (Y_r), se observó que el ciclo C₄ fue el más susceptible en ambas FS, el resto incluyendo testigos y progenitores, no mostraron diferencias significativas en la primera fecha de siembra, aunque las diferencias numéricas entre las variedades progenitoras y el C₃ fueron hasta de 42 % en roya y 16 % en rendimiento de grano. La segunda fecha diferenció en mayor grado los ciclos más resistentes y sólo los ciclos C₁, C₅, C₆ y C₇ alcanzaron el nivel de resistencia que expresaron las variedades progenitoras y las testigo.

En el tratamiento sin roya, las familias que conformaron los ciclos C₃ y C₄ tuvieron rendimientos superiores significativamente a las variedades progenitoras, en ambas fechas de siembra pero en el tratamiento con roya fueron las más susceptibles, y estuvieron entre los ciclos que registraron los rendimientos más bajos en ambas fechas.

El análisis de las mejores cinco familias por ciclo pone de manifiesto que los genotipos de los ciclos que superaron estadísticamente el rendimiento de las variedades progenitoras (C₄ y C₃) en ambas fechas de siembra, presentaron menor resistencia genética a enfermedades, lo cual coincide con lo obtenido por Martin y Russell (1984), quienes en maíz observaron resultados similares. Así mismo, Cox *et al.* (1997), quienes compararon en trigo líneas hermanas casi isogénicas con y sin siete genes de resistencia a roya del tallo, observaron que dos de los siete genes estuvieron asociados con una depresión del rendimiento de grano.

Aunque en este estudio no se determinó qué genes de resistencia poseen los genotipos que componen los diferentes ciclos de selección, al parecer existe una asociación

Cuadro 6. Efecto de la roya lineal amarilla sobre el rendimiento de grano (kg ha^{-1}) de las mejores 5 familias de ocho poblaciones obtenidas por selección masal visual recurrente para rendimiento de grano, progenitores (C_6) y variedades testigo (C_7) evaluadas en dos fechas de siembra y dos tratamientos de fungicida.

Ciclos	Fecha de siembra I				Fecha de siembra II			
	ABCRL	Y_f	RENCR	RENSR	ABCRL	Y_f	RENCR	RENSR
3	654 b*	70 ab	4892 ab	8057 a	602 b	57 ab	4684 a	7159 a
4	957 a	84 a	3085 c	7869 a	860 a	75 a	3530 b	7145 a
0	522 bc	49 b	5287 ab	7789 a	689 ab	51 b	4428 ab	7291 a
7	452 bc	44 b	5490 ab	7774 ab	657 ab	43 bc	4410 ab	6932 a
5	322 c	23 b	5326 ab	7761 ab	486 bc	40 bc	4962 a	7144 a
2	594 bc	67 ab	4526 b	7746 ab	595 b	53 b	4418 ab	6655 a
9	260 c	40 b	5815 a	7618 ab	291 c	21 c	5447 a	7213 a
1	373 c	44 b	5391 ab	7611 ab	482 bc	34 bc	4766 a	7184 a
6	579 bc	58 ab	5309 ab	7561 ab	431 bc	32 bc	4894 a	7154 a
8	255 c	28 b	5226 ab	6812 b	294 c	22 c	4619 ab	6450 b
DSH	262	28	1144	963	247	22	1105	821

ABCRL = área bajo la curva de progreso de la roya lineal amarilla; Y_f = porcentaje de severidad final; RENCRCR = rendimiento de grano de parcelas sin protección a roya; RENSRCR = rendimiento de grano de parcelas con protección a roya; DSH = diferencia significativa honesta; * Valores con la misma letra dentro de la misma columna son iguales entre sí (Tukey, 0.05).

negativa entre rendimiento y resistencia a roya lineal, la cual se pone de manifiesto cuando se consideran solamente los genotipos más productivos.

En el Cuadro 7 se presentan los coeficientes de correlación entre la variable rendimiento de grano y las variables ABCRL y Y_f , considerando primero las treinta familias de cada ciclo y posteriormente las 10 familias más rendidoras de cada población. Al considerar las 30 familias por ciclo de selección, sólo en el C_6 se observó una asociación significativa y negativa entre el rendimiento de grano con el ABCRL y el Y_f , lo cual indica que las familias que registraron los rendimientos más altos fueron también las más resistentes a la roya lineal amarilla. Al correlacionar los resultados de las 10 familias de mejor rendimiento de cada ciclo, no se observó asociación entre las variables estudiadas; sin embargo, al correlacionar las medias de rendimiento con las variables epidemiológicas ABCRL y Y_f de las 240 familias (global), se encontró una asociación negativa y altamente significativa, lo cual indica que al considerar un tamaño grande de la población se puede detectar que la selección recurrente incrementa la formación de genotipos de alto rendimiento y resistentes a la roya lineal amarilla; en cambio, al disminuir el número de genotipos es factible observar como los más productivos son más susceptibles a roya.

CONCLUSIONES

El trigo con la aplicación de fungicida para proteger contra la roya lineal amarilla, rindió, en promedio, 30 % más grano por unidad de superficie que el trigo sin protección. Dichas pérdidas en rendimiento fueron 20 % mayores que las ocasionadas por la siembra tardía del cultivo.

Cuadro 7. Correlaciones entre el rendimiento de grano con el ABCRL y Y_f .

Ciclo	Considerando 30 familias por ciclo		Considerando las 10 mejores familias	
	ABCRL	Y_f	ABCRL	Y_f
C_0	-0.0222 ns	0.0511 ns	0.2045 ns	0.0875 ns
C_1	-0.3820 *	-0.3159 ns	-0.3800 ns	-0.3135 ns
C_2	0.1129 ns	0.1635 ns	0.3602 ns	0.1956 ns
C_3	-0.0592 ns	-0.0907 ns	-0.3267 ns	-0.0039 ns
C_4	0.3111 ns	0.2365 ns	0.5121 ns	0.5645 ns
C_5	0.0834 ns	0.0641 ns	-0.4592 ns	0.4585 ns
C_6	-0.5107 **	-0.4402 **	0.3190 ns	0.2728 ns
C_7	-0.2444 ns	-0.2852 ns	0.0106 ns	-0.1799 ns
Progenitores	-0.4708 ns	-0.4818 ns		
Global ^Δ	-0.4899 ***	-0.4579 ***		

ABCRL = área bajo la curva de progreso de la roya lineal; Y_f = porcentaje de severidad final; ^Δ = se consideraron las 240 familias; * y ** = significancia estadística al 0.05 y 0.01 respectivamente; ns = no significativo al 0.05.

Al correlacionar el rendimiento de grano con ABCRL y con Y_f se obtuvo una correlación negativa altamente significativa considerando los resultados de las 240 familias, lo cual indica que al considerar un tamaño grande de la población se puede detectar que la selección recurrente favorece la formación de genotipos de alto rendimiento y resistentes a la roya lineal amarilla.

La correlación entre rendimiento y las variables ABCRL y Y_f , con los datos de las 10 familias más productivas por ciclo de selección, no resultó significativa; sin embargo, el análisis de las cinco mejores familias por ciclo de selección puso de manifiesto que al disminuir el número de genotipos es factible observar como los más productivos son más susceptibles a roya.

BIBLIOGRAFÍA

- Benítez R I (1998)** Comparación de métodos de selección recurrente en trigo: II. Respuesta a la selección en poblaciones sin endogamia. *Agrociencia* 32 (2):139-148.
- Broers L M (1997)** Components of quantitative resistance to yellow rust in ten spring bread wheat cultivars and their relations with field assessments. *Euphytica* 96: 215-223.
- Castro S A, A Ramos L (1981)** Combate del chahuixtle de la hoja en el cultivo del trigo. SARH. INIFAP. CIAPAN. CAEVAF. Guasave, Sinaloa, México. Folleto Para Productores No. 5.
- Cox T S, R K Bequette, R L Bowden, R G Sears (1997)** Grain yield and breadmaking quality of wheat lines with the leaf rust resistance gene *Lr41*. *Crop Sci.* 37: 154-161.
- Davis S M, P L Crane (1976)** Recurrent selection for rind thickness in maize and its relationship with yield, lodging, and other plant characteristics. *Crop Sci.* 16: 53-55.
- Drijepondt S C, Z A Pretorius, D van Lill, F H J Rijkenberg (1990)** Effect of *Lr34* resistance on leaf rust development, grain yield, and baking quality in wheat. *Plant Breed.* 105:62-68.
- Knott D R (1989)** The effect of alien transfers of genes for leaf rust resistance on the agronomic and quality characteristics of wheat. *Euphytica* 44: 65-72.
- Ma H, R P Singh, A Mujeeb-Kazi (1997)** Resistance to stripe rust in durum wheats, A-genome diploids, and their amphiploids. *Euphytica* 94: 279-286.
- Martin M J, W A Russell (1984)** Correlated responses of yield and other agronomic traits to recurrent selection for stalk quality in a maize synthetic. *Crop Sci.* 24:746-750.
- Martínez Z G, J D Molina G, F Castillo G, A Muñoz O (1999)** Cambios morfológicos y tolerancia a sequía en maíz mediante selección masal para rendimiento en condiciones de sequía. *Rev. Fitotec. Mex.* 22:187-198
- McIntosh R A, C R Wellings, R F Park (1995)** Wheat Rust: An Atlas of Resistance Genes. CSIRO Publications, East Melbourne, Australia. 200 p.
- Pandey H N, T C M Menon, M V Rao (1989)** A simple formula for calculating area under disease progress curve. *Rachis* 8 (2):38-39.
- Peterson R F, A B Campbell, A E Hannah (1948)** A diagrammatic scale of estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Can. J. Res. Sect. C26:* 496-500.
- Roelfs A P (1978)** Estimated losses caused by rust in small grain cereals in the United States: 1918-1976. USDA. Mis. Pub. 1363. U.S. Gov. Print Office, Washington. D.C. pp. 1-85.
- Roelfs A P, R P Singh, E E Saari (1992)** Las Royas del Trigo: Conceptos y Métodos para el Manejo de esas Enfermedades. México, D.F. CIMMYT. 81 p.
- Robinson R A (2000)** Retorno a la Resistencia. Fitomejoramiento para Depender menos de los Plaguicidas. Colegio de Postgraduados. Instituto de Fitosanidad, Montecillo, México. 292 p.
- Singh R P (1992)** Association between gene *Lr34* for leaf rust resistance and leaf tip necrosis in wheat. *Crop Sci.* 32: 874-878.
- Singh R P, J Huerta-Espino (1997)** Effect of leaf rust resistance gene *Lr34* on grain yield and agronomics traits of spring wheat. *Crop Sci.* 37: 390-395.
- Singh R P, J Huerta-Espino, S Rajaram (2000)** Achieving near-immunity to leaf and stripe rust in wheat by combining slow rusting resistance genes. *Acta Phytopathologica and Entomologica Hungarica* 35:133-139.
- Staub J E, Grumet R (1993)** Selection for multiple disease resistance reduces cucumber yield potential. *Euphytica* 67:205-213.
- Torabi M, K Nazari (1998)** Seedling and adult plant resistance to yellow rust in Iranian bread wheats. *Euphytica* 100: 51-54.
- Villalpando I J F (1984)** Metodología de Investigación en Agroclimatología. Curso de Orientación para Aspirantes a Investigadores del INIP, INIF e INIA (tronco común). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Consejo Directivo de la Investigación Agrícola, Pecuaria y Forestal. 184 p.
- Villaseñor M H E (1996)** Selección recurrente en una población de trigo de apareamiento aleatorio mediante el uso de la androesterilidad. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 186 p.
- Zadoks J C, T T Chang, C F Konzak (1974)** A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.
- Zwer P M, C O Qualset (1994)** Genes for resistance to stripe rust in four spring wheat varieties. 2. Adult plant responses. *Euphytica* 74: 109-115.