

EFFECTO DE LA SELECCIÓN MASAL VISUAL RECURRENTE PARA RENDIMIENTO SOBRE LA RESISTENCIA DE PLANTA ADULTA A ROYA LINEAL AMARILLA Y ROYA DE LA HOJA EN TRIGO

EFFECT OF MASS VISUAL RECURRENT SELECTION FOR YIELD ON THE ADULT PLANT RESISTANCE TO YELLOW RUST AND LEAF RUST IN WHEAT

Ernesto Solís Moya^{1*}, José D. Molina Galán², Héctor Eduardo Villaseñor Mir³
y José Sergio Sandoval Islas²

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental El Bajío, Programa de Trigo. Km 6 Carr. Celaya-San Miguel de Allende CP 38110, Celaya Gto. E mail: esolism6@prodigy.net.mx ² Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. Montecillo, Estado de México. C.P. 56230. Tel. 01(595) 95-20200. Fax. 01(595) 952-0262. ³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Valle de México, Programa de Trigo. Apdo. Postal No. 10, CP 56230, Chapingo, Estado de México. Tel. 01(595) 95-42877. Fax. 01(595) 95-46528.

* Autor responsable

RESUMEN

El desarrollo de variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.) debe considerar, además de alta capacidad de rendimiento, otros caracteres importantes como la resistencia genética a enfermedades. El objetivo de este trabajo fue evaluar en trigo harinero la resistencia de planta adulta a roya lineal (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Wensted.) y a roya de la hoja (*Puccinia recondita* Rob. Ex. Desm. f. sp. *tritici*), en familias F₅ provenientes de siete ciclos de selección recurrente para rendimiento de grano, con incidencia natural de la enfermedad. Se establecieron cuatro experimentos en el Campo Experimental Bajío, ubicado en Celaya Gto., México; dos fechas de siembra en el ciclo otoño - invierno 1998-99 para evaluar resistencia a roya lineal, y dos fechas de siembra en el ciclo primavera - verano 1999 para evaluar resistencia a roya de la hoja. Sólo se inoculó a la variedad Moroco para roya lineal con la raza que ataca al gene *Yr9*, y para roya de la hoja con la raza *MCJ/SP*. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que cuando se practica selección recurrente para rendimiento de grano, no hay avance genético para algunos caracteres no seleccionados, como la resistencia a la roya lineal amarilla y a la roya de la hoja. Por lo tanto, se sugiere considerar la práctica de inocular artificialmente para estas enfermedades cuando se hace mejoramiento en trigo con el objetivo de formar variedades comerciales.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., enfermedades, avance genético, familias F₅, fechas de siembra.

SUMMARY

The development of wheat varieties should consider, besides high yield capacity, other important traits such as the genetic resistance to diseases. The objective of this study was to evaluate in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) the resistance of adult plant to yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Wensted.) and to leaf rust (*Puccinia recondita* Rob. Ex. Desm. f. sp. *tritici*). This was done on F₅ families developed from seven cycles of recurrent selection for grain yield, under natural incidence of these diseases. Four experiments were established in the Experimental Station El Bajío, located in Celaya, Gto. Mexico, with two planting dates in the period Autumn-Winter

1998-99 to evaluate resistance at yellow rust and two planting dates in the period Spring-Summer 1999 to evaluate resistance to leaf rust. The cultivar Moroco was inoculated for yellow rust with the race that attacks gene *Yr9*, and for leaf rust with the race *MCJ/SP*. The results obtained indicate that when recurrent selection for grain yield is practiced there is not genetic advance for some non selected traits, such as the resistance to yellow rust and leaf rust. Therefore, it is suggested to artificially inoculate these diseases when breeding with the objective to develop wheat commercial varieties.

Index words: *Triticum aestivum* L., diseases, genetic advance, families F₅, planting dates.

INTRODUCCIÓN

La roya lineal amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) y la roya de la hoja (*Puccinia recondita* Rob. Ex. Desm. f. sp. *tritici*) son enfermedades importantes del trigo (*Triticum aestivum* L.) en varias partes del mundo (Roelfs *et al.*, 1992; McIntosh, 1998). En México, la roya de la hoja es muy importante en el noroeste, en el altiplano y en el noroeste de Tamaulipas; la roya lineal existe en el Bajío y es muy importante en el altiplano (Salazar, 1992). Las royas se pueden controlar con aspersiones de fungicidas, pero se incrementa los costos de cultivo y los daños al ambiente (Sandoval *et al.*, 1999). La resistencia genética es considerada la medida de control más segura desde el punto de vista económico y ambiental (Ma *et al.*, 1997), aunque a menudo provee una protección efímera, ya que las poblaciones de roya responden a las presiones de selección generadas por variedades resistentes produciendo genotipos más virulentos. Con los cambios en las poblaciones de patógenos, el mejoramiento para la resistencia genética del trigo es una actividad continua (Schafer, 1987).

En la actualidad las variedades que manifiestan un bajo nivel de enfermedad con resistencia durable son altamente deseables, esto es, que su resistencia permanezca efectiva durante largos periodos de tiempo en ambientes favorables para la enfermedad, (Lehman y Shaner, 1997). La resistencia durable a la roya de la hoja del trigo generalmente es el resultado de la interacción de unos pocos genes menores (2 a 4) con efecto de resistencia de naturaleza parcial (Singh y Rajaram, 1992); cuando estos genes están presentes de manera individual en una variedad, la resistencia no es completa. No obstante, la interacción de tres o cuatro de estos genes proporciona una resistencia altamente efectiva y estable a través de los ambientes (Singh y Rajaram, citados por Singh *et al.*, 1998).

En el mejoramiento de trigo, las cruza simples, trilineales y dobles, con frecuencia son usadas para combinar las características deseables de dos, tres o cuatro progenitores (Singh *et al.*, 1998). Sin embargo, Villaseñor (1996) y Benítez (1998) señalan que la selección recurrente puede ser un procedimiento más efectivo para incrementar en forma progresiva la frecuencia de genes favorables en la expresión de caracteres de naturaleza cuantitativa.

La selección recurrente se ha usado principalmente para incrementar el rendimiento de grano, con ganancias conocidas en trigo harinero de invierno (Carver, 1993), en trigo harinero de primavera (Benítez y Molina, 1990) y en trigo duro (Olmedo-Arcega *et al.*, 1995). El uso de esta estrategia se ha extendido a otros caracteres como la resistencia a enfermedades. Cortazar *et al.* (1991) la utilizaron para elevar el nivel de resistencia al enanismo amarillo de la cebada (BYD), mientras que Shen *et al.* (1993) aumentaron en 9.5 % el nivel de resistencia a la roña del trigo (*Gibberella zeae*) en dos ciclos de selección recurrente. Así mismo, Jiang *et al.* (1994) lograron resultados semejantes en este patosistema. Existe muy poca información sobre la efectividad de la selección recurrente en trigo para generar materiales resistentes a royas. Pacheco *et al.* (1998) encontraron que la selección recurrente para rendimiento de grano bajo presencia natural de la roya de la hoja fue efectiva para reducir el área bajo la curva de progreso de la enfermedad en 10.7 y 63.1 % para los ciclos C6 y C12 respectivamente, en relación con el ciclo C0. Los autores concluyeron que la selección para rendimiento de grano bajo la presencia natural de la roya de la hoja mejora la resistencia durable en trigo harinero. Resultados similares tuvieron Reysack *et al.* (1993), quienes al seleccionar para rendimiento de grano en avena redujeron la susceptibilidad al carbón volador [*Ustilago tritici* (Persoon) Rostrup], sin embargo, no tuvieron cambios en enanismo amarillo de la cebada (BYD).

Se han desarrollado diversos trabajos para evaluar el efecto que tiene la selección recurrente sobre el rendimiento de grano en trigo, dando poca importancia a la selección simultánea de otras características importantes como la resistencia a patógenos; tal es el caso de Villaseñor (1996), quien reportó ganancias significativas después de tres ciclos de selección en una población androestéril de trigo.

Debido a la relevancia que representa la resistencia a las royas en una variedad de trigo y en los programas de mejoramiento genético en México, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la resistencia a roya amarilla y roya de la hoja lograda en trigo después de siete ciclos de selección masal visual recurrente para rendimiento de grano, bajo la hipótesis de que esta estrategia de mejoramiento, sin la práctica de inoculaciones artificiales de hongos causantes de royas, es un método adecuado para lograr avances genéticos en la resistencia a las royas lineal amarilla y de la hoja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los resultados de este trabajo se derivaron de dos estudios llevados a cabo en el Campo Experimental Bajío del INIFAP ubicado en Celaya, Gto; el primero para evaluar la incidencia de roya lineal amarilla en dos experimentos establecidos en el ciclo otoño - invierno (OI) 1998-99; y el segundo para evaluar la roya de la hoja en dos experimentos establecidos en el ciclo primavera - verano (PV) 1999. Se compararon 30 familias F₅ tomadas al azar de siete poblaciones, correspondientes a siete ciclos de selección masal visual recurrente para rendimiento de grano (C1 a C7) denominada MSFRS (Male Sterile Facilited Recurrent Selection), que se realizó en forma alternada en Chapingo, México (verano) y Celaya, Guanajuato (invierno), durante el periodo 1993 a 1997, conforme al esquema descrito por Villaseñor (1996). En cada ciclo se hizo selección para caracteres asociados con el rendimiento, como tamaño de espiga, número de espigas por planta y número de espiguillas por espiga y se consideró la sanidad de planta pero sin hacer inoculaciones artificiales de royas. Además, se evaluó la población original (C0) y diez variedades testigo, entre ellas las variedades progenitoras Pavón F76, Seri M82, Gálvez M87, Temporalera M87 y Arandas F90; y las variedades regionales Salamanca S75, Saturno S86, Cortazar S94, Eneida F94 y la línea experimental Gracia.

Los materiales fueron sembrados en condiciones de riego en cuatro fechas de siembra: 1 y 16 de diciembre de 1998 (OI) para evaluar la incidencia de roya lineal, y 22 de julio y 5 de agosto de 1999 (PV) para evaluar la roya de la hoja. En el ciclo OI la parcela experimental estuvo constituida por cuatro surcos de 3 m de largo y 0.3 m de ancho; en el ciclo PV 1999 por dos surcos de 1 m de largo y 0.3

m de ancho. Las parcelas se separaron en sus extremos por calles de 1 m de ancho. A lo largo de las calles y en dirección de los dos surcos centrales de cada parcela, se sembraron unas plantas de la variedad Moroco como diseminadoras, debido a su alta susceptibilidad a roya de la hoja (Singh, 1992) y a roya lineal amarilla (Broers, 1997). Se utilizó un diseño Alfa Láctice, constituido por 25 bloques incompletos, con dos repeticiones; cada subbloque estuvo conformado por 10 parcelas experimentales para dar un total de 250 tratamientos y 500 unidades experimentales en el ensayo. Se sembró a una densidad de 120 kg ha⁻¹, se fertilizó con la fórmula 240-46-00; la mitad del nitrógeno y todo el fósforo se aplicó en la siembra y la segunda mitad del nitrógeno en el primer riego de auxilio; en los experimentos del ciclo OI se dieron cinco riegos, a los 0, 35, 65, 85 y 105 días a partir de la siembra; en los de PV se dio un riego de siembra y se regó eventualmente cuando escasearon las lluvias. Las malezas se controlaron aplicando, a los 28 días después del riego de siembra, una mezcla de Brominal 240 CE (Bromoxynil) y Puma S75 EW (Fenoxaprop p-etil) a una dosis de 2 y 1 L ha⁻¹, respectivamente.

Para iniciar la epidemia, las plantas del cultivar Moroco fueron inoculadas a los 28 días después de la siembra (estado de crecimiento 21-30, de la escala de Zadoks *et al.*, 1974), mediante la inyección de 0.5 mL de una suspensión de esporas de *Puccinia striiformis* Westend. f. sp. *tritici*, aislamiento virulento para el gene *Yr9*. Para roya de la hoja (*Puccinia recondita* Rob. Ex. Desm. f. sp. *tritici*), la inoculación de las plantas de Moroco se realizó a los 35 días después de la siembra (estado de crecimiento 30-31 de la escala de Zadoks *et al.*, 1974), con la raza *MCJ/SP*. Se inoculó con la raza que ataca al gene *Yr9* porque es una raza nueva en México y posiblemente permita el descarte de un mayor número de genotipos que la raza *14E14*. La raza *MCJ/SP* se usó porque es la más virulenta contra los genes de plántula que poseen la mayoría de las variedades mexicanas (Huerta y Singh, 1996)

Pacheco *et al.* (1998) consideraron al periodo de manifestación de síntomas (PMS) como un componente de la resistencia a roya; en este estudio esta característica representó el periodo transcurrido en días desde la inoculación de las plántulas de Moroco hasta la aparición de las primeras pústulas sobre la hoja bandera de las familias y testigos evaluados. Una vez determinado este parámetro se registró el número de genotipos por ciclo con síntomas de roya en la primera y segunda lectura, esto es, el número de genotipos por ciclo con menor PMS.

En cada parcela se marcó con etiquetas a tres tallos de plantas diferentes de los surcos laterales (la incidencia de la enfermedad fue uniforme en los cuatro surcos en el ciclo

OI y en los dos surcos en el ciclo PV), para facilitar la toma de información. Se determinó el porcentaje de severidad de la enfermedad en la hoja bandera, con base en la escala modificada de Cobb (Peterson *et al.*, 1948); para la roya lineal en cuatro lecturas con intervalos de siete días desde la aparición de los primeros síntomas en la hoja bandera y hasta que el genotipo más susceptible llegó a 100 % de infección. En el caso de roya de la hoja se siguió el mismo procedimiento, pero a intervalos de cinco días (cinco lecturas).

El porcentaje de daño en cada lectura fue el promedio de las tres plantas de cada parcela. Con las cuatro lecturas de roya lineal amarilla se calculó el área bajo la curva de progreso de *Puccinia striiformis* (ABCRL), y con las cinco lecturas de roya de la hoja se calculó el área bajo la curva de progreso de *Puccinia recondita* (ABCRH); para ello se tomó la sumatoria de las áreas de los trapecios que resultaron de trazar una línea recta entre pares de lecturas contiguas (porcentaje de daño) con su correspondiente número de días como base, según la fórmula de Pandey *et al.* (1989).

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

Donde: X_i = porcentaje de infección en la lectura i
 t_i = tiempo en días entre la observación X_i y X_{i+1}
 n = número de observaciones.

Un segundo parámetro epidemiológico considerado en el estudio fue el porcentaje de severidad final de la roya amarilla (Y_f) y de la roya de la hoja (L_f). Esta lectura correspondió al momento en que el genotipo más susceptible alcanzó 100 % de infección.

Se realizó un análisis de varianza combinado de fechas de siembra con el paquete estadístico SAS (1987). Las fechas de siembra (FS), los ciclos de selección y las familias dentro de ciclos se consideraron como efectos fijos. Con las medias de cada carácter de los siete ciclos de selección (C0 a C7) y de las diez variedades testigo, se realizaron pruebas de comparación de medias con la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad.

Las familias se clasificaron en tres niveles de resistencia: 1) resistencia alta de planta adulta, 2) resistencia moderada o baja de planta adulta y 3) susceptibilidad. Los niveles de infección obtenidos en los testigos y la información disponible de resistencia de planta adulta se usó para clasificar a las familias de cada ciclo en los tres niveles de resistencia mencionados. Así, los niveles de infección registrados en las variedades Pavón F76 y Salamanca S75 se

utilizaron para clasificar a los genotipos con resistencia de planta adulta a roya lineal amarilla alta (1) y moderada (2), respectivamente. Los genotipos que registraron un nivel mayor de roya lineal al de Salamanca S75 se clasificaron como susceptibles (3).

Debido al comportamiento epidemiológico conocido de las variedades testigo, en lo que se refiere a roya de la hoja, la variedad Arandas F91 se usó para clasificar a las familias con alta resistencia de planta adulta. Los valores de severidad final obtenidos en las variedades Seri M82 y Gracia, sirvieron para clasificar a los genotipos con resistencia moderada de planta adulta. El tercer grupo (susceptibles) estuvo formado por los genotipos que presentaron porcentajes de severidad mayores a las variedades Seri M82 y Gracia.

El avance genético promedio por ciclo de selección para el porcentaje de severidad final de la roya lineal y de roya de la hoja se estimó por medio del coeficiente de regresión (b_{yx}) del comportamiento promedio de los ciclos de selección (y), sobre el número de ciclos de selección (Molina, 1992). Dicho coeficiente se expresó en porcentaje del ciclo C0 en la forma:

$$b(\%) = \frac{b_{yx}}{C0} 100$$

Se calculó la correlación fenotípica entre ABCRL con ABCRH y entre Y_f y L_f en el total de 240 familias y con las medias de cada ciclo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Roya lineal amarilla

Las familias más susceptibles mostraron los síntomas de la enfermedad en la hoja bandera, a los 83 días después de la siembra en la primera fecha de siembra y a los 76 días en la segunda. En el Cuadro 1 se presenta el número de genotipos por ciclo de selección que mostraron síntomas de la enfermedad en las primeras dos lecturas en ambas fechas. La severidad fue inferior a 5 % en la primera lectura y en 90 % de los casos inferior a 10 % en la segunda. Sandoval (1997) encontró que los genotipos resistentes poseen mayor periodo de latencia; en este estudio, aunque no se determinó esta variable sí se estudió el periodo de manifestación de síntomas (PMS) (Pacheco *et al.*, 1998), el cual mostró que los ciclos más avanzados (C6 y C7) presentaron, respecto a los primeros ciclos, un mayor número de genotipos con síntomas o por lo menos trazas de roya lineal sobre la hoja bandera en la segunda lectura.

Cuadro 1. Número de genotipos de trigo, por ciclo de selección, que presentaron síntomas de roya lineal (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Wens- ted) en las primeras dos lecturas, en dos fechas de siembra.

Ciclo	Fecha de siembra 1		Fecha de siembra 2	
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 1	Lectura 2
C0	1	3	1	1
C1	2	6	0	0
C2	0	3	0	2
C3	0	4	0	12
C4	1	8	0	6
C5	0	4	0	16
C6	1	12	2	16
C7	1	11	1	12
Testigo	0	2	0	3

El análisis de varianza tanto para el área bajo la curva de progreso de la roya lineal amarilla (ABCRL) como para la lectura final (Y_f) (Cuadro 2), presentaron diferencias altamente significativas para fechas de siembra y tratamientos. Al descomponer los grados de libertad de tratamientos, se observaron diferencias altamente significativas entre familias dentro de ciclos, entre ciclos y para el contraste familias vs testigos. De esta descomposición es de particular interés las diferencias encontradas entre las familias dentro de ciclos, la cual indica que existe variación entre las familias de un mismo ciclo en relación con su resistencia a roya lineal amarilla.

Los promedios de los ciclos de las dos variables ajustadas por el Alfa Láctico (Cuadro 3) corroboran los resultados encontrados para el PMS, al no encontrarse aumento en la resistencia a la roya lineal amarilla por efecto de la selección para caracteres asociados con el rendimiento de grano. Fue así que en ambas fechas de siembra, y a juzgar por los valores de ABCRL y Y_f , los ciclos C3 y C4 mostraron la mayor susceptibilidad, y los ciclos C5 y C0 la mayor resistencia; en cambio, C7 mostró resistencia intermedia. Los testigos mostraron alta resistencia, la cual fue estadísticamente semejante a la registrada por el ciclo C5 y superior a la expresada por los demás ciclos. El alto valor positivo y altamente significativo de la correlación entre ABCRL y Y_f ($r = 0.9734$) permite establecer que es posible analizar la resistencia a la roya lineal con base en cualquiera de las dos variables, como lo consigna Sandoval (1997).

El primer nivel de severidad (< 20 %) comprendió a 22 genotipos: 19 familias y las variedades Temporalera M87, Pavón F76 y la línea experimental Gracia. Cabe señalar que la variedad Temporalera M87 tiene resistencia a la raza virulenta al gene *Yr9*, pero es susceptible a la raza *14E14*, la cual es más común en México. Por tanto, es probable que la resistencia de Temporalera M87 sea de tipo específico o vertical. Lo mismo se puede decir de la

Cuadro 2. Cuadrados medios para las variables ABCRL y Y_f de siete ciclos de selección recurrente para rendimiento de grano en trigo.

FV	GL	CM (ABCRL)	CM (Y_f)
Fecha de siembra	1	897242.1 **	15303.7 **
Rep/FS	2	207569.3	296.5
Bloques/Rep/FS	96	103820.2 **	933.6 **
Tratamientos	249	198553.3 **	2180.0 **
Fam	239	196346.1 **	2147.4 **
Fam/Ciclos	232	172889.6 **	1932.2 **
Ciclos	7	973763.4 **	9278.8 **
Testigos	9	116959.4 **	1731.2 **
Fam vs Testigos	1	1272962.7 **	13105.0 **
Trat x FS	249	19873.2 **	213.6 **
Fam x FS	239	19929.5 *	213.8 **
Fam/ciclos/FS	232	1392.6	54.6
Ciclos x FS	7	21322.1	268.4
Testigos x FS	9	13257.5	124.1
Familias vs Testigos x FS	1	21314.6	659.1
Error	402	15227.7	155.9
Total	999		
CV		24.5	23.1

FV = fuente de variación; GL = grados de libertad; CM = cuadrados medios; ABCRL = área bajo la curva de progreso de roya lineal; Y_f = Lectura final de roya lineal; ; FS = fecha de siembra; Rep = repeticiones; Trat = tratamientos; Fam = familias; * = significativo al 0.05; ** = significativo al 0.01.

Cuadro 3. Medias de ciclos de selección y fechas de siembra de las variables ABCRL y Y_f para roya lineal amarilla en trigo.

FS 1			FS 2			FS		
Ciclo	ABCRL	Y_f	Ciclo	ABCRL	Y_f	FS	ABCRL	Y_f
4	671 a	70 a	4	619 a	62 a	1	533 a	58 a
3	627 ab	69 a	3	590 ab	62 a	2	473 b	50 b
6	576 b	63 ab	1	504 bc	55 ab			
2	540 b	58 b	6	518 b	53 b			
1	548 b	57 b	7	493 bc	52 bc			
7	511 bc	55 b	2	425 c	46 c			
0	453 c	52 b	0	387 cd	42 c			
5	397 cd	43 c	5	314 d	34 d			
Testigos	356 d	41 c	Testigos	277 d	29 d			
DSH	76.1	8.4		80.0	7.4		15.3	5.6

FS = fecha de siembra; ABCRL = área bajo la curva de progreso de roya lineal; Y_f = severidad final de la roya lineal.

variedad Eneida F94 la cual posee resistencia a la raza 14E14 (Broers⁵, 1995; comunicación personal) y susceptibilidad al patotipo usado en este experimento. Los resultados obtenidos con la variedad Temporalera M87 indican que las 19 familias incluidas en este nivel de severidad pudieran tener resistencia vertical; sin embargo, esta diferenciación escapa a los objetivos de este estudio. En el segundo nivel (21 a 30 %) quedaron clasificados 36 genotipos: 33 familias y los testigos Arandas F91, Seri M82 y Salamanca S75. La inclusión en el experimento de la variedad Salamanca S75 que posee el gene *Yr18*, que confiere resistencia de planta adulta permite inferir que las 33 familias clasificadas en este nivel posiblemente poseen resistencia de planta adulta. Por último en los 192 genotipos del tercer

nivel (> 31 %) quedaron clasificadas 188 familias y los testigos Gálvez M87, Cortazar S94, Eneida F94 y Saturno S86. Estos resultados muestran que si bien no hubo un incremento en el número de familias resistentes con el avance generacional, sí fue posible identificar algunas con resistencia a este patógeno.

El valor estimado del avance genético por ciclo de selección tuvo un valor, no significativo, de 0.38 % de severidad en promedio de los siete ciclos de selección para rendimiento, donde el signo positivo indica que los ciclos más avanzados presentaron mayor susceptibilidad a la roya lineal amarilla que C0 (Figura 1); sin embargo, también es conveniente recalcar lo aleatorio de la respuesta a la selección debido quizás a la baja o nula correlación genética de la resistencia a roya de la hoja con los caracteres visuales contemplados en la selección. Los resultados de esta investigación difieren de los obtenidos por Pacheco *et al.* (1998), quienes indicaron que la selección recurrente para rendimiento de grano bajo presencia natural de la roya de la hoja, fue efectiva para reducir el área bajo la curva de progreso de la enfermedad en 10.7 y 63.1 % para los ciclos C6 y C12 respectivamente, en relación con el ciclo C0. Así mismo, Reysack *et al.* (1993) indicaron que el ciclo C4 de selección recurrente para rendimiento de grano en avena tuvo un menor porcentaje de plantas infectadas de carbón volador [*Ustilago tritici* (Persoon) Rostrup] que el ciclo C0. La contradicción de resultados de esta investigación con otros estudios pone en evidencia que es necesaria la práctica de inocular artificialmente para asegurar avances genéticos a enfermedades, ya que cuando no se inocula pudiera no presentarse la enfermedad y así conducir a la selección de genotipos con alto potencial de rendimiento pero también susceptibles a enfermedades, que si son liberados como variedades representarían un alto riesgo para los productores de trigo.

Roya de la hoja

En las dos fechas de siembra las plantas de las familias más susceptibles manifestaron síntomas de roya de la hoja en la hoja bandera a los 48 días después de la siembra. La epidemia mostró un rápido desarrollo sobre la hoja bandera después de la aparición de síntomas en los genotipos más susceptibles, y alcanzó 100 % de severidad en un periodo de 25 días (5 lecturas), en ambas fechas de siembra. En el Cuadro 4 se consigna el número de genotipos por ciclo de selección que presentaron síntomas de la enfermedad en las primeras dos lecturas, en las dos fechas de siembra. El porcentaje de severidad fue de trazas de la

⁵ Investigador del proyecto de roya lineal del trigo del CIMMYT hasta 1996.

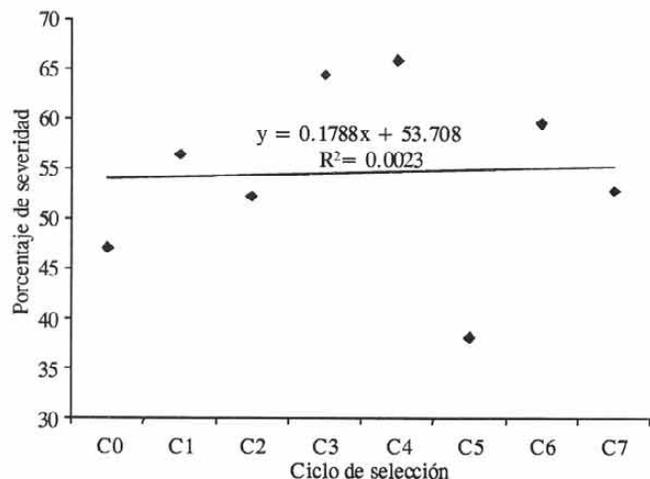


Figura 1. Respuesta a la roya lineal amarilla (porcentaje de severidad) en siete ciclos de selección recurrente para rendimiento de grano en trigo.

enfermedad en la primera lectura e inferior a 5 % en la segunda, en 90 % de los casos. Las plantas de la segunda fecha estuvieron expuestas a la roya de la hoja en etapas de desarrollo más tempranas que en la primera fecha; por ello, hubo un mayor número de genotipos con síntomas de la enfermedad en la primera lectura, alcanzándose 96 % de los genotipos con síntomas en la segunda lectura. Al igual que para el caso de roya lineal, en la roya de la hoja no se observó que los ciclos más avanzados presentaran menor número de genotipos con manifestación de síntomas que los ciclos iniciales, sino que más bien el número resultó aleatorio en la primera lectura de ambas fechas, algo menor en los ciclos C2, C5 y C7 de la primera fecha, y casi el mismo valor en la segunda lectura de todos los ciclos en la segunda fecha.

Los análisis de varianza tanto para el área bajo la curva de progreso de la roya de la hoja (ABCRH) como para la lectura final (L_f), presentaron diferencias altamente significativas para fechas de siembra y tratamientos (Cuadro 5). Al descomponer los grados de libertad de tratamientos se observaron diferencias altamente significativas entre familias dentro de ciclos y entre ciclos, no así entre testigos ni en el contraste familias vs testigos.

Considerando sólo las familias (Cuadro 6), se observa que los ciclos C0, C3 y C7 presentaron los mayores valores de ABCRH y L_f en ambas fechas de siembra, mientras que los ciclos C5 y C4 presentaron los menores valores. Sin embargo, sólo se detectaron diferencias significativas entre los ciclos C5 y C4 con el ciclo C3 en ambas variables en la segunda fecha, y con C7 para la variable L_f .

Cuadro 4. Número de genotipos de trigo, por ciclo de selección, que manifestaron síntomas de roya de la hoja en las primeras dos lecturas en las dos fechas de siembra.

Ciclo	Fecha de siembra 1		Fecha de siembra 2	
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 1	Lectura 2
C0	2	19	9	29
C1	3	18	13	27
C2	0	19	9	30
C3	2	10	10	29
C4	4	13	11	29
C5	0	13	9	30
C6	5	14	12	30
C7	1	16	11	27
Testigos	2	4	4	9

Cuadro 5. Cuadros medios para las variables ABCRH y L_f de siete ciclos de selección recurrente para rendimiento de grano en trigo.

FV	GL	CM (ABCRH)	CM (L_f)
Fecha de siembra	1	4596975.6 **	37136.8 **
Rep/FS	2	1106850.3	5553.9
Bloques/Rep/FS	96	135553.4 **	1594.2 **
Tratamientos	249	64083.8 **	912.4 **
Fam	239	63013.0 **	904.5 **
Fam/Ciclos	232	61620.3 **	885.2 **
Ciclos	7	109172.4 **	1545.9 **
Testigos	9	56966.1	641.7
Fam vs Testigos	1	55741.4	1908.3 *
Trat x FS	249	36671.2 **	438.4 **
Fam x FS	239	36542.5 **	437.0 **
Fam/ciclos/FS	232	9357.1	141.9
Ciclos x FS	7	45899.6	578.9
Testigos x FS	9	25373.0	402.7
Familias vs Testigos x FS	1	17394.1	115.0
Error	402	23043.0	326.7
Total	999		
CV		43.6	39.4

FV = fuente de variación; GL = grados de libertad; CM = cuadros medios; ABCRH = área bajo la curva de progreso de roya de la hoja; L_f = Lectura final de roya de la hoja; FS = Fecha de siembra; Rep = repeticiones; Fam = familias; * = significativo al 0.05; ** = significativo al 0.01.

Los resultados encontrados en la prueba de comparación de medias indican la respuesta aleatoria de los ciclos de selección a la roya de la hoja, observándose incluso para la primera fecha de siembra mayor resistencia de los ciclos iniciales. El ciclo C5 estuvo entre los que registraron niveles más bajos, tanto en resistencia a roya lineal como a roya de la hoja. En cambio, los testigos estuvieron entre los más susceptibles a roya de la hoja y fueron los más resistentes a roya lineal.

Cuadro 6. Comparación de medias (Tukey 0.05) de ciclos de selección y fechas de siembra de las variables ABCRH y L_f , para roya de la hoja en trigo.

	FS I		FS II			FS	ABCRH	L_f
	Ciclo	ABCRH	L_f	Ciclo	ABCRH			
Testigos	325 a	47 a	3	496 a	60 a	2	415 a	52 a
7	319 a	45 ab	7	454 ab	58 a	1	281 b	40 b
0	270 a	40 ab	Testigos	425 ab	56 ab			
6	278 a	40 ab	0	395 ab	52 ab			
3	289 a	39 ab	2	408 ab	52 ab			
4	268 a	39 ab	6	407 ab	52 ab			
5	277 a	38 ab	1	432 ab	51 ab			
2	266 a	37 ab	4	357 b	45 b			
1	254 a	36 b	5	370 b	45 b			
DSH	84.4	10.8	106.5	12.0		18.9	2.2	

FS = fecha de siembra; ABCRH = área bajo la curva de progreso de la roya de la hoja; L_f = severidad final de la roya de la hoja.

Se encontró que 27 genotipos (11 %) presentaron resistencia alta a la roya de la hoja; entre ellos estuvo la variedad Arandas F91. Así mismo, 63 genotipos (25 %) exhibieron resistencia baja, similar a la de los testigos Seri 82 y Gracia. Por su alto nivel de incidencia de roya de la hoja observado, los restantes 160 genotipos fueron clasificados como susceptibles; entre ellos Gálvez M87 registró el nivel más alto con 65 %, seguido por Pavón F76, Temporalera M87 y Salamanca S75 con 62 %. La variedad Pavón F76 tiene dos genes de efectos aditivos de planta adulta contra todas las razas de roya conocidas, uno de ellos es el gene *Lr46* que por sí solo no es muy efectivo; el segundo gene de efectos aditivos aún no se ha identificado (Singh *et al.*, 1998). Gálvez M87 es un derivado de Pavón F76 y posiblemente el gene de planta adulta efectivo en esta variedad sea cualquiera de los dos que posee aquella. Salamanca S75 tiene el gene *Lr34*, que es otro gene de planta adulta de efectos aditivos, y su comportamiento es muy similar al gene *Lr46* (Huerta, comunicación personal⁶);¹ sin embargo, el nivel de resistencia a roya de la hoja que confieren estos genes no fue alto en este estudio.

La variedad Arandas F91 fue el testigo más resistente, pero su nivel de resistencia fue superado por varias familias debido quizás a que ellas fueron derivadas de poblaciones con recombinación continua a través de la selección recurrente, en las cuales hubo acumulación de genes con acción aditiva (Villaseñor, 1996), dando como resultado un mayor grado de resistencia a las enfermedades.

Tal como sucedió con la roya lineal amarilla, el avance genético para resistencia genética a roya de la hoja en los siete ciclos de selección para rendimiento de grano fue nulo, como lo ilustra la Figura 2. En los siete ciclos de selección hecha para rendimiento hubo una respuesta, no significativa, de 0.16 % por ciclo, para roya de la hoja. El signo positivo de la respuesta indica que los ciclos más avan-

zados tendieron a presentar mayor susceptibilidad a la roya de la hoja que los ciclos iniciales, lo que significa que no hay ganancia genética hacia resistencia, puesto que los últimos ciclos fueron más susceptibles a roya de la hoja que el promedio de las familias que conformaron los primeros ciclos de selección. Estos resultados son congruentes con los obtenidos por Reysack *et al.* (1993), quienes no encontraron diferencias entre el ciclo C0 y el C4 de selección recurrente para rendimiento de grano en resistencia al enanismo amarillo de la cebada (BYD) en avena.

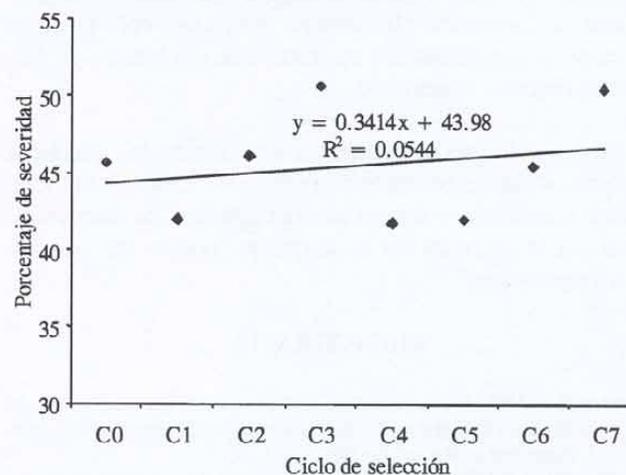


Figura 2. Respuesta de la roya de la hoja (porcentaje de severidad) en siete ciclos de selección recurrente para rendimiento de grano en trigo.

Los resultados observados tanto para roya lineal como para roya de la hoja muestran que a través de la selección recurrente para rendimiento de grano no hubo avance genético para resistencia a estas enfermedades, debido quizás a que cuando no se inocula artificialmente no se asegura el establecimiento de la enfermedad de modo que la selección de genotipos resistentes y susceptibles es aleatoria y sin incremento de la resistencia a royas en la población objeto de selección. Estos resultados hacen ver la importancia que tiene la selección simultánea para rendimiento y resistencia a enfermedades.

Por otra parte, al correlacionar las 240 lecturas de los parámetros epidemiológicos evaluados se obtuvo una correlación altamente significativa entre ABCRL y ABCRH (0.2683) y entre Y_f y L_f (0.22657); los signos positivos indican que a mayor resistencia de roya lineal mayor resistencia a roya de la hoja. Sin embargo, aunque la correlación de los valores promedio de los ciclos también fue positivo (0.2452 entre ABCRL y ABCRH, y 0.2047 entre Y_f y L_f), no registró significancia estadística entre estas enfermedades, lo que pudiera indicar que no hay asociación entre la resistencia a roya lineal y la roya de la hoja; esto es, que no necesariamente un genotipo resistente a roya

⁶ Investigador del Programa de Trigo del INIFAP, en el CEVAMEX.

lineal será resistente a roya de la hoja. Los bajos coeficientes de determinación (0.0601 y 0.0419) de estas relaciones apoyan más la tesis de falta de asociación entre estos caracteres.

CONCLUSIONES

Cuando se aplica selección recurrente para rendimiento de grano en trigo no hay avance genético para algunos caracteres no seleccionados, como la resistencia a la roya lineal amarilla y la roya de la hoja, lo que indica la importancia de inocular artificialmente para estas enfermedades cuando se hace selección en trigo, con el objetivo de formar variedades comerciales.

Es posible que la resistencia genética de los genotipos generados por selección recurrente clasificados como altamente resistentes se deba a la alta capacidad de recombinación y a la acumulación de genes que poseen las variedades progenitoras.

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.
- Benítez R I, J D Molina G (1990)** Selección masal estratificada en trigo: II. Longitud de espiga. *Agrociencia Serie Fitociencia* 1 (2): 13-27.
- 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.
- Carver B F (1993)** Emergence of alternative breeding methods for autogamous crops. Focused plant improvement: towards responsible and sustainable agriculture. *In Proc. 10th Australian Plant Breeding Conf. J. B. Hacker, R. F. Bruns, B. C. Imrie (eds). Gold Coast, 18-23 April 1993. Vol 1:43-56.*
- Cortazar S R, I Ramírez A, M Zerene Z, E Hacke E, O Moreno M (1991)** Mejoramiento genético en trigo para tolerancia al virus del enanismo amarillo de la cebada (VEAC) en Chile. *Agricultura Técnica Santiago* 51 (2): 192-197.
- Huerta-Espino J, R P Singh (1996)** Misconceptions on durability of some adult leaf rust resistance genes in wheat. *In Proc. 9th European and Mediterranean Cereal Rust & Powdery Mildews Conf. 2-6 September 1996. Lunteren, The Netherlands. Pp: 109-111.*
- Jiang G L, Z S Wu, D C Huang (1994)** Effects of recurrent selection for resistance to scab (*Gibberella zeae*) in wheat. *Euphytica* 72 (1-2): 107-113.
- Lehman J S, G Shaner (1997)** Selection of populations of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* for shortened latent period on a partially resistant wheat cultivar. *Phytopathology* 87 (2):170-176.
- 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.
- McIntosh R A (1998)** Breeding wheat for resistance to biotic stresses. *Euphytica* 100: 19-34.
- Molina G J D (1992)** Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa (Algunas implicaciones en genotecnia). 1ª. Ed. A.G.T. Editor, S.A. México. 349 p.
- Olmedo-Arcega O B, E M Elias, R G Cantrell (1995)** Recurrent selection for grain yield in durum wheat. *Crop Sci.* 35 (3): 714-719.
- Pacheco E P J, I Benítez R, J S Sandoval I, J D Molina G (1998)** Resistencia durable a la roya de la hoja en líneas de trigo obtenidas por selección recurrente. *Memorias XVII Congreso de Fitogenética: Notas científicas.* p 20.
- 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.
- Reysack J J, D D Stuthman, R E Stucker (1993)** Recurrent selection in oat: stability of yield and changes in unselected traits. *Crop Sci.* 33:919-924.
- 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.
- Salazar G M (1992)** La red nacional de investigación en cereales de grano pequeño. Organización actual y planes futuros. *In. I Conf. Nal. sobre la Producción de Trigo en México. SARH, INIFAP, CIRNO.* 567 p.
- Sandoval I J S (1997)** Algunos estudios sobre la resistencia cuantitativa en el patosistema cebada (*Hordeum vulgare* L.) - roya amarilla (*Puccinia striiformis* Westend f. sp. *hordei* Eriks). Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 144 p.
- Sandoval I J S, S Osada K, H Vivar F, I Benítez R (1999)** Correlación entre resistencia en plántula y resistencia en planta adulta a la roya amarilla y a la escaldadura de la cebada. *Agrociencia* 33 (4): 415-422.
- SAS Institute (1987)** SAS User's Guide; Statistics. 6th ed. SAS Institute, Cary, NC
- Schafer J F (1987)** Rusts, smuts, and powdery mildew. *In Wheat and Wheat Improvement. E.G. Heyne (ed.) 2nd Ed. Amer. Soc. Agron. Madison, WI. pp: 542-584.*
- Shen Q Q, S P Yu, Y Z Xu, S M Chen, J M Yang (1993)** Recurrent selection breeding by using Ta1 sterile gene for resistance to scab in wheat. *Acta Agriculturae Zhejiangensis* 5 (3): 152-157.
- Singh R P (1992)** Expression of wheat leaf rust resistance gene *LR34* in seedlings and adult plants. *Plant Disease* 76 (5): 489-491.
- Singh R P, S Rajaram (1992)** Genetics of adult-plant resistance to leaf rust in Frontana and three CIMMYT wheats. *Genome* 35:24-31.
- Singh R P, S Rajaram, A Miranda, J Huerta-Espino, E Autrique (1998)** Comparison of two crossing and four selection schemes for yield, yield traits, and slow rusting resistance to leaf rust in wheat. *Euphytica* 100: 35-43.
- Villaseñor M, H E (1996)** Selección recurrente en una población de trigo de apareamiento aleatorio mediante el uso de la androsterilidad. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 186 p.
- Zadoks, J C, T T Chang, and C F Konzak. (1974)** A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.