

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE HÍBRIDOS EXPERIMENTALES DE MAÍZ CON ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA EN COSTA RICA¹

Nevio Bonilla-Morales²

RESUMEN

Análisis de estabilidad de híbridos experimentales de maíz con alta calidad de proteína en Costa Rica. El objetivo de este trabajo fue determinar la adaptación de híbridos experimentales de maíz en Costa Rica. Se evaluaron veinticuatro híbridos experimentales de grano blanco en las condiciones agroecológicas de bosque tropical húmedo, durante el período 2009-2011, en las localidades de Concepción, Guagaral, Chánguena, El Águila, Veracruz, Los Chiles y Upala, con temperaturas entre 26 y 35°C y una precipitación entre los 2700-3200 mm, esto con el fin de obtener el rendimiento y respuesta a los principales factores abióticos y bióticos. Se empleó un diseño de alfa látice con tres repeticiones. Los híbridos fueron evaluados en dos ciclos de siembra por localidad y por año. Los resultados del análisis combinado indicaron diferencias significativas al 0,05 entre genotipos y el gráfico del AMMI-biplot evidenció que los materiales con mayor estabilidad fueron: CLQRCWQ121/CLQRCWQ122)//CML491 (QPM); CML494/CML495 (Normal); (CLQRCWQ121/CLQRCWQ26)//CML491 (QPM); (CLQRCWQ121/CML502)//CML491 (QPM) con rendimientos promedio de 9,3; 9,0; 8,7 y 8,8 t/ha, respectivamente. Las localidades donde se obtuvo mayor rendimiento fueron El Águila y Guagaral, 9,8 y 8,5 t/ha, respectivamente. En cuanto a la interacción de localidades y genotipos el AMMI biplot mostró que El Águila y Guagaral tuvieron condiciones agroclimáticas más favorables para la expresión del potencial de los híbridos evaluados. Por su parte, Veracruz y Concepción presentaron condiciones agroclimáticas menos favorables para el desempeño de los materiales. La interacción genotipo x ambiente tuvo un valor de 62,1% en la prueba de Gollob.

Palabras clave: genotipos de maíz, AMMI, QPM, Biplot, componentes principales.

ABSTRACT

Stability analysis of experimental maize hybrids with high quality protein in Costa Rica. The objective of this work was determine the adaptation of experimental maize hybrids in Costa Rica. Twenty four white grain experimental hybrids were evaluated in agroecological conditions of humid tropical forest during 2009-2011, at Concepción, Guagaral, Chánguena, El Águila, Veracruz, Los Chiles and Upala with temperatures between 26 and 35°C and rainfall between 2700-3200 mm, in order to evaluate its performance, yield and adaptation to major abiotic and biotic conditions. Trials were established in twelve locations using an alpha lattice design with three replications. The hybrids were evaluated in two planting cycles per location per year. The results of the combined analysis indicated significant differences between genotypes at 0.05, and AMMI-biplot graphs showed that the more stable materials were: CLQRCWQ121/CLQRCWQ122)//CML491 (QPM); CML494/CML495 (Normal); (CLQRCWQ121/CLQRCWQ26)//CML491 (QPM); (CLQRCWQ121/CML502)//CML491 (QPM) with average yields of 9.3, 9.0, 8.7 and 8.8 t/ha, respectively. The locations where yield was higher were Guagaral and El Águila with 9.8 and 8.5 t/ha, respectively. As for the interaction of locations and genotypes, AMMI-biplots showed that locations Guagaral and El Águila offered more favorable growing conditions for the expression of the potential of the hybrids evaluated. Meanwhile, Veracruz and Concepción had less favorable growing conditions for the performance of the materials. AMMI analysis showed that PCA1 explains significantly genotype x environment interaction with a value of 62.1% in the test Gollob.

Key words: genotypes, AMMI, QPM, Biplot, principal components.

¹ Recibido: 17 de marzo, 2012. Aceptado: 10 de octubre, 2012. Este trabajo es parte del proyecto de granos básicos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

² Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Apartado Postal 10094, San José, Costa Rica. nbonilla@inta.go.cr

INTRODUCCIÓN

El maíz es una fuente de almidón pero su contenido de proteína es más bajo que el de otros cereales. Entre las clases de maíz, el amarillo es el más nutritivo por su alto contenido de vitamina A. El maíz de alta calidad de proteína (QPM) tiene un alto contenido de lisina y triptófano que son aminoácidos esenciales (Paliwal y Granados 2001).

La liberación de híbridos modernos de maíz, tolerantes a factores adversos, bióticos y abióticos, contribuirá a reducir las pérdidas poscosecha. Un adecuado entendimiento de los aspectos fisiológicos correlacionados con el rendimiento y la incorporación de índices de selección más eficientes en las metodologías de mejoramiento para ambientes adversos, han mejorado las técnicas de selección (Córdova 1990, Córdova *et al.* 2002).

En el maíz existen cuatro clases de proteínas: globulina, albúmina, prolamina (zeína) y glutelina. La zeína es una proteína de pobre calidad y constituye más de la mitad del contenido del maíz normal. El gen opaco-2 disminuye la zeína en el grano hasta en un 50% y aumenta los niveles de lisina y triptófano. El maíz con alta calidad de proteínas también denominado QPM, por sus siglas en inglés (Quality Protein Maize) es portador del gen opaco-2, es decir son ricos en lisina y triptófano, contando con el doble de unidades que los maíces normales (Krivanek *et al.* 2007).

A partir de los años 1970, los fitomejoradores del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), apoyados por el laboratorio de bioquímica de esa institución, continuaron mejorando las características agronómicas y nutricionales de estos maíces. En los primeros años de la década de los 90 presentaron al mundo científico variedades de maíz con alta calidad nutritiva, altos rendimientos, humedad normal en el grano y aspecto de grano duro normal (no harinoso). Para 1996, el maíz Opaco-2 había sido modificado a lo que se podría llamar un maíz tipo "normal" en todas sus características, excepto por el valor nutricional de su proteína. Actualmente estos nuevos materiales son considerados como una de las estrategias para mitigar la desnutrición en zonas de pobreza y alta desnutrición (Paliwal y Granados 2001, Córdova *et al.* 2002, Bonilla 2005, Gordón *et al.* 2010).

El análisis de varianza y regresión conjunta, es una metodología empleada ampliamente para explicar la interacción genotipo x ambiente (Eberhart

y Russell 1966, Perkins y Jinks 1968). Las técnicas multivariadas también han sido utilizadas para estudiar los efectos de la interacción genotipo x ambiente; por ejemplo, el análisis de componentes principales (PCA), de coordenadas, y de clúster (Crossa 1990). El desarrollo del modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacción multiplicativa), que integra análisis de varianza y de componentes principales (Castañón *et al.* 2000, Yan *et al.* 2000), ha mostrado su eficiencia para explicar una proporción de la suma de cuadrados de la interacción, superior a la obtenida con el análisis de varianza y regresión conjunta (Gauch y Zobel 1988, Crossa 1990, Crossa *et al.* 1990, Crossa *et al.* 1991, Yan *et al.* 2000, Crossa *et al.* 2002, Leem y Johnson 2005, Yang *et al.* 2009).

Es importante definir el concepto de estabilidad con que se trabaja, esto sin tomar en cuenta la metodología empleada para estimar la interacción genotipo x ambiente. Becker (1981), Lin *et al.* (1986), Becker y León (1988), definen conceptos de estabilidad fenotípica que se complementan desde el punto de vista estadístico, biológico y agronómico.

Existen numerosos ejemplos de la utilización de las diversas metodologías aplicadas a evaluaciones de la interacción genotipo x ambiente, de manera que se determinan los genotipos más estables y los ambientes más discriminantes (Camargo *et al.* 2003, Bonilla 2005, Gordon *et al.* 2006, Gordon *et al.* 2010).

El objetivo de este trabajo fue determinar la adaptación de híbridos experimentales de maíz en diversas localidades de Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el período 2009 a 2011 se evaluaron 24 híbridos experimentales de grano blanco. Las condiciones agroecológicas de los sitios experimentales en general fueron de bosque tropical húmedo con temperaturas entre 26 y 35°C y una precipitación promedio entre 2700-3200 mm por año. Los ensayos se establecieron en ocho localidades: Concepción de Pilas, Guagaral y Chánguena ubicadas en Buenos Aires, Puntarenas y Veracruz, El Águila, El Progreso en Pejibaye de Pérez Zeledón, San José, Costa Rica (Cuadro 1).

Previo a la siembra de los ensayos se tomaron muestras de suelo en cada localidad para su análisis físico-químico. Las muestras fueron homogenizadas y enviadas al laboratorio de suelos del Instituto

Cuadro 1. Ubicación, coordenadas geográficas y altitud de doce localidades del ensayo de evaluación de híbridos de maíz en las regiones Brunca y Huetar Norte, Costa Rica. 2009-2011.

Localidad	Provincia	Cantón	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Concepción	Puntarenas	Buenos Aires	9° 6' 21"	83° 27' 5"	453
Guagaral*	Puntarenas	Buenos Aires	9° 4' 29"	83° 30' 39"	364
Chánguena	Puntarenas	Buenos Aires	8 ° 59' 18"	83° 13' 34"	457
Veracruz *	San José	Pejibaye	9° 05' 47"	83° 32' 50"	675
El Águila*	San José	Pejibaye	9° 07' 51"	83° 31' 32"	520
Los Chiles*	Alajuela	Los Chiles	10° 54' 26»	84° 33' 54»	60
San José de Upala*	Alajuela	Upala	10° 59' 59»	85° 7' 39»	49

*Se instalaron dos ensayos en cada una de estas localidades. Datos medidos con GPS Garmin.

Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) en donde se realizó el análisis. El análisis de suelo de los sitios mostró una relativa variabilidad; en donde se encontraron suelos desde muy ácidos (pH 4,6) a medios (pH 6,4), con textura franco-arcillosa. En relación a la fertilidad todos los suelos son bajos en potasio, de contenido medio en calcio, excepto la localidad de Concepción, bajos en aluminio excepto en Concepción y Veracruz, medio en magnesio, solamente alto en Guagaral. El

contenido de fósforo es muy variable siendo de bajo a medio excepto Concepción. El contenido de materia orgánica es bajo con niveles de 2 a 5% (Cuadro 2).

Los materiales evaluados fueron obtenidos del Centro Internacional de Mejoramiento en Maíz y Trigo (CIMMYT) con sede en México. El ensayo incluyó nueve híbridos experimentales de grano de color blanco normal, trece de grano de alta calidad de proteína (QPM) y dos testigos locales (3086 y HS23) de grano normal (Cuadro 3).

Cuadro 2. Principales características físico químicas de los suelos de los ensayos de híbridos de maíz blanco normal y QPM en las seis localidades. Región Brunca, Costa Rica. 2009-2011.

Localidad	pH	P	K	Ca	Mg	Al	M.O.	Mn	Fe	Zn	Cu	Textura
Concepción	5,1	46	0,79	8,3	3,5	0,65	< 1	23	167	2,8	8,0	Franco arcilloso
Guagaral	6,0	20	0,69	35	6,8	0,11		5	12	2,4	2	Franco arcilloso
El Águila	6,4	20	0,98	17,8	2,8	0,30	4,6	7	42	1,2	3	Franco arcilloso
El Progreso	5,5	9	0,41	12,7	2,7	0,20		69	49	3,0	5	Franco arcilloso
Veracruz	4,6	3	0,87	8,7	2,3	0,90	4,4	120	59	3,8	5	Franco arcilloso
La Bonga	5,8	9	0,80	16,8	2,8	0,15	2,3	35	8	2,4	2	Franco arcilloso

Fuente: Laboratorio de Suelos Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

Cuadro 3. Nombre, tipo del grano y genealogía de los híbridos de maíz normal y QPM evaluados en las regiones Brunca y Huetar Norte, Costa Rica. 2009-2011.

Híbrido*	Origen	Tipo de grano
1 (CLG2312/CML495)//CML494	AF08A-412-25/26	Normal
2 (CLRCW85/CLRCW95)//CML494	AF08A-412-21/22	Normal
3 (CLRCW88/CLRCW85)//CML494	AF08A-412-13/14	Normal
4 (CLRCW88/CLRCW95)//CML494	AF08A-412-15/16	Normal
5 (CLRCW92/CLRCW85)//CML494	AF08A-412-5/6	Normal
6 (CLRCW92/CLRCW95)//CML494	AF08A-412-9/10	Normal
7 (CLRCW92/CLRCW97)//CML494	AF08A-412-7/8	Normal
8 CLRCW92/CLRCW96//CML494	AF08A-412-3/4	Normal
9 CML494/CML495	AF07A432-388/389	Normal
10 (CLQRCWQ10/CLQ6315)//CML503	AF06A283-363/369	QPM
11 (CLQRCWQ116/CML491)//CML503	AF08A-218-31/32	QPM
12 (CLQRCWQ121/CLQRCWQ108)//CML491	AF08A-218-9/10	QPM
13 (CLQRCWQ121/CLQRCWQ122)//CML491	AF08A-218-1/2	QPM
14 (CLQRCWQ121/CLQRCWQ26)//CML491	AF08A-218-7/8	QPM
15 (CLQRCWQ121/CML502)//CML491	AF08A-218-5/6	QPM
16 (CLQRCWQ122/CLQRCWQ26)//CML491	AF08A-218-15/16	QPM
17 (CLQRCWQ122/CML502)//CML491	AF08A-218-13/14	QPM
18 (CLQRCWQ26/CLQRCWQ108)//CML491	AF08A-218-29/30	QPM
19 (CLRCWQ90/CLQRCWQ108)//CML491	AF08A-218-23/24	QPM
20 (CLRCWQ90/CLQRCWQ26)//CML491	AF08A-218-21/22	QPM
21 (CML502/CLQRCWQ108)//CML491	AF08A-218-27/28	QPM
22 (CML502/CLQRCWQ26)//CML491	AF08A-218-25/26	QPM
23 3086	Pioneer	Normal
24 HS23	Christiani Burkard	Normal

* Con excepción de los híbridos 9 (simple), 23 (doble) y 24 (doble), todos los híbridos son triples.

El sistema de siembra utilizado, bajo condiciones de época lluviosa, en los diferentes experimentos fue de mínima labranza con siembra manual y aplicación de herbicida glifosato a razón de 2,5 kg i.a/ha. La densidad de siembra fue de 53 000 plantas por hectárea con distancias de 0,75 m entre surcos y 0,50 m entre sitios de siembra depositando tres semillas por sitio y realizando un raleo a los quince días después de la siembra para dejar dos plantas por sitio. La fertilización consistió en la aplicación de 120 kg/ha de fórmula comercial 10-30-10 a los ocho días después de la

siembra (dds) incorporada al suelo a 5 cm de la planta. Luego se realizaron dos aplicaciones de 50 kg/ha de nitrato de amonio, la primera a los 22 días después de la siembra y la segunda a los 35 dds a razón de 90 kg/ha. El control de malezas se realizó durante el período de los 15 a los 45 dds utilizando glifosato a razón de 2,0 kg i.a /ha (Bonilla 2009).

Las variables evaluadas fueron: rendimiento de grano (kg/parcela), altura de planta (cm), altura de mazorca (cm), en cuanto a variables cualitativas como la incidencia de plagas y patógenos de importancia

económica se determinaron con una escala de 1 a 5 donde 1 es la no presencia del patógeno o la plaga y 5 la planta completamente afectada. Se evaluaron tres por cada medición. La cobertura de mazorca, número de plantas y mazorcas al momento de la cosecha, porcentaje de plantas acamadas y la pudrición de mazorcas se determinaron por conteo tomando todas las plantas de la parcela útil. Las variables como días a floración femenina, aspecto de planta y mazorca se determinaron registrando el número de días, escala de 1 a 5 donde 1 es excelente y 5 es deficiente evaluando tres plantas por parcela. La humedad del grano se midió utilizando un determinador de humedad.

Para las variables medidas en términos de porcentaje se utilizó la transformación de arcoseno de la raíz cuadrada de x para su posterior análisis.

El tamaño de las parcelas experimentales constó de dos surcos de 5 m de largo distanciados a 0,75 m. Para el establecimiento en campo se utilizó un diseño de alfa látice con tres repeticiones mediante un arreglo de 4 x 6 (bloques x genotipos) de acuerdo con el siguiente modelo matemático:

$$X_{ijL} = \mu + G_i + B_{j/L} + A_L + (GA)_{iL} + e_{ij}$$

en donde:

X = Valor del carácter estudiado

A_L = efecto de ambiente

μ = Media general

$(GA)_{iL}$ = efecto de la interacción genotipo ambiente

G_i = efecto de genotipo

e_{ij} = error experimental

$B_{j/L}$ = efecto de bloques dentro de repetición

Se realizó un análisis de varianza combinado, con base en un modelo mixto (ambiente aleatorio y genotipo fijo). Se separó el efecto de la suma de cuadrados de los genotipos normales y QPM así como la diferencia entre ambos grupos. Para la separación de medias de todas las variables se utilizó la diferencia mínima significativa (DMS). Para el análisis estadístico de las variables porcentaje de plantas acamadas y de mazorcas podridas se utilizó la transformación por el método de la raíz cuadrada más un medio. Para el análisis de estabilidad se utilizó el modelo AMMI Biplot GGE-SREG, que integra el análisis de varianza y el análisis de componentes principales (Gauch y Zobel 1988, Yan *et al.* 2000, Yan 2001, Yan y Hunt 2002a, Yan *et*

al. 2007, Yan y Hunt 2002b, Yan y Tinker 2005, Yan y Tinker 2006) el modelo matemático es:

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

en donde:

Y_{ge} = rendimiento promedio de un genotipo g en un ambiente e

μ = Media general

α_g = efecto de las desviaciones de las medias de los genotipos

β_e = efecto de las desviaciones de las medias del ambiente

N = número de Pca retenidos en el modelo

λ_n = es el valor singular para el Pca

Y_{gn} = Valores de vectores de los genotipos (Pca)

δ_{en} = Valores de los vectores para cada ambiente (Pca)

ρ_{ge} = residual

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

Según el análisis de varianza combinado hubo una diferencia altamente significativa ($P < 0,01$) entre ambientes y genotipos para rendimiento de grano. Excepto la altura de plantas y la posición de la mazorca. La interacción genotipo ambiente resultó altamente significativa para todas las variables estudiadas con excepción de la altura y número de plantas cosechadas, mazorcas por metro cuadrado y por planta, y su aspecto y posición.

Efecto de ambientes

Para este trabajo el ambiente (localidad) obtuvo un 49,05% de la suma de cuadrados total del análisis de varianza para la variable rendimiento de grano. Esto indica que los ambientes considerados fueron relativamente contrastantes con diferencias en la magnitud de las respuestas entre las medias ambientales. En el Cuadro 4 se presentan las medias de rendimiento, altura de planta y mazorca y otras características por localidad. Los rendimientos mayores se obtuvieron en las localidades de El Águila, El Águila 1 y Guagaral 1 con

Cuadro 4. Medias de rendimiento, altura de planta y mazorca y otras características según localidades. Costa Rica. 2009-2011.

Localidades	Rendimiento (t/ha)	Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Número mazorcas	Mazorcas podridas	Aspecto mazorca	Aspecto de planta	Cobertura mazorca
El Águila 1	9,6236	269,7	138,3	40,6	5,7	3,0	3,5	6,5
El Águila	9,3889	271,8	129,4	39,0	2,5	3,3	3,1	3,6
Guagaral 1	8,3778	262,2	127,5	40,0	4,8	3,2	3,5	2,8
Concepción	7,0681	276,9	131,8	40,7	4,3	3,1	3,4	0,2
Guagaral	6,7958	228,6	107,8	38,5	7,7	3,6	3,6	4,6
Veracruz 1	6,6764	240,7	122,5	41,9	7,9	3,0	3,0	2,2
Chánguena	5,8653	243,8	113,1	35,0	2,1	3,4	3,7	4,3
Upala 1	5,6764	231,2	115,4	23,6	2,7	4,0	3,7	2,1
Veracruz	4,9681	230,5	105,1	40,6	4,1	3,9	3,6	10,6
Los Chiles	4,9042	227,6	119,2	34,9	17,0	4,0	3,0	7,9
Los Chiles 1	4,1736	212,7	102,1	23,0	3,6	3,6	3,6	6,0
Upala	2,6167	221,2	114,2	32,9	16,6	3,9	3,6	11,5

valores de 9,6, 9,4 y 8,4 t/ha respectivamente, indicando que se dio un contraste en las magnitudes de respuesta de los genotipos en cada ambiente. Estas localidades ofrecieron las mejores condiciones agroecológicas para la expresión de los genotipos. El rendimiento promedio en todas las localidades se ubicó en 6,3 t/ha. Los Chiles y Upala presentaron un mayor porcentaje de pudrición de mazorca lo cual aparentemente afectó el rendimiento de los genotipos, sin embargo en otras localidades se vio afectado el rendimiento (número de mazorcas como en el caso de Upala y Los Chiles y la cobertura de mazorca en Veracruz y Upala).

Efecto de genotipos

En cuanto a los genotipos el análisis de varianza mostró diferencias significativas ($P < 0,01$) entre los diferentes híbridos evaluados para la variable rendimiento de grano; en este caso se logró obtener el 4,72% de la suma de cuadrados total del análisis de varianza para esta variable. Los híbridos CML494/CML495 (9), (CLQRCWQ121/CLQRCWQ108)//CML491 (12), CLRCW92/CLRCW96//CML494 (8) y (CLQRCWQ122/CML502)//CML491 (17) presentaron los mayores rendimientos siendo dos híbridos normales y dos QPM de manera alterna. El híbrido simple presentó un rendimiento superior debido a

que la combinación de los dos progenitores mostró su máxima expresión de combinación híbrida siendo las dos líneas que lo componen individuos de patrones heteróticos diferentes. En promedio el rendimiento de los híbridos QPM superó a los híbridos normales (6,6 y 6,0 t/ha respectivamente). Para las otras variables no se encontraron diferencias significativas entre los híbridos evaluados excepto para altura de planta y mazorca, esto sugiere que las diferencias en rendimientos son debido al potencial y adaptabilidad de cada uno de ellos y no a la población de plantas cosechadas (Cuadro 5).

Interacción genotipo por ambiente

El análisis de varianza para la variable rendimiento de grano, así como el valor de los dos primeros ejes del componente principal de la interacción genotipo ambiente (PCA), obtenidos a través del modelo AMMI Biplot GGE-SREG indicaron significancia para el modelo AMMI, el ambiente, el genotipo y la interacción genotipo x ambiente.

La gráfica Biplot GGESREG que toma en cuenta los valores de los dos ejes principales (PCA1 y PCA2), tanto de los 24 híbridos como de los doce ambientes se presenta en la Figura 1. Los dos primeros ejes explicaron el 60,72% de la interacción genotipo ambiente con

Cuadro 5. Medias de rendimiento, altura de planta y mazorca y otras características de 24 híbridos evaluados en ocho localidades en Costa Rica. 2009-2011.

Genotipos*	Rendimiento (t/ha)	Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Número mazorcas	Mazorcas podridas	Aspecto mazorca	Aspecto de planta	Cobertura mazorca
1	5,71389	266,3	132,6	39,7	5,0	3,0	3,4	3,6
2	5,55833	258,2	123,9	37,1	5,4	3,7	3,5	3,7
3	6,34444	267,4	123,3	41,3	5,5	3,5	3,2	4,4
4	6,26667	264,5	129,9	39,2	5,7	2,9	3,5	5,4
5	6,41389	245,6	109,6	41,8	3,7	2,8	3,4	3,6
6	6,03056	249,8	128,5	42,3	4,5	3,2	3,4	4,3
7	6,07778	265,7	135,1	41,5	6,9	3,2	3,2	4,1
8	6,96667	267,1	132,5	41,1	5,9	3,2	3,4	3,7
9	7,10556	249,4	114,8	41,6	6,7	3,3	3,3	4,6
10	6,70556	232,2	94,1	37,0	6,8	3,1	3,7	5,4
11	6,84167	248,9	112,7	38,8	4,6	3,1	3,6	2,4
12	7,06667	257,2	134,3	39,0	4,0	3,2	3,1	3,1
13	6,79167	259,3	132,3	40,9	5,0	3,0	3,1	1,5
14	6,34722	263,3	125,9	43,0	5,6	3,2	3,2	2,6
15	6,92520	257,9	124,1	40,5	5,0	3,2	3,3	2,5
16	6,68056	258,9	131,2	41,7	7,3	3,1	3,4	2,5
17	6,95556	255,9	130,2	40,6	4,2	3,3	3,4	2,7
18	6,30278	259,4	135,2	38,9	4,0	3,3	3,4	2,9
19	6,21944	259,9	134,0	39,7	6,2	3,6	3,3	4,2
20	6,45556	265,7	128,6	39,9	4,9	3,1	3,3	2,0
21	6,43056	261,0	124,8	41,0	5,6	3,3	3,5	3,0
22	6,16667	267,7	134,7	39,3	6,5	3,4	3,3	2,4
23	4,31389	248,2	124,3	34,5	10,9	2,9	3,2	2,4
24	5,58889	259,6	131,0	39,2	5,2	3,4	3,6	2,5

* Genotipos normales (1 al 9 y 23 a 24). Genotipos QPM (10 al 22).

el 29,3% de los grados de libertad. El PCA -1 explicó el 42,2%, mientras que el PCA -2 fue responsable del 18,5% con el 13 y 12,2% de los grados de libertad, respectivamente. Al graficar las puntuaciones de ambos ejes principales, se forma un polígono con los cultivares que quedan en la parte externa de la figura, de manera que, este análisis permite agrupar a los ambientes con similar comportamiento (Yan *et al.* 2000, Gordón *et al.* 2006, Gordón *et al.* 2010). Para este experimento se logró separar tres grupos ambientales.

El primero (Grupo ambiental 1) lo conforman las localidades Concepción, El Águila1, Los Chiles1 y Upala 1; el promedio de rendimiento de estas fue de 6,29 t/ha. El segundo (Grupo ambiental 2) lo constituyeron los ensayos ubicados en Upala y Chánguena; en estas localidades el rendimiento promedio fue de 4,24 t/ha. El tercero (Grupo ambiental 3) estuvo formado por los ensayos sembrados en El Águila, Guagaral, Los Chiles, Veracruz, Veracruz1 y Guagaral; en esta localidad, la media de rendimiento fue de 6,85 t/ha.

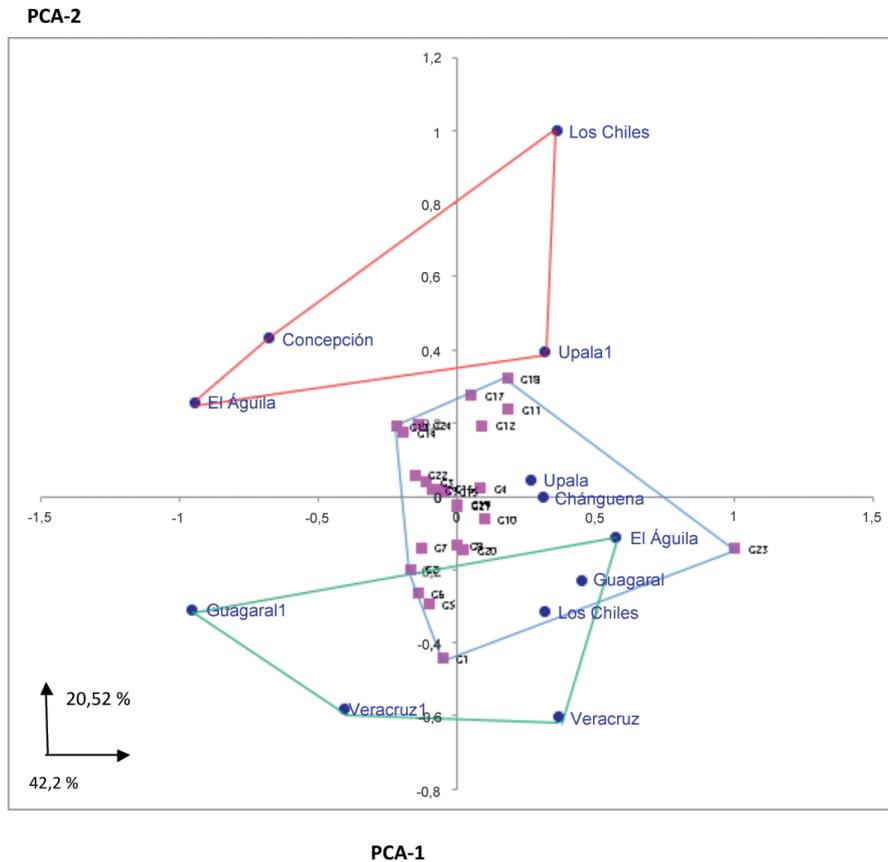


Figura 1. Puntuaciones del primer (PCA-1) y segundo (PCA-2) eje del componente principal (Biplot) de 24 híbridos de maíz evaluados en doce ambientes de Costa Rica, 2009-2011.

De acuerdo a las puntuaciones del eje PCA2, los genotipos más estables fueron los híbridos (CLQRCWQ121/CML502)//CML491; CML494/CML495; CLQRCWQ122/CLQRCWQ26)//CML491, (CLRCW88/CLRCW95)//CML494; (CLRCW88/CLRCW85)//CML494 y (CML502/CLQRCWQ26)/CML491 (valores cercanos a cero), mientras que los híbridos (CLQRCWQ122/CML502)//CML491, (CLQRCWQ26/CLQRCWQ108)//CML491, (CLQRCWQ121/CLQRCWQ108)//CML491 y (CLQRCWQ116/CML491)//CML503 fueron los que mejor respondieron a los estímulos ambientales por estar en las esquinas del polígono, presentando el mejor rendimiento los híbridos CML494/CML495 y (CLQRCWQ121/

CLQRCWQ108)//CML491 con 7,11 y 7,07 t/ha respectivamente (Yan *et al.* 2000, Yan *et al.* 2001) (Cuadro 6).

Con relación a la interacción genotipo ambiente, los híbridos con el mejor desempeño en cada uno de los grupos ambientales, se encuentran cerca de cada grupo ambiental (Yan 2001, Yan y Hunt 2002b, Yan y Rajcan 2002). Ejemplo de esto, el híbrido (CLQRCWQ122/CML502)//CML491, el cual tuvo buen comportamiento en las localidades del Grupo 1 y 2 (tercero y segundo lugar) con medias de 7,95 y 5,22 t/ha pero ocupó la posición 12 en la localidad del Grupo 3 con 6,87 t/ha, mientras que el híbrido (CLQRCWQ121/CLQRCWQ108)//CML491 fue el de mejor rendimiento (8,17 t/ha) en los ambientes del

Cuadro 6. Valores finales corregidos de rendimiento, componentes PCA1 y PCA2 de 12 localidades y 24 híbridos para diseño del gráfico biplot. Costa Rica. 2009-2011.

Localidad	Rendimiento (t/ha)	PCA1 ¹	PCA2 ¹
El Águila	9,38889	0,57419	-0,11126
El Águila1	9,62361	-0,94165	0,25967
Chánguena	5,86528	0,31016	0,00093
Los Chiles	4,90417	0,31976	-0,31295
Los Chiles1	4,17361	0,35987	1,00000
Concepción	7,06806	-0,67428	0,43469
Guagaral	6,79583	0,45018	-0,22684
Guagaral1	8,37778	-0,95206	-0,30720
Upala	2,61667	0,27006	0,04796
Upala1	5,67639	0,31873	0,39592
Veracruz	4,96806	0,36705	-0,60178
Veracruz1	6,67639	-0,40199	-0,57913

Híbrido	Rendimiento (t/ha)	Puntaje PCA1	Puntaje PCA2
(CLG2312/CML495)//CML494	5,71389	-0,04973	-0,44131
(CLRCW85/CLRCW95)//CML494	5,55833	-0,16439	-0,19713
(CLRCW88/CLRCW85)//CML494	6,34444	-0,10721	0,04138
(CLRCW88/CLRCW95)//CML494	6,26667	0,08658	0,02478
(CLRCW92/CLRCW85)//CML494	6,41389	-0,10059	-0,29381
(CLRCW92/CLRCW95)//CML494	6,03056	-0,13923	-0,26401
(CLRCW92/CLRCW97)//CML494	6,07778	-0,12905	-0,13806
CLRCW92/CLRCW96//CML494	6,96667	0,00096	-0,13279
CML494/CML495	7,10556	-0,08856	0,01917
(CLQRCWQ10/CLQ6315)//CML503	6,70556	0,09926	-0,06112
(CLQRCWQ116/CML491)//CML503	6,84167	0,1848	0,24087
(CLQRCWQ121/CLQRCWQ108)//CML491	7,06667	0,09026	0,19588
(CLQRCWQ121/CLQRCWQ122)//CML491	6,79167	-0,21682	0,19496
(CLQRCWQ121/CLQRCWQ26)//CML491	6,34722	-0,1921	0,17545
(CLQRCWQ121/CML502)//CML491	6,925	-0,04406	0,01721
(CLQRCWQ122/CLQRCWQ26)//CML491	6,68056	-0,05728	0,02197
(CLQRCWQ122/CML502)//CML491	6,95556	0,051	0,27764
(CLQRCWQ26/CLQRCWQ108)//CML491	6,30278	0,18208	0,32585
(CLRCWQ90/CLQRCWQ108)//CML491	6,21944	0,00126	-0,01997
(CLRCWQ90/CLQRCWQ26)//CML491	6,45556	0,02476	-0,14341
(CML502/CLQRCWQ108)//CML491	6,43056	0,00253	-0,02399
(CML502/CLQRCWQ26)//CML491	6,16667	-0,15054	0,06104
3086	4,31389	1	-0,13903
HS23	5,58889	-0,13541	0,19664

¹ PCA1 y PCA2: Primeros ejes del componente principal de la interacción genotipo ambiente (PCA), obtenidos a través del modelo AMMI Biplot GGE-SREG.

Grupo 1, pero su rendimiento quedó en las posiciones 12 y 7 en los ambientes del Grupo 2 y 3 (4,33 y 7,24 t/ha, respectivamente). Este comportamiento se puede

observar al comparar las medias de rendimiento general y por cada grupo ambiental (Cuadro 7). El modelo Biplot GGE-SReg, resultó apropiado para

Cuadro 7. Rendimiento de grano de 24 híbridos de maíz evaluados de acuerdo con cada grupo ambiental de la gráfica Biplot GGE-SREG. Costa Rica. 2009-2011.

Número de entrada	Híbrido	Grupo ambiental 1 ¹	Grupo ambiental 2 ²	Grupo ambiental 3 ³
1	(CLG2312/CML495)//CML494	5,00	2,98	7,10
2	(CLRCW85/CLRCW95)//CML494	5,29	3,47	6,43
3	(CLRCW88/CLRCW85)//CML494	6,68	4,93	6,59
4	(CLRCW88/CLRCW95)//CML494	6,78	4,67	6,46
5	(CLRCW92/CLRCW85)//CML494	5,82	4,30	7,52
6	(CLRCW92/CLRCW95)//CML494	5,67	4,77	6,69
7	(CLRCW92/CLRCW97)//CML494	6,03	3,50	6,97
8	CLRCW92/CLRCW96//CML494	6,92	4,43	7,84
9	CML494/CML495	7,78	4,80	7,43
10	(CLQRCWQ10/CLQ6315)//CML503	6,53	5,17	7,34
11	(CLQRCWQ116/CML491)//CML503	7,74	5,23	6,78
12	(CLQRCWQ121/CLQRCWQ108)//CML491	8,17	4,33	7,24
13	(CLQRCWQ121/CLQRCWQ122)//CML491	8,08	4,37	6,74
14	(CLQRCWQ121/CLQRCWQ26)//CML491	7,37	3,58	6,59
15	(CLQRCWQ121/CML502)//CML491	7,28	4,07	7,64
16	(CLQRCWQ122/CLQRCWQ26)//CML491	6,83	4,83	7,20
17	(CLQRCWQ122/CML502)//CML491	7,95	5,22	6,87
18	(CLQRCWQ26/CLQRCWQ108)//CML491	7,40	4,82	6,07
19	(CLRCWQ90/CLQRCWQ108)//CML491	6,42	3,88	6,83
20	(CLRCWQ90/CLQRCWQ26)//CML491	6,34	3,82	7,41
21	(CML502/CLQRCWQ108)//CML491	7,06	3,58	6,96
22	(CML502/CLQRCWQ26)//CML491	6,84	3,47	6,62
23	3086	2,65	4,08	5,50
24	HS23	6,61	3,48	5,62
Promedio		6,64	4,24	6,85

¹ Concepción, El Águila, Los Chiles y Upala.

² Upala y Chánguena.

³ El Águila, Guagaral, Los Chiles, Veracruz, Veracruz 1 y Guagaral 1.

estimar con precisión los patrones de respuesta de los sintéticos así como de los efectos ambientales.

LITERATURA CITADA

- Becker, HC. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30(3): 835-840.
- Becker, HC; León, J. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101:1-23.

Bonilla, N. 2005. Análisis de estabilidad de cultivares de maíz (*Zea mays* L.) en ambientes de Costa Rica. San José, Costa Rica. *Alcances Tecnológicos* 3(1):63-71.

Bonilla, N. 2009. Cultivo de maíz (*Zea mays* L.) Manual de recomendaciones cultivo de maíz. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). 79 p.

Camargo, I; Gordón, R; Fuentes, M. 2003. Estabilidad y confiabilidad de los nuevos híbridos en comparación al testigo regional HB-83, 1998-2000. *Agronomía Mesoamericana* 14(2):129-134.

- Castañón, G; Zetina, R; Arano, R; Raygoza, B. 2000. El Ammi y Clúster en la selección de los mejores híbridos experimentales de maíz. *Agronomía mesoamericana* 11(1):71-76.
- Córdova, HS. 1990. Estimación de parámetros de estabilidad para determinar la respuesta de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a ambientes contrastantes de Centroamérica, Panamá y México. *In Memoria XXXVL Reunión PCCMCA*. San Salvador. 234 p.
- Córdova, HS; Castellanos, S; Barreto, H; Bolaños, J. 2002. Veinticinco años de mejoramiento en los sistemas de maíz en Centroamérica: Logros y estrategias hacia el 2000. *Agronomía Mesoamericana* 13(1):73-84.
- Crossa, J. 1990. Statistical analysis of multi location trials. *Advances in agronomy* 44:55-85.
- Crossa, J; Gauch, Jr, HG; Zobel, RW. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science* 30:493-500.
- Crossa, J; Fox, PN; Pfeiffer, WH; Rajaram, S; Gauch, Jr., HG. 1991. AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial. *Theoretical Applied Genetics* 81:27-37.
- Crossa, J; Cornelius, PL; Yan, W. 2002. Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype x environment interaction. *Crop Science* 42:619-633.
- Eberhart, SA; Russell, WA. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6:36-40.
- Gauch, HG; Zobel, RW. 1988. Predictive and postdictive success of statistical analysis of yield trials. *Theoretical Applied Genetics* 76:1-10.
- Gordón-Mendoza, R; Camargo-Buitrago, I; Franco-Barrera, J; González-Saavedra, A. 2006. Adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 17(2):189-199.
- Gordón-Mendoza, R; Franco-Barrera, J; Camargo-Buitrago, I. 2010. Adaptabilidad y estabilidad de 20 variedades de maíz, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 21(1):11-20.
- Krivanek, A; De Groote, H; Gunaratna, NS; Diallo, AO; Friesen, D. 2007. Breeding and disseminating quality protein maize (QPM) for Africa. *African Journal of Biotechnology* 6(4):312-324.
- Lee, EJ; Johnson, DE. 2005. AMMI Macros for multiplicative interaction models, advanced micro devices Inc., Sunnyvale, CA, Kansas State University, Manhattan, KS. Paper 049-31. SUGI 31. Coders' Corner. 10 p.
- Lin, CS; Binns, MR; Lefkovitch, LP. 1986. Stability analysis: where do we stand? *Crop Science* 26(5):894-900.
- Paliwal, RL; Granados, G. 2001. El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 376 p.
- Perkins, JM; Jinks, JL. 1968. Environmental and genotype environmental components of variability. IV Nonlinear interactions for multiple inbred lines. *Heredity* 23:525-535.
- Yan, W; Hunt, LA; Sheng, Q; Szlavics, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega environment investigation based on the GGE Biplot. *Crop Science* 40:597-605.
- Yan, W. 2001. GGEbiplot—A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal* 93(5): 1111-1118.
- Yan, W; Hunt, LA. 2002a. Biplot analysis of multi-environmental trial data. *In* Kang, MS. ed. Quantitative genetics, genomics and plant breeding. Louisiana State University, USA. CABI Publishing, CAB International. p. 289-303.
- Yan, W; Hunt, LA. 2002b. Biplot analysis of diallel data. *Crop Science* 42(1):21-30.
- Yan, W; Rajcan, I. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science* 42:11-20.
- Yan, W; Tinker, NA. 2005. An integrated system of biplot analysis for displaying, interpreting, and exploring genotype by environment interactions. *Crop Science* 45(3):1004-1016.
- Yan, W; Tinker, NA. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. *Canadian Journal of Plant Science* 86:623-645.
- Yan, W; Kang, MS; Ma, B; Woods, S; Cornelius, PL. 2007. GGE Biplot vs. AMMI Analysis of Genotype-by-Environment Data. *Crop Science* 47:643-653.
- Yang, R; Crossa, J; Cornelius, PL; Burgueno, J. 2009. Biplot analysis of genotype x environment interaction: Proceed with caution. *Crop Science* 49:1564-1576.

