

Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa aplicado a la evaluación de la roya parda de la caña de azúcar

Mónica Tamayo Isaac,¹ Yaquelin Puchades Izaguirre,¹ Reynaldo Rodríguez Gross,¹ Roberto González Hernández,² Héctor J. Suárez,² Isabel Alfonso Terry,² Eida Rodríguez Lema² y María La O Echavarría²

¹ Subdirección Fitomejoramiento. Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar Oriente-Sur. Carretera Central Km 2½, Los Coquitos, Palma Soriano, Santiago de Cuba, monica@etica.ciges.inf.cu

² Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. Carretera al CAI Martínez Prieto Km 2½, La Habana, isabel@inica.minaz.cu

RESUMEN

El objetivo del presente estudio consistió en establecer nuevos criterios para evaluar la resistencia de las variedades de caña de azúcar frente a la roya parda, a través de la eficacia del modelo Efectos Principales Aditivos e Interacción Multiplicativa (AMMI), como herramienta estadística para estudiar las variables con mayor incidencia en los daños causados por la enfermedad. Se utilizaron los datos correspondientes a la cepa de caña planta de dos estudios en fondo de infección de roya parda, plantados en la provincia de Santiago de Cuba, en septiembre de 2007 y 2008. Se determinó el tamaño más frecuente de las pústulas (LP) y el tamaño de la pústula mayor (TPM) en las hojas +1, +3 y +5, así como cinco momentos de evaluación (3, 4, 5, 6 y 9 meses de plantado). El análisis de varianza para ambas variables (LP y TPM) detectó diferencias significativas entre variedades, momentos de evaluación y número de hoja evaluada, así como en las interacciones de primer y segundo orden de los factores. La aplicación del modelo AMMI, a través de la representación Biplot, permitió apreciar semejanzas y diferencias entre momentos de evaluación, número de hoja y genotipos, y visualizar además los de mayor contribución a la interacción genotipo-ambiente, mayor susceptibilidad y los más estables en el nivel de reacción de la respuesta frente a la roya parda. Estos resultados son de utilidad para el manejo de los genotipos en cada localidad, su empleo a escala comercial y en los programas de mejora del cultivo.

Palabras claves: caña de azúcar, roya parda, modelos aditivos

ABSTRACT

The aim of this study consisted in laying down new criteria used to evaluate the resistance of sugar cane varieties to brown rust, through the efficacy of the Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) model, as a statistical tool in the evaluation of those variables with the greatest incidence on the damage caused by the disease. The data corresponding to two strains of plant cane from two studies by infection substrate of brown rust, planted in Santiago de Cuba province in September 2007 and 2008, were used. The most frequent size of pustules (LP) and the size of the biggest pustule (TPM) on leaves +1, +3 and +5, as well as, five evaluation times (at 3, 4, 5, 6 and 9 months after planting), were determined. The analysis of variance for variables (LP and TPM) found significant differences between cultivars, time of evaluation and evaluated leaf number, as well as in the first and second order interactions of factors. The AMMI model application through the Biplot representation made it possible to appreciate similarities and differences among evaluation times, leaf number and genotypes, also viewing those with the greatest contribution to the environment-genotype interaction, highest susceptibility and the most stable ones in the level of response reaction to the brown rust disease.

Key words: sugar cane, brown rust, additive models

INTRODUCCIÓN

A finales de 2006 se recibieron informes de ataques intensos de roya en varias provincias del país, con una sintomatología atípica [Alfonso, 2008]. La afectación por esta enfermedad se encuentra en el 20,7 % de infección a nivel nacional [Jorge, 2010]. Existen

cambios en el comportamiento de algunos genotipos [Alfonso, 2008], unido a la dificultad de considerar variables paramétricas en el sistema evaluativo de las variedades ante la roya parda de la caña de azúcar.

Para identificar variedades con resistencia estable es necesario exponerlos a ensayos repetidos en la misma localidad por varios años [Nayak *et al.*, 2008]. Existen métodos estadísticos flexibles como el Modelo de Efectos Aditivos e Interacción Multiplicativa (AMMI) utilizados con éxito en el análisis de la Interacción Genotipo Ambiente (IGxA). La realización de estos estudios multiambientales genera una gran cantidad de datos. Con la aplicación de modelos estadísticos univariados sería engorroso realizar la representación y análisis de los resultados.

La representación gráfica, *Biplot*, del modelo AMMI, es una herramienta eficaz para representar e interpretar los componentes de la IGxA. Permite el agrupamiento de genotipos sobre la base de su similitud de un comportamiento en diferentes ambientes [Rodríguez, 2010]. Este modelo ha demostrado ser más eficiente que otras técnicas tradicionales de análisis, donde es imprescindible discernir en detalle sobre las características de la IGxA [Varela *et al.*, 2009]. El objetivo del presente estudio consistió en demostrar las ventajas prácticas de la aplicación del modelo AMMI para la evaluación de la respuesta de 19 genotipos de caña de azúcar frente a la roya parda.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos correspondientes a la cepa de caña planta de un estudio en fondo de infección de roya parda, plantado en la provincia de Santiago de Cuba en septiembre de 2007. El experimento incluyó 19 variedades de caña de azúcar liberados por el Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar en los últimos años. Los genotipos fueron C1051-73 (G1), C132-81 (G2), C86-12 (G3), C86-503 (G4), C86-56 (G5), C88-380 (G6), C89-148 (G7), C90-530 (G8), Co997 (G9), SP70-1284 (G10), B78505 (G11), B80250 (G12), C137-81 (G13), C266-70 (G14), C89-176 (G15), C89-250 (G16), C90-317 (G17), C90-647 (G18) y C323-68 (G19). Se emplearon además los patrones de resistencia a la enfermedad B4362 (altamente susceptible), My55-14 (susceptible), Ja60-5 (susceptible), C334-64 (intermedio), Ja64-11 (resistente) y PR980 (altamente resistente) [Jorge *et al.*, 2002]. Las variables analizadas fueron el tamaño más frecuente de las pústulas (LP) y el tamaño de la pústula mayor (TPM). Las evaluaciones se realizaron en las hojas +1, +3 y +5, según notación de Kuijper, durante los meses 3, 4, 5, 6 y 9 del cultivo.

Para los datos del estudio se realizó un análisis de varianza de clasificación doble, se tomó como factores las variedades, el momento de evaluación y la hoja evaluada (como

efectos aleatorios), para conocer su influencia en la varianza genética y su interacción de acuerdo con el modelo de Cochran y Cox (1965). Para determinar diferencias de respuesta entre las variedades se aplicó la prueba de Tukey. Con los datos de las variables evaluadas de cada genotipo en los diferentes ambientes se realizó el análisis estadístico multivariado y de estabilidad fenotípica.

Al considerar el número de la hoja y el momento de la evaluación como ambientes diferentes, los datos se ajustaron a un modelo AMMI de efectos principales de genotipos y ambientes (hojas y momentos de evaluación) e interacciones multiplicativas [Gauch y Zobel, 1988]. El modelo AMMI ajusta primero los efectos principales aditivos de los genotipos (G) y los ambientes (E) mediante el análisis de varianza (ANOVA) convencional, y posteriormente ajusta los efectos multiplicativos de la IGxA mediante un análisis de componentes principales (ACP). Los gráficos de doble representación se realizaron por medio del programa informático *Biplot* v1.1 [Smith, 2002]. El paquete estadístico empleado en el procesamiento de los datos fue Statistica versión 8 [StatSoft, 2007].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza para las variables LP y TPM detectó diferencias significativas entre variedades, momento de evaluación, número de hoja evaluada, así como en las interacciones de primer y segundo orden de los factores genotipo, momento de evaluación y número de hoja (*Tabla 1*). Para ambos caracteres la mayor fuente de variación se atribuye a las variedades (73,2 y 62,2 %), seguida de la interacción genotipo-evaluación (11,7 y 11,6 %) y el momento de evaluación (5,8 y 5,5 %).

El nivel de reacción de respuesta del hospedante en la cepa de caña planta (*Tabla 2*) para el carácter TPM tuvo valores entre 0 y 8 mm (valor máximo de la media para B4362 fue de 4,027), con un valor medio de 1,19 mm. Se diferencian siete grupos límites de variedades con respuesta diferente (representados por letras) para esta variable. Los valores para el carácter LP se encontraron entre 0 y 8 mm, con un valor medio de 1,02 mm. Los genotipos forman nueve grupos de respuesta diferencial para el carácter LP. Resultados similares se obtuvieron para la cepa de caña planta del segundo estudio.

La variedad B4362 (P6) muestra los valores más altos para los dos caracteres evaluados, tal como era de esperar, por ser un patrón de susceptibilidad. Este genotipo resultó el más afectado durante la epidemia de los años ochenta en Cuba [Alfonso *et al.*, 2006].

Tabla 1. Análisis de varianza y porcentaje extraído en la suma de cuadrados para las variables LP y TPM

Fuentes de variación	LP			TPM		
	G.L.	C.M.	% S.C.	G.L.	C.M.	% S.C.
Réplicas (ambientes)	15	0,168	1,3	15	0,133	1,4
Variedad (Var.)	24	382,465**	73,2	24	517,734**	62,2
Evaluación (Eval)	4	180,693**	5,8	4	273,558**	5,5
Hoja	2	7,871**	0,1	2	9,486**	0,1
Var. x Eval.	96	15,276**	11,7	96	24,193**	11,6
Var. x Hoja	48	2,149**	0,8	48	1,985**	0,5
Eval. x Hoja	8	4,805**	0,3	8	8,364**	0,3
Var. x Eval. x Hoja	192	0,899**	1,4	192	1,466**	1,4
AMMI 1	29	4,679**		29	7,891**	
AMMI 2	27	0,582**		27	0,97*	
Error	7125	0,096**	5,4	7125	0,48	17,1

* y ** significan diferencias significativas a $p < 0,05$ y $p < 0,01$, respectivamente.

Tabla 2. Variedades y media de los caracteres evaluados. Variables TPM y LP. Cepa caña planta

Variedad	Código	TPM (mm)	LP (mm)
PR980	P1	0,000 g	0,000 i
Ja64-11	P2	0,000 g	0,000 i
C334-64	P3	0,000 g	0,000 i
Ja60-5	P4	2,696 c	2,530 bc
My5514	P5	2,737 c	2,663 b
B4362	P6	4,027 a	3,846 a
C1051-73	G1	0,000 g	0,000 i
C132-81	G2	0,000 g	0,000 i
C86-12	G3	0,000 g	0,000 i
C86-503	G4	2,007 e	1,203 h
C86-56	G5	0,000 g	0,000 i
C88-380	G6	1,717 f	1,507 g
C89-148	G7	0,000 g	0,000 i
C90-530	G8	0,000 g	0,000 i
Co997	G9	0,000 g	0,000 i
SP70-1284	G10	1,690 f	1,343 h
B78505	G11	0,000 g	0,000 i
C323-68	G12	2,190 de	2,007 e
C137-81	G13	2,973 b	2,240 d
C266-70	G14	0,000 g	0,000 i
C89-176	G15	1,527 f	1,330 h
C89-250	G16	2,353 d	1,707 f
C90-317	G17	2,063 e	1,660 fg
C90-647	G18	2,870 bc	2,483 c
Valor medio		1,19	1,02

Las variedades C137-81 (G13) y C90-647 (G18) mostraron valores cercanos y forman parte del mismo grupo para la variable TPM. Por su parte, los patrones susceptibles My5514 (P5) y Ja60-5 (P4) forman parte de otro grupo y presentan valores cercanos al patrón altamente susceptible B4362. Estos patrones, conjuntamente con el patrón de alta susceptibilidad, constituyen fuentes de inóculo altas y estables, según los valores presentados para las variables LP y LPM. El genotipo C323-68 (G12) se agrupa con el genotipo C89-250 (G16). Los genotipos C86-503 (G4) y C90-317 (G17) formaron un grupo. Los patrones de resistencia PR980 (P1), Ja64-11 (P2), C334-64 (P3) y nueve variedades que no presentaron afectación por roya parda pertenecen al mismo grupo.

Otras nueve variedades y tres genotipos patrones Ja60-5 (P4), My5514 (P5) y B4362 (P6) ofrecen síntomas evidentes de roya parda. Dentro de las variedades recién liberadas y con presencia de pústulas se encuentran C89-176 (G15), C89-250 (G16), C90-317 (G17) y C90-647 (G18), lo que coincide con los registros reportados por el Sefit en Santiago de Cuba [Rodríguez y Tamayo, 2008].

Existe coincidencia con lo expresado por Jorge *et al.* (2002), quienes recomiendan a B4362 (P6) y Ja60-5 (P4)

como fuentes de inóculo y de variabilidad patogénica en los estudios de resistencia bajo foco infeccioso natural. Lo anterior reafirma su alto potencial para el desarrollo de epífitias de roya parda, además de su valor como suministradoras de inóculo de manera alta y estable en los estudios de evaluación de resistencia de las variedades.

La existencia de diferencias significativas en la interacción variedad-evaluación-hoja, en ambos caracteres, justifica la aplicación del modelo AMMI para determinar los genotipos y ambientes responsables de esta interacción y la estabilidad de la resistencia de los genotipos frente a esta enfermedad, en el que se consideraron ambientes la combinación del momento de evaluación y la hoja evaluada.

La representación gráfica *Biplot* del modelo AMMI2 para la variable LP (*Fig. 1*) muestra que la componente 1 (CP1) extrae el 76 % de la IGXA; la segunda componente explica un 12 % adicional de la IGXA. De manera acumulativa, ambos componentes contribuyen al 88 % del total de la interacción. El modelo de predicción de la interacción entre las variedades y los ambientes de evaluación se obtiene mejor con los primeros componentes [Gauch, 2006].

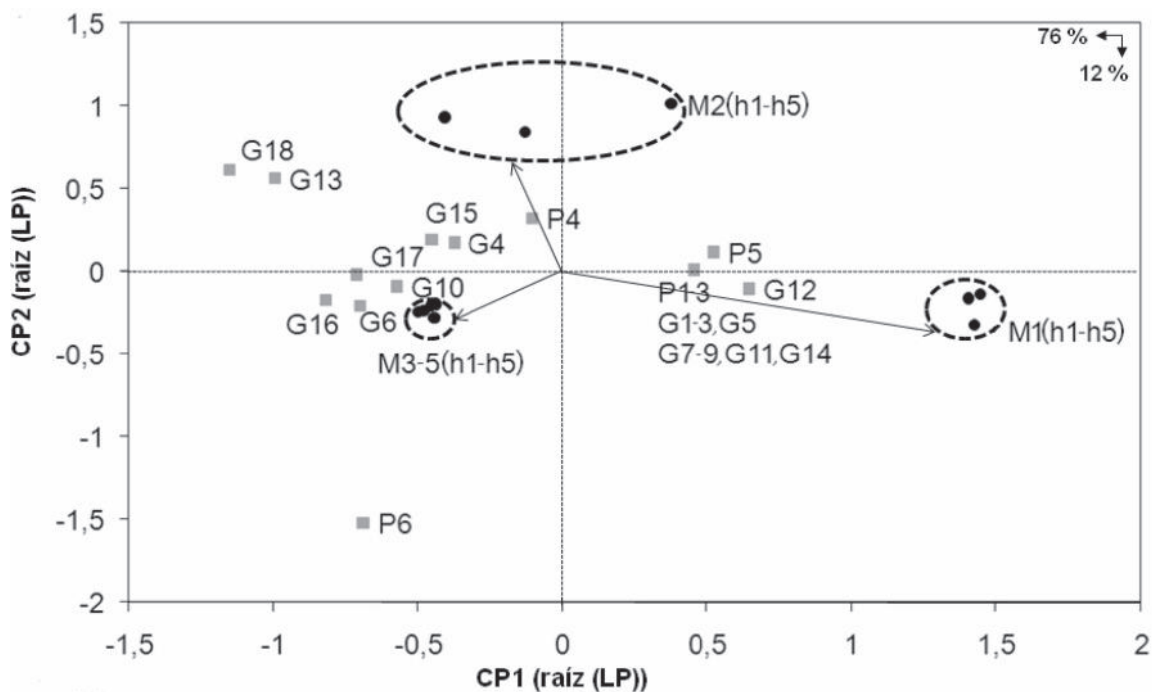


Figura 1. Representación *Biplot*, AMMI 2, del nivel de respuesta de los genotipos (G), (%) en cada ambiente (I%). Representados como ambientes de evaluación los momentos o edades de la plantación (M1-M5) y las hojas (h1-h5).

Según la representación gráfica *Biplot* del modelo AMMI2, los vectores cuyo punto final se encuentran más alejados del origen de coordenadas contribuyen relativamente más a la interacción que aquellos cuyos vectores finalizan más próximos al origen. Los puntos cuyas direcciones de vectores coinciden tienen un patrón de interacción similar.

De acuerdo con estas consideraciones se pueden agrupar los momentos de evaluación en tres grupos (representados por líneas discontinuas) para la variable en estudio LP. El grupo 1 está formado por el momento de evaluación 1 (M1) en las tres hojas evaluadas +1, +3 y +5 (M1h1, M1h3 y M1h5). El grupo 2 por el momento de evaluación 2 (M2) en las hojas +1, +3 y +5 (M2h1-5), y el grupo 3 está compuesto por los momentos de evaluación 3 (M3), 4 (M4) y 5 (M5) en las hojas desde la hoja +1 hasta la +5 (M3h1-5, M4h1-5 y M5h1-5). En la cepa de caña planta 2 existe la tendencia a una ligera separación del momento de evaluación 3 (cinco meses de edad de la planta) de los momentos M4 y M5 (seis y nueve meses).

Los momentos de evaluación con direcciones opuestas de sus vectores tienen una correlación negativa. El grupo 1 tiene una correlación negativa con los grupos 3, 4 y 5, lo que indica un comportamiento diferente entre estos. Lo anterior se traduce en la práctica de la siguiente forma: la primera evaluación (a los tres meses de edad de la plantación) no se debe dejar de realizar, las variedades reaccionan de forma diferente, y esta corresponde con el inicio de la infección. Los peritajes efectuados de 2-5 (cuatro-seis y nueve meses) se agrupan en dirección contraria al primero, lo cual apunta a que podría seleccionarse cualquiera de estos momentos para realizar una segunda y última evaluación.

Es imprescindible realizar la evaluación del carácter LP en el momento 1 (tres meses). Debe elegirse uno de los momentos de evaluación restantes (2-5 y de cuatro-seis meses) y prestar atención a las condiciones específicas de cada localidad. Preferentemente se debe evaluar desde los cuatro hasta los seis meses de edad; las plantas jóvenes son más sensibles a la roya que las plantas maduras, y la severidad de la enfermedad es mayor en estas edades [Infante *et al.*, 2009]. Se debe tomar en consideración que a los nueve meses de edad existe una tendencia a la recuperación de las plantas con respecto a la enfermedad (botan la roya) en dependencia de la variedad, y en esta etapa se haría más difícil la entrada y desplazamiento por el campo debido al desarrollo

alcanzado por las plantaciones, aspectos que pudieran atender contra la calidad de la evaluación.

La interacción genotipo-ambiente es un problema muy específico, por lo que se debe tener precaución al hacer generalizaciones de los casos [Infante *et al.*, 2009]. La combinación de los genotipos, las hojas y momentos de evaluación se tomaron como ambientes de evaluación específicos para este estudio. Ambiente en este caso no solo define al clima (temperatura, humedad relativa, entre otras variables), sino también el lugar (posición que ocupa la hoja en la planta) y el momento (edad) en los cuales se desarrolla y evalúa la patología.

En este tipo de *Biplot*, si se trazara una poligonal virtual con los genotipos más distantes del origen del gráfico donde el resto de las variedades estén contenidos en ella, los genotipos que se encuentren ubicados en los vértices de la poligonal son los de mayor susceptibilidad a la enfermedad [Nayak *et al.*, 2008], y en este caso coinciden con los de mayor contribución a la interacción genotipo ambiente (IGXA) y se comportan como establemente susceptibles.

El patrón C334-64 (P3) está considerado como intermedio; sin embargo, para el entorno de este estudio se comporta como resistente a la roya parda. Estas incongruencias podrían deberse a condiciones ambientales específicas y sugieren que este tuvo un comportamiento distinto. Los genotipos que cambian su reacción con el ambiente son los de comportamiento intermedio y algunos susceptibles. Precisamente para eso es que se ubican los patrones de evaluación y se hacen los ajustes de curvas de regresión, para deslindar el efecto ambiental [Alfonso, 2008]. Se pondera la reacción de las variedades en estudio, influenciada por la severidad de la enfermedad y en función de la tendencia de todos los patrones incluidos.

Al realizar la representación gráfica de los efectos principales de genotipos y ambientes para el carácter LP en las abscisas, y el valor del CPI en las ordenadas (*Fig. 2*), se obtiene el *Biplot* AMMI 1. En este caso la interacción GE está descrita en términos de susceptibilidad diferencial de las variedades frente a la roya parda.

Los resultados demuestran la estabilidad en el nivel de reacción de respuesta de los genotipos P1-6 y justifica su función como patrones de resistencia a la enfermedad. Los resultados del AMMI 1 permiten conocer las variedades que se manifestaron como resistentes a la enfermedad (G1-3, 5, 7-9, 11, 12, 14), así como aquellos que manifestaron cierto

nivel de susceptibilidad y el orden de esta. La inestabilidad de los genotipos G10, G6, G17, G16, G19, G13 y G18 debe considerarse para el manejo y explotación comercial de ellos. Los resultados del modelo AMMI para el carácter TPM mostraron conclusiones similares a la variable LP.

Si se considera que los genotipos P1, P5 y P6 son susceptibles a esta enfermedad [Jorge *et al.*, 2002], es posible con el empleo del modelo AMMI realizar ajustes a la escala de evaluación empleada para cada localidad de evaluación de resistencia a la enfermedad. Los genotipos con valores similares o superiores, para cualquiera de

los caracteres evaluados (LP y TPM), a los patrones P1, P5 y P6 se considerarían susceptibles. Las variedades con valor cero en ambos caracteres (LP y TPM) se considerarían altamente resistentes. De acuerdo con estas consideraciones, en las condiciones de este estudio se debe contemplar que las variedades G13, G18 y G16 podrían ubicarse en otros ambientes para precisar su resistencia debido a la inestabilidad mostrada por ellos en los caracteres evaluados, lo cual posibilitaría su manejo a escala comercial. Las variedades G1-3, 5, 7-9, 11, 12 y 14 se comportan como altamente resistentes.

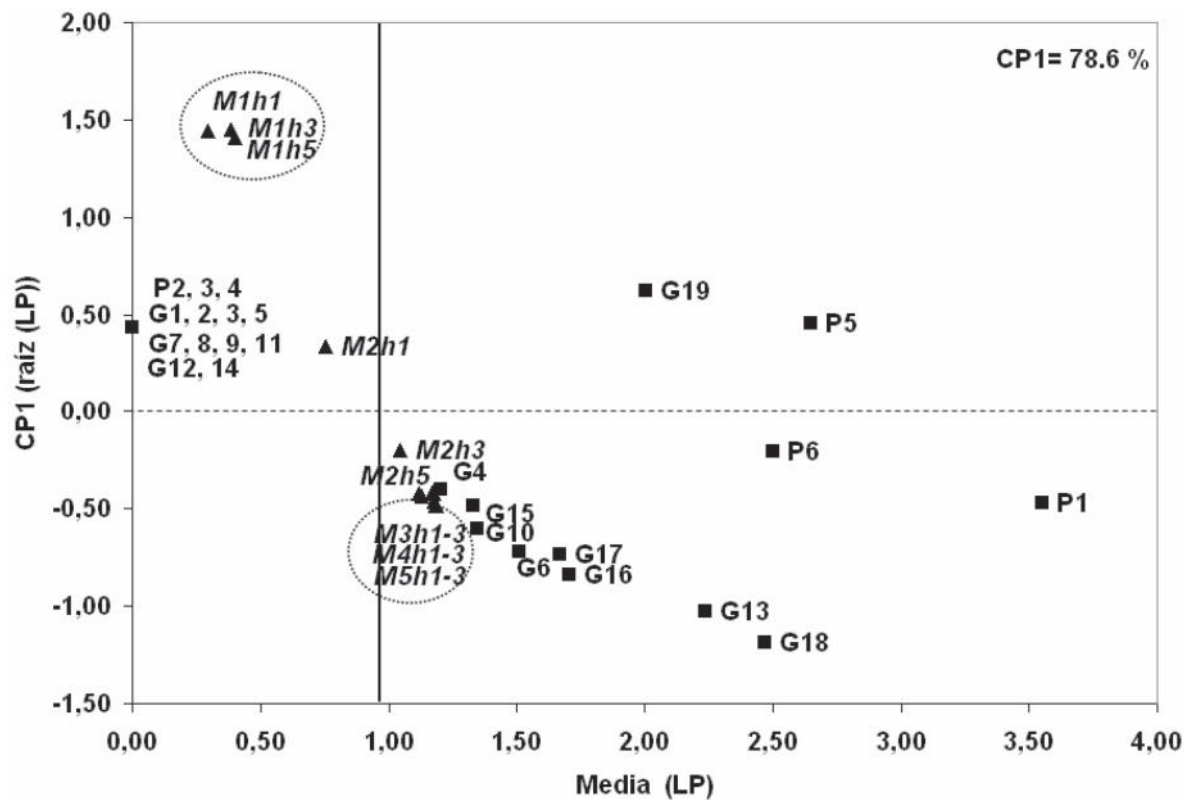


Figura 2. Representación Biplot, AMMI 1 del nivel de respuesta de los genotipos (■) en cada ambiente (▲).

Al no contar con genotipos patrones que muestren niveles intermedios de susceptibilidad, es difícil establecer un rango de valores para los caracteres evaluados que agrupe a las variedades en determinado nivel intermedio de susceptibilidad a la enfermedad. El empleo del modelo AMMI en la evaluación de la roya parva de la caña de azúcar permite visualizar en un mismo gráfico similitudes y diferencias entre los genotipos y sus respuestas frente a esta patología, similitud y diferencias entre los ambientes de evaluación, y la natura-

leza y magnitud de la interacción entre genotipos y ambientes, así como facilita la valoración del manejo de los genotipos en cada localidad para su empleo comercial y en los programas de mejora del cultivo.

CONCLUSIONES

- Se reafirma la factibilidad de mantener las variedades B4362, My5514 y Ja60-5 como fuentes de inóculo altas y estables, y como patrones de susceptibilidad

en las evaluaciones de resistencia y del potencial, para desarrollar epífitias de roya parda de las variedades en estudio en las diferentes fases del programa de obtención y selección de variedades de Cuba.

- La evaluación para la roya parda correspondiente a los tres meses de edad de la plantación resulta de gran importancia, por lo cual no debe ser excluida y se efectuará indistintamente en las hojas +1, +3 o +5.
- Para establecer las correspondientes escalas de evaluación de resistencia de las variedades ante la roya parda, las variables largo de las pústulas y pústula mayor deben ser las que se tomen en mayor consideración.
- La aplicación del modelo AMMI, a través de la representación *Biplot*, permitió apreciar semejanzas y diferencias entre momentos de evaluación, número de hoja y genotipos, y visualizar además los de mayor contribución a la interacción genotipo-ambiente, mayor susceptibilidad y los más estables en el nivel de reacción de respuesta frente a la roya parda.

REFERENCIAS

- Alfonso, Isabel; R. González; J. Rodríguez; J. Montalbán: E. Alfonso: «La roya de la caña de azúcar en el programa de obtención y selección de variedades», XV Congreso Científico, III Taller de Mejoramiento y Conservación de Recursos Filogenéticos, Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Cuba, 2006.
- Alfonso, Isabel: «Informe del proyecto del programa agroindustria azucarera. Optimización del procedimiento metodológico para evaluar la enfermedad de la roya de la caña de azúcar», Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Cuba, 2008.
- Cochran, W. G.; G. M. Cox: *Diseños experimentales*, Ed. F. Trillas 4.^a reimpresión, México, D.F., 1965.
- Gauch, H. G. Jr.; R. W. Zobel: «Predictive and Postdictive Success of Statistical Analyses of Yield Trials», *Theor. Appl. Genet.* 76 (1): 1-10, Alemania, 1988.
- Gauch, H. G.: «Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE», *Crop Sci.*; 46: 1488-1500, EE. UU., 2006.
- Infante, D.; B. Martínez; E. González; Noyma González: «*Puccinia kuehnii* (Krüger) Butler y *Puccinia melanocephala* H. Sydow y P. Sydow. en el cultivo de la caña de azúcar», *Rev. Protección Veg.* 24 (1): 22-28, Cuba, 2009.
- Jorge, H.; R. González; M. Casas; Ibis Jorge: «Normas y procedimiento del programa de mejoramiento genético de la caña de azúcar en Cuba», *Boletín Cuba-Caña*, Inica, 2002.
- Jorge, H.: «Informe Central de Variedades. Informe a XVIII Reunión Nacional de Variedades Semilla y Sanidad Vegetal», Documento Interno del Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Cuba, 2010.
- Nayak, D.; L. K. Bose; S. Singh; P. Nayak: «Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis of Host-Pathogen Relationship in Rice-Bacterial Blight Pathosystem», *Plant Pathol. J.* 24 (3): 337-351, EE. UU., 2008.
- Rodríguez, O.; Mónica Tamayo: «Monitoreo del Sefit en la provincia de Santiago de Cuba», Informe Técnico, Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Cuba, 2008.
- Rodríguez, R.: «Perfeccionamiento del programa de mejora genética de la caña de azúcar para la obtención de nuevos genotipos tolerantes al estrés por sequía», Tesis de Doctorado, Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Cuba, 2010.
- Smith, E. P.: «Biplot program 2002. Statistics Department of Virginia Tech.», <http://www.stat.vt.edu/~facstff/epsmith.html> (consulta: 15 de enero de 2010).
- StatSoft, Inc. 2007. *Statistica (Data Analysis Software System)*, version 8.0. www.statsoft.com.
- Varela, M.; J. Crossa; A. Kumar; J. Paul; L. Cornelius; Y. Manes: «Generalizing the Sites Regression Model to Three-Way Interaction Including Multi-Attributes», *Crop Science* 49: 1-15, EE. UU., 2009.