

Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas Agroecológicas de Colombia

Analysis of stability and adaptability of QPM hybrids of maize growing in different Colombian agroecological zones

Ever Andrés Vargas Escobar ^{1*}, José Ever Vargas Sánchez ² y Diosdado Baena García ¹

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Colombia. ², Federación Nacional de Cultivadores de Cereales FENALCE. Kilómetro ¹, Vía Cota Siberia, vereda El Abra Cota, Cundinamarca, Colombia.

*Autor para correspondencia: ever.vargasescobar@gmail.com

Rec.: 12.05.2014 Acep.: 01.08.2014

Resumen

La energía es el mayor aporte del maíz (*Zea mays*) para la producción de alimentos de consumo humano y animal. Desde 1896 se ha tratado de incrementar el nivel de proteína en este cereal, no obstante fue en la década de 1960 cuando se obtuvo un gran avance con el hallazgo del gen opaco O2. Este gen, en su estado recesivo, hace que la calidad proteica del maíz aumente, debido al incremento en el contenido de globulinas y la reducción de zeínas. Los maíces conocidos como QPM (Quality Protein Maize) duplican la cantidad de lisina y triptófano cuando se comparan con maíces de endospermo normal. Una meta posible es obtener QPM de alto rendimiento de grano, con buena sanidad y adaptados a diferentes condiciones ambientales. En el este trabajo se probaron nueve híbridos amarillos QPM, desarrollados por la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (Fenalce) con germoplasma cedido por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y un testigo comercial de endospermo normal, en 17 ambientes de seis zonas agroecológicas de Colombia: Caribe Húmedo, Caribe Seco, Orinoquía, Valle del Río Cauca, Valle del Río Magdalena y Zona Cafetera. En un diseño de bloques completos al azar y cuatro repeticiones, se midieron variables de planta, componentes del rendimiento y contenido de triptófano. Los análisis de estabilidad y adaptabilidad se basaron en el rendimiento de grano usando los modelos estadísticos de Eberhart y Russell, Lin y Binns y AMMI. El híbrido QPM 303 sobresalió en todos los ambientes y el QPM 305 en ambientes poco favorables. Ambos conservan sus características bioquímicas de calidad proteínica y son estables en los ambientes donde fueron evaluados, según los modelos estadísticos utilizados.

Palabras clave: Maíz de alta calidad proteínica, *Zea mays*, híbridos, adaptabilidad y estabilidad, modelos matemáticos.

Abstract

Energy is maize's biggest contribution for humans and animals. Scientist have been trying to increase its protein level since 1896, it wasn't until the 60's when the opaque gene O2 was discovered. In its recessive state, the gene causes the quality of the maize protein to increase, due to the growth of the Globulin protein and the reduction of Zein protein. Known as Quality Protein Maize (QPM), they can double the essential amino acids Lysine and Tryptophan's percentages when compared with normal maize endosperm. In a commercial scenario, there is a need for high yielding genotypes adapted to different environments; it is also desirable to have a better protein quality. In the present study, 9 yellow endosperm QPM hybrids, developed by FENALCE from CIMMYT's germoplasm and a normal commercial endosperm check were tested in 6 agro ecological zones: Wet Caribbean, Dry Caribbean, Orinoco, Valley of the Cauca River, Valley of the Magdalena River and the Coffee Growing Zone. A randomized complete block design was used in 17 environments and four repetitions. Variables concerning the plant and yield components were measured, but for this study the grain yield was the only taken. Additionally samples were taken to assess the content of Tryptophan. The stability and adaptability analysis was made using the Eberhart and Russell, Lin and Binns and AMMI models. The QPM hybrid that stood out for all the environments was QPM 303 and QPM 305 for unfavorable environments. Both retain their biochemical characteristics of protein quality and are stable in the evaluated environments according to the statistical models that were used.

Keywords: QPM, *Zea mays*, hybrids, adaptability and stability, models.

Introducción

Según el reporte de “Producción Área Y Rendimiento De Maíz”¹ el maíz es el cereal más importante a nivel mundial, superando el trigo y arroz con una producción de 864.276.000 Ton en 168, 673,000 ha, distribuidas en 119 países (USDA, 2013). En Colombia, en 2012 se sembraron 542,131 ha con una producción de 1, 869,970 t y un rendimiento de 3.45 t/ha mientras que las importaciones alcanzaron 3, 188,055 t (FENALCE, 2013).

Según la FAO, el mundo debe incrementar en un 70% la producción de alimentos para el año 2050. En el Plan País-Maíz, una política del gobierno actual, se fijó como meta incrementar el área cultivada de maíz amarillo de 137,000 ha en el 2010 a 250,000 ha al finalizar 2014, con un crecimiento comparativo de 82%. En materia de producción, el compromiso es subirla gradualmente de 688,600 t registradas en 2011 a 1, 500,000 t en 2014, con un crecimiento de 118%. El programa establece tres líneas de acción: (1) ampliar el número de hectáreas con incrementos de productividad, (2) organización empresarial de productores, y (3) comercialización formal y estable. Entre las acciones se destaca el aumento en las áreas actuales en las zonas competitivas establecidas, principalmente en Córdoba, Meta (Altilanura), Valle del Cauca y Tolima (MADR, 2010).

Una estrategia para incrementar la productividad es el incremento en el área sembrada con maíz tecnificado, lo que implica el uso de semillas certificadas de maíz híbrido. Si estos híbridos poseen atributos adicionales, entre ellos una mayor calidad nutritiva del grano, es posible garantizar una mejor seguridad alimentaria para la población, no obstante, para alcanzar esta meta se requiere que las condiciones de manejo del cultivo sean óptimas y los híbridos se siembren en ambientes adecuados (Fenalce - Cenicel, 2013), ya que la interacción genotipo x ambiente (GxA) es el comportamiento relativo diferencial que muestran los genotipos cuando se les somete a diferentes ambientes (Vallejo, 2010). Según Eberhart y Russell (1966) la estabilidad es una característica genética y por tanto los cultivares con amplia adaptación tienen una baja interacción GxA.

Existen varias estrategias para estimar la estabilidad y la adaptabilidad de cultivares cuando son evaluados en diferentes ambientes. En este estudio se emplearon y evaluaron los modelos propuestos por Eberhart y Russell (1966), Lin y Binns 1988 (Acevedo 2010) y el modelo AMMI de efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas, para estimar la estabilidad del

rendimiento y otras características agronómicas de nueve híbridos de maíz QPM de alto valor proteico, evaluados en las principales zonas agroecológicas productoras de maíz en Colombia.

Materiales y métodos

Localización y época de evaluación

Los ensayos de rendimiento se realizaron en 2011 en 24 ambientes representativos de regiones productoras de maíz en Colombia, excluyendo siete ambientes del estudio por ausencia de diferencias entre genotipos. En el Caribe Húmedo se sembraron en dos localidades del municipio de Cereté, departamento de Córdoba. En el Caribe Seco se hizo una siembra en la Jagua del Pilar, La Guajira, y otro en Colosó, Sucre. En la Orinoquía las siembras se hicieron en los municipios de Fuentes de Oro, Lejanías, Granada y San Martín, departamento del Meta. En el Valle del Río Cauca en los municipios de Buga y Bolívar. En el Valle del Río Magdalena se hizo una siembra en el Espinal, Tolima. En la zona Cafetera se hizo una siembra en Marsella (Risaralda) y otra en el municipio de Pereira, y en el Quindío las siembras se hicieron en el municipio de Buenavista.

Material genético

Los nueve cultivares QPM evaluados hacen parte de la evaluación preliminar de 118 híbridos sencillos pertenecientes al inventario de la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (Fenalce), originados por líneas endogámicas provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Como testigo se incluyó el híbrido comercial Pioneer P30K73.

Variables de respuesta evaluadas

El análisis de estabilidad se hizo considerando el rendimiento de grano, adicionalmente se midieron: floración femenina, altura de planta (m), longitud de mazorca (m), número de plantas, acame (%), número de mazorcas, pudrición de mazorca (%), aspecto y textura de mazorca, y sanidad.

Análisis de laboratorio e interacción genotipo x ambiente

En un laboratorio certificado se determinaron los porcentajes de proteína, lisina y triptófano.

Para el análisis GxA se utilizaron las metodologías propuestas por Eberhart y Russell (1966), Lin y Binns (1988) y AMMI con modelo de los efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas (Mandel, 1971; Gauch y Zobel, 1988) La estabilidad y la adaptabilidad se utilizaron

¹Tabla 1-41 Maíz internacional: área, rendimiento y producción. Tomado del reporte anual de estadísticas de agricultura de la USDA

como términos sinónimos y se refieren a la capacidad de un determinado genotipo de responder positivamente a condiciones ambientales favorables, es decir, se utilizó el sentido agronómico de estabilidad (Ceballos, 1995).

Método Eberhart y Russell (1966)

Propuesto por Eberhart y Russell en 1966 se fundamenta en la técnica estadística de regresión lineal, de acuerdo con el modelo siguiente:

$$\bar{X}_{ij} = \mu_i + \beta_1 I_j + d_{ij}$$

Donde:

\bar{X}_{ij} = comportamiento promedio del genotipo i en el ambiente j .

μ_i = media del genotipo i a través de todos los ambientes.

β_1 = coeficiente de regresión, el cual mide la respuesta del genotipo i a los cambios ambientales.

I_j = índice ambiental obtenido como la diferencia entre la media de todas los genotipos en el ambiente j menos la media general.

d_{ij} = desviación de la regresión del genotipo i en el ambiente j . Se calcula aplicando la fórmula siguiente:

$$d_{ij} = \delta_i^2 - b \left(\sum X_{ij} X I_j \right)$$

Donde:

δ_i^2 = variancia del rendimiento de la variedad i .

El parámetro de estabilidad debido a las desviaciones de la regresión está dado por:

$$S^2 d_i = \frac{d_i}{l-2} - \frac{CMerror}{r}$$

Donde:

$S^2 d_i$ = parámetro de estabilidad desviación de la regresión

d_i = desviación de la regresión del genotipo i

I = localidad

$CMerror$ = cuadrado medio del error

Cuando el coeficiente de regresión (β_1) es igual a 1.0, el genotipo es estable ya que tiene una buena respuesta en todos los ambientes, si es > 1.0 tiene mejor respuesta en ambientes favorables y si es < 1.0 se comporta mejor en ambientes poco favorables (Vallejo, 2010).

Método Lin y Binns (1988)

La medida única de superioridad del comportamiento del genotipo i (P_i) se define como el cuadrado medio de la distancia entre la respuesta de un genotipo y el genotipo de máxima respuesta en un ambiente dado, y se expresa como:

$$P_i = \frac{\sum_j (Y_{ij} - M_j)^2}{2n}$$

Donde

P_i = es el rendimiento del genotipo i -ésimo en el ambiente j -ésimo.

M_j = es la máxima respuesta entre todos los genotipos en el ambiente j -ésimo.

n = es el número de ambientes.

Un valor pequeño de P_i implica adaptación general de un genotipo. Este índice integra rendimiento medio y estabilidad relativa en un solo parámetro.

Modelo AMMI (1988)

Este modelo combina el análisis de variancia para los efectos principales de genotipos y ambientes con el análisis de componentes principales de la interacción genotipo x ambiente. Los resultados de AMMI pueden ser graficados en un 'biplot' donde se colocan tanto los efectos principales como los efectos de interacción para los genotipos y los ambientes (Vallejo *et al.*, 2005). Por tanto es deseable que la mayor parte de la variación esté expresada en los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2), ya que el biplot no es más que la representación gráfica en dos ejes del comportamiento de una variedad en un ambiente particular (Kempton, 1984). El modelo tiene la forma siguiente:

$$Y_{ger} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_n \lambda_n Y_{gn} \delta_{en} + \rho_{ge}$$

Donde:

Y_{ger} = rendimiento observado del genotipo g en el ambiente e para la repetición r .

μ = efecto de la media general.

α_g = desviación con respecto a la media general del genotipo g .

β_e = desviación con respecto a la media general del ambiente e .

λ_n = valor singular para el eje n del ACP.

Y_{gn} = vector propio unitario del genotipo g para el eje n .

δ_{en} = vector propio unitario del ambiente e para el eje n .

ρ_{ge} = residual.

Para establecer el orden de estabilidad en el modelo AMMI se calcula el promedio de estabilidad ASV (*average stability value*) AMMI (Purchase y Alberts, citados por Flores, 2010). El ASV es la distancia del origen en un diagrama de dispersión de un sistema bidimensional hacia las puntua-

ciones de CP 1 vs. las puntuaciones de CP2. Ya que la puntuación de CP 1 contribuye más a la suma de cuadrados de la interacción del GxA, se necesita un valor ponderado de ASV:

$$ASV = \sqrt{\left\{ \left[\frac{SSCP1}{SSCP2} (iCP1) \right]^2 + iCP2^2 \right\}}$$

Donde:

SSCP1 = suma de cuadrados del componente principal 1 del modelo (CP1).

SSCP2 = suma de cuadrados del componente principal 2 del modelo (CP2).

iCP1 = participación del genotipo *i* en el componente principal 1.

iCP2 = participación del genotipo *i* en el componente principal 2.

Resultados y discusión

El primer paso consiste en definir si existe una diferencia significativa entre el rendimiento de los genotipos en los ambientes evaluados; posteriormente se desglosan las fuentes de variación (Tabla 1) para identificar si existe interacción genotipo x ambiente para continuar con el estudio de adaptabilidad y estabilidad.

En la tabla 2, se resumen algunos índices de estabilidad y adaptabilidad propuestos por Eberhart y Russell (1966), entre ellos: rendimiento promedio (β_0), coeficiente de regresión (β_1) con sus respectivos errores estándar y test-*t* para $H_0: \beta_1 = 1.0$ y las desviaciones de la regresión (S^2d). El genotipo QPM 303, presentó un coeficiente de regresión (β_1) que no difiere de 1, además, fue el híbrido con el rendimiento más alto (7.4 t/ha) y el de mayor adaptación tanto en ambientes favorables como desfavorables, aunque su desviación de la regresión fue significativa ($S^2d > 0$).

De acuerdo con Eberhart y Russell (1966) los demás híbridos se comportan mejor en ambientes favorables ($\beta_1 > 1$) o en ambientes desfavorables ($\beta_1 < 1$) y tienen una desviación de la regresión > 0 , con excepción del genotipo QPM 305, que es el único predecible y que se comporta mejor en ambientes poco favorables.

El comportamiento de los genotipos evaluados aparece en la tabla 3 y se observa el índice de superioridad P_i y su posición en la escala de mérito 1 - 10, siendo 1 la más alta calificación. El genotipo de P_i más bajo (0.56) fue QPM 303 con un rendimiento porcentual de 16.1% por encima

Tabla 1. Análisis de varianza para la estabilidad de la variable rendimiento de genotipos de maíz en diferentes ambientes de Colombia.

FV	Gl.	SC	CM	Fc	Probabilidad
Ambiente (A)	16	1398.3568	87.3973	144.8205	***
Genotipo (G)	9	229.0129	25.4459	42.1647	***
Int. GxA	144	462.325	3.2106	5.3201	***
Amb/Gen	160	1860.6818	11.6293	19.2701	***
Amb. lineal	1	1398.3568	1398.3568	2317.1283	***
GxA lineal	9	74.7545	8.3061	13.7634	***
Dev. de la regresión	150	387.5707	2.5838	4.2815	**
Dev. G301	15	29.2733	1.9516	3.2338	**
Dev. G302	15	42.1502	2.81	4.6563	**
Dev. G303	15	40.1108	2.6741	4.431	**
Dev. G304	15	45.0927	3.0062	4.9814	**
Dev. G305	15	15.6669	1.0445	1.7307	0.074 ^{ns}
Dev. G306	15	58.8287	3.9219	6.4988	*
Dev. G307	15	21.139	1.4093	2.3352	**
Dev. G308	15	17.8208	1.1881	1.9686	**
Dev. G309	15	25.1354	1.6757	2.7767	**
Dev. P30K73	15	92.3529	6.1569	10.2021	**
Residuo	51	30.7778	0.6035		

Diferencia: *** altamente significativa ** muy significativa * significativa.

Tabla 2. Resumen de estudio de adaptabilidad y estabilidad del modelo Eberhart y Russell (1966) para genotipos de maíz en diferentes ambientes de Colombia.

Genotipo de maíz	Media (t/ha)	β_1	t	Prob ($\beta_1=1$)		S^2d	Prob (S^2d)		R ² (%)	Signif. (β_1, S^2d)
QPM 301	6.652	1.1307	1.99	0.0494	*	0.33	0.0871	**	85.93	AF, I
QPM 302	6.055	0.7148	-4.341	0.0001	**	0.55	0.0017	**	62.9	AD, I
QPM 303	7.535	1.1142	1.739	0.0843	NS	0.52	0.0031	**	81.23	T, I
QPM 304	6.928	1.2032	3.093	0.0033	**	0.6	0.001	**	81.78	AF, I
QPM 305	6.572	0.8256	-2.655	0.0102	**	0.11	7.4047	NS	85.88	AD, P
QPM 306	6.795	1.4034	6.141	0	**	0.83	0	**	82.4	AF, I
QPM 307	6.163	0.8632	-2.082	0.0402	**	0.2	1.2536	*	83.13	AD, I
QPM 308	5.587	0.7015	-4.544	0.0001	**	0.15	3.7187	*	79.43	AD, I
QPM 309	5.689	0.8219	-2.712	0.0088	**	0.27	0.3357	**	78.98	AD, I
P30K73	6.941	1.2216	3.373	0.0016	**	1.39	0	**	69.32	AF, I
Media general	6.4916									

T = todos los ambientes; AF = ambiente favorable; AD = ambiente desfavorable; P = predecible; I = impredecible.

de la media general, de amplia adaptación tanto en ambientes favorables como desfavorables. Es evidente que este índice está estrechamente correlacionado con el rendimiento promedio. Los materiales con el rendimiento promedio más alto (QPM 303, P30K73, QPM 304 y Q PM306) son, en su orden, los que ocupan las posiciones 1 a 4 en la escala de mérito.

Tabla 3. Índice de superioridad (P_i) de Lin y Binns 1988) de genotipos de maíz en 17 localidades de Colombia.

Genotipo de maíz	Rendimiento (t/ha)	P_i	Ranking
QPM 301	6.65	1.55	5
QPM 302	6.05	3.08	8
QPM 303	7.54	0.56	1
QPM 304	6.93	1.26	3
QPM 305	6.57	1.9	6
QPM 306	6.80	1.51	4
QPM 307	6.16	2.71	7
QPM 308	5.59	4.09	10
QPM 309	5.69	3.69	9
P30K73	6.94	1.25	2
Media general	6.49		

En la tabla 4, se incluyen los promedios de los rendimientos para genotipos en los ambientes; igualmente se presentan las coordenadas tanto de genotipos como de ambientes sobre los ejes definidos por los componentes principales CP1 y CP2. Con estos datos se construyó el biplot de CP1 vs. CP2 (Figura 1) en el cual se explica un 56.5 % de la interacción genotipo x ambiente. En la Figura se observa que los genotipos más lejanos del origen son los que más suman a los

valores de la interacción, siendo, aparentemente, el genotipo QPM 301 el más estable; mientras que el genotipo P30K73 sería el menos estable, siendo tres el número de mega-ambientes que se pueden delimitar.

En la tabla 5, aparece el promedio de estabilidad ASV AMMI (average stability value), que indica cuál es el híbrido de mayor estabilidad y mejor adaptación en los ambientes evaluados en este trabajo. Los valores en la tabla permiten, inclusive, definir el ordenamiento de genotipos por su mayor o menor estabilidad de acuerdo con el modelo AMMI. El genotipo QPM 301 fue el más estable y los genotipos QPM 06 y 30k73 fueron los de mayor inestabilidad ya que poseen valores de ASV más altos y se encuentran más lejos del valor cero.

Análisis conjunto de criterios de estabilidad y adaptabilidad

La comparación de las metodologías utilizadas para evaluar la estabilidad y la adaptabilidad de los genotipos aparece en la tabla 6. Cada genotipo fue calificado con un valor de estabilidad (OE), siendo 1 el más estable y 10 el menos estable.

Según la propuesta de Eberhart y Russell (1966), el primer criterio fue el rendimiento de grano para identificar genotipos de alto rendimiento; el segundo fue el coeficiente de regresión (β_1) para identificar aquellos genotipos con un coeficiente = 1, y el tercero genotipos cuyas desviaciones de la regresión (S^2d) no difieran de cero.

Para la siguiente clasificación se usó el resultado del modelo de Lin y Binns, que utiliza el índice

Tabla 4. Puntuaciones de los componentes principales para la variable rendimiento de genotipos de maíz, por ambiente y genotipo, en Colombia.

Ambiente	Rend. (t/ha)	CP1	CP2	Genotipo	Rend (t/ha)	CP1	CP2
A1 Cereté - A	5.11	-0.07	0.11	G1 QPM 301	6.65	-0.15	0.07
A2 Cereté -B	6.95	0.38	0.27	G2 QPM 302	6.05	-0.58	0.31
A3 La jagua del Pilar	8.09	0.44	-0.18	G3 QPM 303	7.54	-0.06	0.33
A4 Colosó	7.85	0.47	0.27	G4 QPM 304	6.93	0.15	-0.65
A5 Lejanías	4.44	-0.62	-0.31	G5 QPM 305	6.57	-0.37	-0.09
A6 Fuente de oro	6.07	-0.40	-0.19	G6 QPM 306	6.79	0.93	-0.73
A7 Granada	5.61	-0.54	-0.37	G7 QPM 307	6.16	-0.07	-0.29
A8 San Martin	7.39	-0.59	-0.51	G8 QPM 308	5.59	-0.42	-0.28
A9 Buga - A	6.47	0.26	0.51	G9 QPM 309	5.69	-0.45	0.37
A10 Bolívar - A	7.54	-0.20	0.28	G10 P30K73	6.94	1.00	0.98
A11 Buga - B	7.17	0.85	-0.34	Media general	6.49		
A12 Bolívar - B	8.84	0.17	-0.11				
A13 El Espinal	3.56	-0.51	0.05				
A14 Buenavista - A	6.9	-0.09	1.00				
A15 Buenavista - B	4.44	-0.04	0.61				
A16 Marsella	5.89	-0.25	-0.22				
A17 Pereira	7.92	0.81	-0.72				

Tabla 5. Valor promedio de estabilidad del modelo AMMI ASV para genotipos de maíz en 17 localidades de Colombia.

Genotipo	Rend. (t/ha)	ASV	OE
QPM 301	6.65	0.22	1
QPM 302	6.05	0.87	8
QPM 303	7.54	0.34	3
QPM 304	6.93	0.68	6
QPM 305	6.57	0.52	4
QPM 306	6.79	1.49	9
QPM 307	6.16	0.31	2
QPM 308	5.59	0.65	5
QPM 309	5.69	0.73	7
P30K73	6.94	1.71	10

Promedio de estabilidad de AMMI (ASV) y orden de estabilidad (OE).

de superioridad (P_i) correspondiendo los valores más altos a los genotipos que más se alejaron del testigo seleccionado para cada ambiente. El parámetro valor promedio de estabilidad (ASV) de la tabla 6 determina la distancia de cada genotipo en el biplot (AMMI 2) que se clasifica de menor a mayor, siendo el menor el que está más cerca del origen y por consiguiente es el más estable.

Los valores del OE muestran que el método de Lin y Binns coincide con la escala de rendimiento de los genotipos y que este método depende de este factor. Al comparar los tres modelos utilizados para medir la estabilidad no se encontró coincidencia entre ellos; no obstante, por el enfoque multivariado que se le dio a la información, el modelo AMMI es el de mayor ajuste.

Análisis de laboratorio

Los resultados de los análisis de laboratorio para los porcentajes de proteína, triptófano y lisina, así como el índice da calidad de estos aminoácidos se incluyen en la tabla 7. Siguiendo los protocolos de laboratorio de calidad nutritiva de maíz y aná-

lisis de tejido vegetal del CIMMYT (Vivek, 2008; Galicia, 2012; Palacios, 2012) los genotipos que presentaron porcentajes de triptófano mayores que 0.07% fueron considerados como de alto valor proteico. En este caso (tabla 7) los genotipos QPM 301, QPM 303, QPM 304, QPM 305, QPM 306, QPM 307 y QPM 308 presentaron un alto valor proteico; mientras que QPM 302, QPM 309 y el testigo comercial P30K73 no superaron el valor de referencia.

Los genotipos QPM 304, QPM 306, QPM 301 y QPM 305 y el testigo comercial P30K73 superaron la media general. Según los parámetros establecidos, el modelo mostró que sólo el genotipo QPM 305 es predecible, ya que la desviación de la regresión es estadísticamente igual a cero. No obstante que el testigo comercial P30K73 presentó un rendimiento superior en este experimento, ocupa el segundo lugar en el modelo Lin y Binns y es inestable como se deduce de los resultados con los modelos de Eberhart y Russell y AMMI, donde ocupa el último lugar en la escala de mérito. Los maíces QPM fueron igualmente estables y predecibles en su rendimiento en grano así como el híbrido de endospermo normal.

Tabla 7. Resumen de resultado de pruebas bioquímicas de genotipos de maíz evaluados para calidad proteica en ambientes diferentes en Colombia.

Genotipo de maíz	% Proteína en muestra	% Triptófano en muestra	% Triptófano en proteína	% Lisina muestra	% Lisina proteína
QPM 301	12.08	0.09	0.75	0.360	2.98
QPM 302	10.48	0.062	0.59	0.248	2.37
QPM 303	8.86	0.074	0.84	0.296	3.34
QPM 304	12.47	0.080	0.64	0.320	2.57
QPM 305	10.05	0.080	0.80	0.320	3.18
QPM 306	10.35	0.070	0.68	0.280	2.71
QPM 307	9.88	0.070	0.71	0.280	2.83
QPM 308	8.87	0.070	0.79	0.280	3.16
QPM 309	9.43	0.058	0.62	0.232	2.46
P30K73	9.73	0.059	0.61	0.236	2.43

Tabla 6. Medias de rendimiento en t/ha y diferentes índices para medir la estabilidad de genotipos de maíz QPM y un testigo comercial evaluados en 17 ambientes en Colombia.

Genotipo de maíz	Rend.		Eberhart y Russell			Lin y Binns			AMMI	
	(t/ha)	OE	β_1	S^2d	S^2d/β_1	OE	P_i	OE	ASV	OE
QPM 301	6.65	5	1.13	0.33	0.29	4	1.55	5	0.22	1
QPM 302	6.05	8	0.71	0.55	0.77	9	3.08	8	0.87	8
QPM 303	7.54	1	1.11	0.52	0.47	6	0.56	1	0.34	3
QPM 304	6.93	3	1.20	0.60	0.50	7	1.26	3	0.68	6
QPM 305	6.57	6	0.83	0.11	0.13	1	1.9	6	0.52	4
QPM 306	6.79	4	1.40	0.83	0.59	8	1.51	4	1.49	9
QPM 307	6.16	7	0.86	0.20	0.23	3	2.71	7	0.31	2
QPM 308	5.59	10	0.70	0.15	0.21	2	4.09	10	0.65	5
QPM 309	5.69	9	0.82	0.27	0.33	5	3.69	9	0.73	7
P30K73	6.94	2	1.22	1.39	1.14	10	1.25	2	1.71	10

Las metodologías de Eberhart y Russell y AMMI son complementarias y coinciden en la discriminación de ambientes y genotipos y en la interacción genotipo x ambiente; no obstante el AMMI, por su enfoque multivariado, conduce a resultados más consistentes. La metodología de Lin y Binns puede facilitar de manera muy sencilla la discriminación de genotipos de amplia adaptación con base en los rendimientos de los genotipos en los diferentes ambientes.

El análisis de la Figura 1 (CP1 y CP2) complementa los resultados del AMMI y le dan mayor ajuste y facilidad a la metodología para discriminar y clasificar ambientes en mega-ambientes y genotipos apropiados para cada uno de estos. Los modelos Eberhart y Russell, y Lin y Binns son, más bien, una comparación de medias, mientras que el modelo AMMI se centra fundamentalmente en el estudio de la interacción GxA.

En el trabajo de Damba (2008), se confirma que no existe correlación entre los métodos de análisis de adaptabilidad y estabilidad de Lin y Binns, Eberhart y Russell y AMMI; no obstante se concluye que las tres metodologías son complementarias para entender el comportamiento de los genotipos en los ambientes de evaluación. Por otra parte, Flores (2010) sólo encontró un genotipo entre 16 evaluados que presentó el grado de estable por los tres métodos estadísticos, por lo que consideró como estables aquellos que coincidieron en dos o más métodos de análisis. En síntesis estos investigadores coinciden en que el AMMI proporciona más información útil para la selección por ambientes en un programa de mejoramiento.

Conclusiones

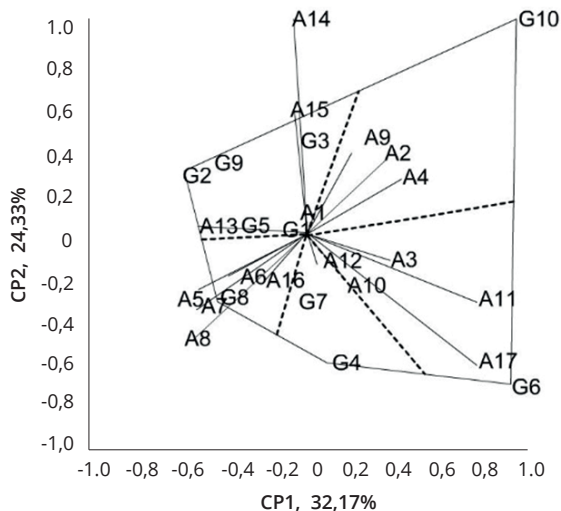


Figura 1. Biplot de análisis AMMI 1 de genotipos de maíz y ambientes de evaluación en Colombia respecto a los dos primeros ejes de componentes principales CP1 y CP2.

El genotipo QPM 303 presentó el mayor rendimiento y la mayor estabilidad, según los métodos Eberhart y Russell, Lin y Binns, y AMMI utilizados para el análisis de estabilidad de genotipos a través de ambientes. El genotipo QPM 305 no presentó diferencia significativa para desviación de la regresión según la metodología de Eberhart y Russell.

Para el rendimiento de grano, los resultados obtenidos por el método Lin y Binns son similares a los obtenidos por el método Eberhart y Russell.

El AMMI presenta el mejor ajuste en el análisis de comportamiento de los genotipos evaluados a través de ambientes, ya que permite hacer una clasificación por ambientes e identificar los genotipos de mejor comportamiento en un ambiente determinado.

El genotipo QPM 303 se desarrolló mejor en el mega-ambiente constituido por Buga, Cereté, Coloso y Buenavista. En el mega-ambiente compuesto por Bolívar, La Jagua del Pilar y Pereira, los mejores genotipos fueron QPM 304 y QPM 306, aunque el primero fue el más estable. Para las condiciones del mega-ambiente Fuente de Oro, Marsella, Lejanías, Granada, Espinal y San Martín los mejores genotipos fueron QPM 308 y QPM 305.

Los genotipos experimentales QPM 302 y QPM 309 no presentaron la calidad proteica de un maíz tipo QPM. El genotipo QPM 303, por sus características promisorias de rendimiento, adaptabilidad, estabilidad y características bioquímicas de un QPM tiene un alto potencial comercial.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas FENALCE), al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y a la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira por el apoyo y financiación brindada para la realización de este trabajo. En especial a los Señores Dupont Pioneer, José Crossa, Edgar Iván Estrada y Francisco Zavala por tomarse el tiempo para revisar este proyecto.

Referencias

- Acevedo, M. 2010. Estabilidad fenotípica de arroz de riego en Venezuela utilizando los modelos Lin y Binns y AMMI. *Agronomía tropical* vol 60 N°2, 131-138.
- Ceballos, H. 1995. Genética cuantitativa y fitomejoramiento. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Bol. Sección VI-4 y VI-8
- Crossa, J. G. 1988. A comparison of results obtained with two methods for assessing yield stability. *Theor. Appl. Genet.* 75:460 - 467.

- Crossa, J. G. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivars trials. *Crop Sci.* 30:493 - 500.
- Damba, G. 2008. Evaluación de métodos para el análisis de estabilidad en diferentes ambientes en genotipos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Trabajo de grado en fitomejoramiento. Palmira. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. pág. 16 de 110
- Eberhart, A. A. y Russel, 1966. Stability parameters for comparing varieties. Iowa State University, Ames, IA. *Crop Sci.* 6:36 - 40.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2009. Global agriculture towards 2050: A third more mouths to feed. Roma. 4 Paginas
- Fenalce (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas). 2013. *Índice Cerealista 2012*: http://www.Fenalce.org/pagina.php?p_a=3#. Recuperado el 15 de marzo de 2013.
- Fenalce (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas). 2012. Departamento económico, indicadores cerealistas. Fenalce. Colombia 65 p.
- Flores, N. 2010. Comparación de criterios de selección de híbridos experimentales de sorgo para grano (*Sorghum bicolor* L. Moench.) para su liberación a la producción comercial. Trabajo de Grado, Doctorado En Ciencias Agrarias Monterrey. Universidad Nuevo León México. Pág. 100 de 120
- Galicia, L. P. 2012. Protocolos de laboratorio, Laboratorio de calidad nutricional de maíz y análisis de tejido vegetal. México D.F. Cimmyt. Vol 1 pag 8-14
- Gauch, H. J., & Zobel, R. 1988. Predictive and post-dictive success of statistical analyses of yield trials. *Theor. Appl. Genet.* 76 : 1-10 pag
- Kempton, R. 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions. *J. Agric. Sci.* 103:123 - 135.
- Lin, C. B. 1987. Superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can. J. Plant Sci.* 198 - 199.
- Mandel, J. 1971. A New Analysis of Variance Model for Non-Additive Data. *Technometrics*, vol (13). 1-18 pag.
- MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). 2010. Plan País Maíz. Bol. de prensa 0892. Abril 2010. <http://www.minagricultura.gov.co/inicio/noticias.aspx?idNoticia=924>.
- Palacios, N. 2011. Método económico y eficiente para la cuantificación colorimétrica de lisina en grano de maíz (CIMMYT). *Fitotec. Mex.* 344:285 - 289.
- Universidad de Purdue. 1966. Simposio Internacional de Maíz de Alta Calidad Proteínica Cimmyt-Purdue. Indiana, Estados Unidos. 553 pág.
- Upadhyay, S. 2009. Evaluation of quality protein maize QPM genotypes under rainfed mid hill environments of Nepal. *Nepal J. Sci. Techn.* 10:6 - 10.
- USDA, 2013 Agricultural Statistics Annual, table 1-41 International Corn: Area, yield, and production in specified countries, pág 26 http://www.nass.usda.gov/Publications/Ag_Statistics/2012/chapter01.pdf
- Vallejo, F. 2010. *Genética vegetal*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Pag 219-237
- Vallejo, F. A. 2005. *Análisis estadístico para los diseños genéticos en fitomejoramiento*. Palmira. Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Pag 209 - 244
- Vivek, B.; Krivanek, N.; y Palacios-Rojas, S. E. 2008. Mejoramiento de maíz con calidad de proteína QPM: Protocolos para generar variedades QPM. México. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo CIMMYT. 66 páginas
- Yan, W. 2000. Cultivar Evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot crop breeding genetics and cytology. *Genetics* 40:3597-3605.