

ESTABILIDAD AMBIENTAL EN HÍBRIDOS DE MAÍZ USANDO EL MODELO AMMI EN EL LITORAL ECUATORIANO

ENVIRONMENTAL STABILITY IN HYBRID MAIZE USING THE AMMI MODEL IN THE ECUADORIAN COASTLINE

Marlon Brainer Caicedo Villafuerte¹, Ivette Brigette Ledesma Dávila¹, Jean Paúl Villavicencio Linzán¹, Ezequiel Arístides Saltos Rivera¹, Francisco Daniel Alarcón Cobeña²

¹INIAP, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Km. 5 vía Quevedo-El Empalme, Mocache, Los Ríos, Ecuador

²INIAP, Estación Experimental Portoviejo, Km. 12 vía Santa Ana, Portoviejo, Manabí, Ecuador

Correspondencia a: marlon.caicedo@iniap.gob.ec

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la adaptabilidad y estabilidad del rendimiento de grano en 27 híbridos de maíz, usando el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI). Los ensayos fueron conducidos en tres ambientes del Litoral ecuatoriano durante la época seca del año 2012. Se realizó un análisis de varianza combinado entre ambientes, posteriormente un análisis de consistencia y finalmente el análisis de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa, para la variable rendimiento. El ambiente, híbrido y la interacción híbrido × ambiente explicaron el 13,74, 43,78 y 15.50% del total de la suma de cuadrados, respectivamente. El primer componente principal del análisis del modelo AMMI fue significativo ($P < 0,001$), explicando un 82,11% de la suma de cuadrados de la interacción. Los híbridos triples seleccionados H11 y H15 mostraron alto rendimiento y estabilidad para todos los ambientes. El ambiente más eficiente para discriminar los híbridos fue Santa Ana. El modelo AMMI resultó muy útil para identificar híbridos de maíz altamente productivos y con buena estabilidad.

Palabras clave: Genotipo, ambiente, estabilidad, consistencia, efectos aditivos, interacción.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the adaptability, and yield stability of seed in 27 varieties of hybrid maize using the AMMI (additive main-effects and multiplicative interaction) model. The trials were performed in three types of environments on the Ecuadorian coastline during the dry season of 2012. We conducted a combined analysis of variance and an analysis of consistency of the areas. Finally, we conducted the additive main-effects and multiplicative interaction analysis of the yield variable. The environment, hybrid and the hybrid-environment interaction accounted for 13.74, 43.78 and 15.50% of total sum of squares, respectively. The main component of the AMMI model had a significant ($P < 0,001$) value, accounting for 82.11% of the sum of squares of the interaction. The selected triple hybrids H11 and H15 showed high yield and stability for all three environments. The most efficient environment for discrimination of hybrids was the Santa Ana area. The AMMI model proved useful for identifying hybrid maize varieties that were highly productive and stable.

Keywords: Genotype, environment, stability, consistency, additive effects, interaction.



Recibido: 03 de enero de 2017
Aceptado: 30 de mayo de 2017
ESPAMCIENCIA 8(1): 23-32/2017

INTRODUCCIÓN

El maíz duro en el Ecuador es uno de los productos agrícolas más importantes para la economía nacional; y, constituye la principal materia prima para la agroindustria. En el país durante el año 2014, se reportó una producción de 1 536 508 toneladas y un rendimiento promedio de 4,03 t.ha⁻¹, registrándose un incremento en la producción de 7,76% con respecto al año 2013, por lo tanto, disminución de las importaciones en 8,71%. Por el contrario, las exportaciones a Colombia (único comprador), se incrementaron en 69,71% en comparación al 2013. En relación a la producción nacional, Los Ríos, Manabí, Guayas y Loja fueron las principales provincias productoras de grano seco (53,81, 15,07, 14,63 y 7,24%, respectivamente). En estas zonas el uso de semilla híbrida, representó aproximadamente el 80% de la superficie sembrada (SINAGAP, 2014).

El desarrollo de cultivares de alto rendimiento con amplia adaptabilidad es el último objetivo de un mejorador de plantas, previo a su liberación. Sin embargo, alcanzar esta meta es muy complicado debido a la interacción genotipo-ambiente (IGA), fenómeno que limita la eficiencia en la selección y dificulta la identificación de genotipos superiores (Rea y De Sousa-Vieira, 2001). En este contexto es imprescindible medir la estabilidad relativa de los genotipos sometidos a la totalidad de los ambientes predominantes en una región potencial de adaptación (Magari y Kang, 1993). La estabilidad, agronómicamente, se refiere a la capacidad de los genotipos de mostrar un comportamiento altamente previsible en función del estímulo ambiental (Gordón-Mendoza *et al.*, 2006).

Varios métodos estadísticos que permiten estimar la estabilidad de los genotipos han sido reportados (Soluki *et al.*, 2008). Entre los más importantes se encuentran: los análisis de componentes de varianza (Falconer y Mackay, 2006), análisis de varianza con testigos (Voltas *et al.*, 2002), índice de superioridad, regresión lineal y su modelo Finlay y Wilkinson (Finlay y Wilkinson, 1963; Voltas *et al.*, 2002); y, análisis univariados y multivariados. Los análisis de consistencia y de rangos estratificados corresponden a análisis univariados (Voltas *et al.*, 2002); mientras que, los análisis de componentes principales (ACP), clúster y de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI), corresponden a análisis multivariados o multiparamétricos.

El modelo AMMI, ha sido considerado más eficiente que los modelos convencionales de efectos fijos (Zobel *et al.*, 1988), ya que presenta dos atributos principales, el primero es la parsimonia, debido a que el modelo contiene pocos de los grados de libertad de la interacción; y el se-

gundo es la efectividad, ya que contiene la mayor parte de la suma de cuadrados de la interacción, con un residual que posee la mayor parte de los grados de libertad, pero con pequeña suma de cuadrados, lo que le proporciona una predicción estadística más precisa y eficiente (Ebdon y Gauch, 2002). Por su parte Gauch *et al.* (2008), enfatizan que este modelo es muy apropiado para la investigación agrícola, debido a que el ANOVA obtenido por el modelo permite separar los efectos principales de genotipos y ambientes de los efectos de la interacción con facilidad; además, la parte relativa a los componentes principales permite separar la mayor proporción de la variación debida a la IGA en los primeros componentes principales, mientras descarta la proporción de la variación debida al error en los últimos componentes principales.

El método AMMI no solo permite estimar estabilidad, sino también evaluar localidades y como consecuencia clasificar los ambientes (Crossa *et al.*, 1990). El procedimiento AMMI consiste en combinar las técnicas del análisis de varianza y el ACP en un solo modelo, donde el análisis de varianza permite estudiar los efectos principales de genotipos y ambientes; mientras que la interacción (IGA) es tratada de forma multivariada a través del ACP (Castañón *et al.*, 2000). Asimismo, el AMMI unido al uso del "biplot", una técnica de representación gráfica, es una herramienta útil para la interpretación de patrones de respuesta de los genotipos, ambientes y de IGA (Kempton, 1984; Yan *et al.*, 2000).

El ACP es uno de los métodos multivariados más utilizados, y de los más antiguos. En esencia, el método trata de simplificar la estructura de los datos para poder explicar en pocos componentes la mayor parte de la información que contienen las variables. Es útil tanto para la caracterización de condiciones ambientales como para la clasificación de variedades por estabilidad de rendimiento (Wold *et al.*, 1987).

El objetivo de la investigación fue evaluar la adaptabilidad y estabilidad del rendimiento de grano en 27 híbridos de maíz, cultivados en varios ambientes del Litoral ecuatoriano, usando el modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI).

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de los híbridos se realizó en tres ambientes contrastantes de la Costa ecuatoriana durante la época seca del 2012 (Cuadro 1): Quevedo en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP (EETP), Balzar en el Centro de Investigación y Desarrollo "La Josefina" y en Santa Ana en la Estación Experimental Portoviejo del INIAP (EEP).

Cuadro 1. Ubicación geográfica, características edafoclimáticas y tipo de riego practicado en tres ambientes del Litoral ecuatoriano, durante la evaluación de 27 híbridos de maíz

Características	Quevedo	Balzar	Santa Ana
Altitud (msnm)	75	63	45
Latitud	01° 06' S	01° 30' S	01° 10' S
Longitud	79° 27' W	79° 45' W	80° 23' W
Temperatura promedio (°C)	25,5	28,0	24,6
Precipitación anual (mm)	2223	1600	550
Heliofanía media anual (horas)	899	879	1266
Pendiente del terreno (%)	2	30	2
Riego	Humedad remanente (sin riego)	Aspersión	Por gravedad

Material genético

Los tres ensayos estuvieron conformados por veintisiete (27) híbridos: 20 provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y siete híbridos comerciales, de los cuales tres fueron obtenidos en el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y los otros cuatro corresponden a híbridos distribuidos por empresas comerciales. Los genotipos procedentes del CIMMYT y empresas privadas correspondieron a maíces de tipo amarillo dentado y semidentado, mientras que los híbridos generados en el INIAP correspondieron al tipo amarillo duro liso.

Análisis estadístico

Para la evaluación de los híbridos, se utilizó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con tres repeticiones por ambiente. Con los datos de cada ambiente se realizaron análisis de varianzas individuales y posteriormente el análisis de varianzas combinado entre ambientes (Cuadro 3), considerando como fuentes de variación “ambiente”, “híbridos” y la interacción “híbridos × ambiente”. A los híbridos se los consideró como factor fijo, mientras que ambiente y la interacción híbridos × ambiente fueron considerados factores aleatorios. La suma de cuadrados debida a híbridos fue ortogonalmente dividida en tres componentes de variación, híbridos “experimentales”, híbridos comerciales y la comparación entre híbridos experimentales vs comerciales. Igualmente, se dividió en estos mismos componentes de variación, las sumas de cuadrados de la interacción “híbrido × ambiente”.

Una vez detectada la presencia de la IGA, se procedió a estimar los parámetros de estabilidad de los materiales. En primera instancia se realizó un análisis de consistencia mediante un diagrama de cuatro celdas, usando simultáneamente los rangos medios de rendimiento y la desviación estándar de las clasificaciones genotípicas de los dis-

tintos ambientes. La representación gráfica de genotipos y ambientes, permitió asignarlos a una de las siguientes cuatro clases: i) consistentemente superior; ii) inconsistentemente superior; iii) inconsistentemente inferior; iv) consistentemente inferior (Voltas *et al.*, 2002). Bajo este contexto y basados en la regla de decisión: rendimientos superiores a la media de los rangos y desviación estándar menor a la media de las desviaciones; los híbridos localizados en el cuadrante inferior derecho fueron considerados de alta productividad y estables. Por el contrario, los híbridos localizados en el cuadrante derecho superior fueron considerados de alta productividad, pero inestables.

Posteriormente, se realizó el análisis de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI), con base en la ecuación propuesta por Zobel *et al.* (1988):

$$Y_{ij} = \mu + G_i + \sigma_j + t = 1 \lambda_k \alpha_{ij} \gamma_{jk} + p_{ij} + e_{ij} \quad (1)$$

Donde:

Y_{ij} = es el rendimiento del i -ésimo genotipo en el j -ésimo ambiente.

Los parámetros aditivos son:

μ = media general;

G_i = Efecto del i -ésimo genotipo;

σ_j = Efecto del j -ésimo ambiente;

k = es el número de componentes principales (CP) retenidos en el modelo;

λ_k = Valor propio del componente principal K ;

$\alpha_{ij} * \gamma_{jk}$ = Valor del componente principal k de genotipo y localidad.

p_{ij} = es el residual de la interacción IGA

e_{ij} = Error experimental.

Finalmente se realizó una comparación de los resultados, entre los dos métodos usados, para garantizar la selección de los mejores híbridos.

Variables evaluadas

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos para rendimiento de grano. Este carácter fue estimado en función del peso de grano registrado en cada unidad experimental y expresado en $t \cdot ha^{-1}$, ajustado a 13% de humedad.

Manejo del experimento

El manejo de los experimentos se realizó de manera uniforme en los tres ambientes. La siembra de los ensayos de evaluación, se realizó los días 7, 10 y 12 de septiembre en Quevedo, Balzar y Santa Ana, respectivamente. La unidad experimental estuvo constituida por dos surcos de 5,2 m de longitud, resultando una superficie total de 4,2 m^2 . Se sembraron dos semillas por sitio a una distancia

de 0,20 m entre plantas y 0,80 m entre surcos. Posteriormente al raleo, se dejó una planta por sitio, consiguiendo una densidad final de 62500 plantas/ha. La preparación del suelo incluyó, arado y rastrado. Se usó un protector de la semilla, se fertilizó con un programa basado en el análisis químico del suelo de cada zona de estudio, se controlaron las plagas, enfermedades y malezas de manera oportuna en los tres ambientes. La cosecha se realizó manualmente a los 120 días.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de los híbridos

Bajo condiciones ambientales del Litoral ecuatoriano, los resultados del análisis de varianza combinado determinaron significación estadística ($P \leq 0,01$) para ambientes, híbridos, interacción híbridos \times ambiente y sus respectivos desgloses, a excepción de híbridos experimentales \times ambiente que se diferenció al 5 % de probabilidad (Cuadro 2). El promedio general de rendimiento de los híbridos a través de ambientes fue de 6,2 t.ha⁻¹ (Cuadro 3); sin embargo, el promedio de rendimiento de los híbridos comerciales fue superior (7,2 t.ha⁻¹) en comparación al de los híbridos experimentales (5,9 t.ha⁻¹). Dentro del grupo de híbridos comerciales, el híbrido H24 destacó con 8,3 t.ha⁻¹, seguido por H25 (7,9 t.ha⁻¹) y H27 (7,8 t.ha⁻¹); el rendimiento más bajo se observó en el H22 con un promedio de 5,4 t.ha⁻¹ (Cuadro 3). En el grupo de híbridos experimentales, el híbrido H9 mostró el mejor rendimiento con 6,9 t.ha⁻¹; por el contrario, el híbrido H4 mostró el rendimiento más bajo (4,5 t.ha⁻¹). Sin embargo, los híbridos H19 y H20 igualaron en rendimiento al híbrido INIAP H-553 (H21) y superaron al INIAP H-601 (H22) (Cuadro 3). Estos resultados son especialmente interesantes, ya que los dos últimos híbridos mencionados son los más utilizados por los pequeños y medianos productores de las zonas maiceras del Litoral ecuatoriano.

Evaluar los híbridos en diferentes ambientes consiste en una actividad muy importante desde el punto de vista del mejoramiento y es una de las prácticas más usuales para la recomendación de nuevos materiales a los productores de una zona o región específica (Castañón *et al.*, 2000; Tollenaar y Lee, 2002; Gordón-Mendoza *et al.*, 2006). Los resultados obtenidos, han permitido confirmar los resultados reportados por Tollenaar y Lee (2002), justificando plenamente nuestra evaluación en ambientes totalmente diferentes del Litoral ecuatoriano (especialmente en el suministro de agua al cultivo), con la finalidad de seleccionar y ofertar híbridos de mayor rendimiento y alta estabilidad (específica y amplia).

El bajo promedio de rendimiento encontrado en Quevedo y Balzar (5,8 t.ha⁻¹, respectivamente) (Cuadro 3), se debió

principalmente al estrés provocado por la falta de agua durante el período de llenado de grano. En el primer caso, el cultivo se desarrolló bajo condiciones de humedad remanente; es decir, aprovechando la humedad retenida en el suelo después de la época lluviosa, que es una práctica habitual realizada por los productores de maíz en el trópico húmedo del Ecuador. En el caso de Balzar, a pesar de que se contó con un sistema de riego por aspersión, este no fue suministrado en las etapas críticas del cultivo (floración y llenado de grano). La falta de este elemento en varios cultivos ha sido reportada en diversas publicaciones, por el impacto negativo que produce sobre el rendimiento de grano cuando ocurre en floración o en el llenado de grano (Bergamaschi *et al.*, 2006; Sadras y Angus, 2006; Geerts y Raes, 2009). Adicionalmente, en Balzar el problema también puede ser atribuido a que el ensayo fue dispuesto en un terreno que presentó una pendiente pronunciada (Cuadro 1), donde la pérdida de agua y nutrientes es mayor, evidenciándose dicho efecto en todas las etapas fenológicas del cultivo. Por el contrario, en Santa Ana se obtuvieron los más altos rendimientos con una media de 7 t.ha⁻¹, debido a que el riego suministrado fue por gravedad (surcos), esto permitió que las plantas mostraran mayor eficiencia en la captación del agua y nutrientes, resultados que corresponden a los reportados por varios autores (Kang *et al.*, 2000; Lehrsch *et al.*, 2000); por lo tanto, fue el mejor ambiente dentro de la evaluación, donde se obtuvo el promedio más alto de rendimiento de grano (7,0 t.ha⁻¹). En Santa Ana el promedio de rendimiento fue 17,1%, mayor en relación a los obtenidos en Quevedo y Balzar; debido principalmente, a la eficiencia del riego practicado y disponibilidad de agua para el cultivo. Al igual que los resultados obtenidos en el presente trabajo, Ribaut *et al.* (1997) reportaron decrecimiento de hasta el 60% en el rendimiento, debido a la correlación negativa entre el rendimiento de grano y el índice de tolerancia a la sequía.

Cuadro 2. Cuadrados medios de rendimiento registrados en 27 híbridos de maíz evaluados en tres ambientes del Litoral ecuatoriano

Fuentes de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios Rendimiento (t.ha ⁻¹)	
Ambiente	2	42,08	**
Repeticiones (ambientes)	6	5,57	
Híbridos	(26)	10,32	**
Experimentales	19	6,88	**
Comerciales	6	8,22	**
Experimentales vs Comerciales	1	88,26	**
Híbridos \times Ambiente	(52)	1,83	**
Experimentales \times Ambiente	38	1,29	*
Comerciales \times Ambiente	12	2,57	**
Experimentales vs Comerciales \times Ambiente	2	7,63	**
Error	156	0,85	

Cuadro 3. Promedios de rendimiento y valores absolutos del análisis de componentes principales de 27 híbridos de maíz evaluados tres ambientes del Litoral ecuatoriano

Híbridos código	Genealogía	Rendimiento ^{1/} (t.ha ⁻¹)	ACP1
H1	(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)×(CLQ-S89YQ06/CML161)	6,4 ± 0,85	0,50
H2	(CLQ-RCYQ49/CML165)×(CLQ-S89YQ06/CML161)	5,1 ± 0,85	-0,24
H3	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ58)×(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)	4,6 ± 0,85	0,21
H4	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ44)×(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)	4,5 ± 0,85	0,58
H5	(CLQRCYQ60/CLQRCYQ63)×(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)	5,3 ± 0,85	-0,03
H6	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ58)×(CLQ-RCYQ49/CML165)	4,8 ± 0,85	-0,24
H7	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ44)×(CLQ-RCYQ49/CML165)	4,9 ± 0,85	0,09
H8	(CLQRCYQ60/CLQRCYQ63)×(CLQ-RCYQ49/CML165)	4,6 ± 0,85	0,50
H9	(CLRCY044/CLRCY038)×(CLRCY041/CLO2450)	6,9 ± 0,85	0,11
H10	(CLRCY044/CLRCY040)×(CLRCY041/CLO2450)	6,6 ± 0,85	-0,05
H11	(CLQ-S89YQ04/CML161)× CLO2450Q	6,5 ± 0,85	0,06
H12	(CLQRCYQ49/CLQRCYQ59)× CLO2450Q	5,8 ± 0,85	-0,24
H13	(CLQRCYQ49/CLQG2508)× CML165	5,6 ± 0,85	0,12
H14	(CLQG2508/CLQRCYQ67)× CML165	5,3 ± 0,85	0,63
H15	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ58)× CML161	6,3 ± 0,85	0,07
H16	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ44)× CML161	6,7 ± 0,85	0,70
H17	(CLQRCYQ60/CLQRCYQ63)× CML161	6,4 ± 0,85	0,50
H18	(CLRCY041/CLO2450)× CML451	6,7 ± 0,85	-0,21
H19	(CLRCY044/CLRCY038)× CLO2450	6,8 ± 0,85	-0,25
H20	(CLRCY044/CLRCY040)× CLO2450	6,8 ± 0,85	-0,59
H21	INIAP H-553 (T)	6,8 ± 0,85	-0,22
H22	INIAP H-601 (T)	5,4 ± 0,85	-1,34
H23	INIAP H-602 (T)	6,9 ± 0,85	-0,35
H24	DEKALB-1596 (T)	8,3 ± 0,85	-0,42
H25	DEKALB-7088 (T)	7,9 ± 0,85	0,10
H26	PIONEER-30F35 (T)	7,4 ± 0,85	-0,36
H27	INSIGNIA-105 (T)	7,8 ± 0,85	0,38
Promedio de híbridos		6,2	
Promedio de híbridos experimentales		5,9	
Promedio de híbridos comerciales		7,2	
Ambientes			
Balzar		5,8 ± 0,85	
Quevedo		5,8 ± 0,85	0,28
Santa Ana		7,0 ± 0,85	
Promedio de ambientes		6,2	

^{1/}Promedio de rendimiento (t.ha⁻¹) ± error experimental

Análisis de consistencia

Los híbridos H2, H3, H5, H6, H7, H8, H12, H13 y H15 localizados en el cuadrante inferior derecho, mostraron rangos medios de producción mayores a 14 y desviaciones estándar de los rangos menores de 3,2 (Cuadro 4, Gráfico 1), por tanto, tienden a mostrar alta productividad y estabilidad a los ambientes en estudio. En contraste, los híbridos H4, H14 y H22 localizados en el cuadrante derecho superior, son de alta productividad, pero inestables.

El híbrido H24 registró el menor rango medio de rendimiento con un valor igual a 2, mientras que el híbrido H3, fue el que registró el mayor rango medio de 25, cuando el promedio general fue 14.

De los híbridos que mostraron alta productividad y estabilidad, los seis primeros (H2, H3, H5, H6, H7 y H8) son híbridos dobles; es decir, se forman del cruzamiento

entre cuatro parentales; mientras que H12, H13 y H15 son híbridos triples (tres parentales); por lo que, desde el punto de vista de la producción de semilla, estos tres híbridos son de mayor interés en mejoramiento, debido a que requieren menos inversión. La ventaja de estos genotipos es que al tener como madre un híbrido simple es más fácil obtener mayor cantidad de semilla para la formación del híbrido triple; así como, para la venta directa de los progenitores (padre y madre).

El híbrido H7 presentó un valor de desviación estándar del rango igual a cero (Cuadro 4), debido a que coincidentemente, se ubicó siempre en el mismo rango o posición (rango 23) en los tres ambientes evaluados.

Varios autores destacan la eficiencia y aplicabilidad del método que ha sido usado para seleccionar especies forestales (Harfouche, 2000), híbridos de maíz (Liu *et al.*, 2010), cruza intervarietales de maíz (Palemón-Alberto *et al.*, 2012) y variedades de trigo (Kaya y Turkoz, 2016).

Cuadro 4. Rango medio y desviación estándar de 27 híbridos de maíz evaluados tres ambientes del Litoral ecuatoriano

Código	Híbrido	Rango medio	Desviación estándar del rango
H1	(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)×(CLQ-S89YQ06/CML161)	12,3	5,7
H2	(CLQ-RCYQ49/CML165)×(CLQ-S89YQ06/CML161)	22,0	3,0
H3	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ58)×(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)	25,0	1,7
H4	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ44)×(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)	24,3	3,8
H5	(CLQRCYQ60/CLQRCYQ63)×(CLQ-RCYQ44/CLQ-RCYQ40)	21,0	1,0
H6	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ58)×(CLQ-RCYQ49/CML165)	24,3	2,1
H7	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ44)×(CLQ-RCYQ49/CML165)	23,0	0,0
H8	(CLQRCYQ60/CLQRCYQ63)×(CLQ-RCYQ49/CML165)	23,7	2,5
H9	(CLRCY044/CLRCY038)×(CLRCY041/CLO2450)	7,7	3,1
H10	(CLRCY044/CLRCY040)×(CLRCY041/CLO2450)	11,3	1,2
H11	(CLQ-S89YQ04/CML161)× CLO2450Q	12,3	3,1
H12	(CLQRCYQ49/CLQRCYQ59)× CLO2450Q	16,7	2,5
H13	(CLQRCYQ49/CLQ2508)× CML165	18,7	1,2
H14	(CLQG2508/CLQRCYQ67)× CML165	20,0	4,6
H15	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ58)× CML161	15,3	0,6
H16	(CLQS89YQ06/CLQRCYQ44)× CML161	9,0	7,9
H17	(CLQRCYQ60/CLQRCYQ63)× CML161	11,3	5,7
H18	(CLRCY041/CLO2450)× CML451	11,0	1,7
H19	(CLRCY044/CLRCY038)× CLO2450	9,0	2,6
H20	(CLRCY044/CLRCY040)× CLO2450	10,3	7,0
H21	INIAP H-553 (T)	9,7	1,2
H22	INIAP H-601 (T)	17,7	11,4
H23	INIAP H-602 (T)	9,0	4,4
H24	DEKALB-1596 (T)	2,0	1,7
H25	DEKALB-7088 (T)	2,7	1,2
H26	PIONEER-30F35 (T)	4,7	3,1
H27	INSIGNIA-105 (T)	4,0	3,6
Promedio		14,0	3,2

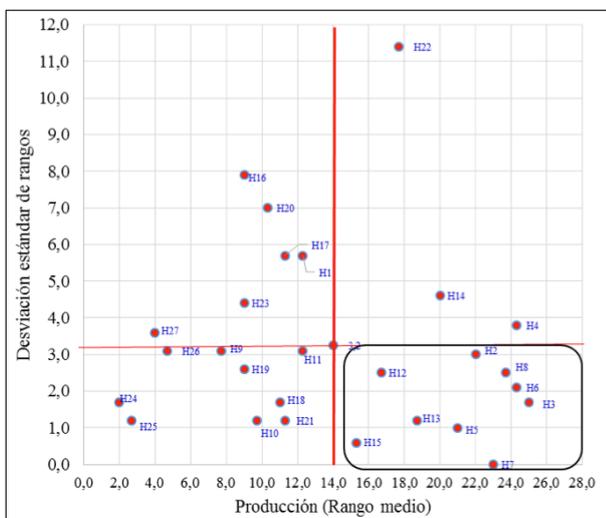


Gráfico 1. Distribución por cuadrantes de la variable rendimiento, en 27 híbridos de maíz evaluados en tres ambientes del Litoral ecuatoriano

Análisis de efectos aditivos principales e interacción multiplicativa (AMMI)

Al realizar el análisis AMMI de 27 híbridos de maíz evaluados en tres ambientes del Litoral ecuatoriano (Cuadro 5), se determinaron diferencias significativas ($P \leq 0,01$) para las fuentes de variación híbridos, ambientes y la in-

teracción genotipo × ambiente, lo que significa que los híbridos respondieron de diferente manera a la variación ambiental; de esta forma, el modelo AMMI explicó el 43,78% para híbridos, 13,74% para ambientes, para la interacción genotipo × ambiente capturó el 15,50% y el error con el 26,98% de la suma de cuadrados, El alto porcentaje que capturó el modelo AMMI para híbridos (43,78%), era de esperarse, debido en primer lugar a los tipo de híbrido evaluados (simples, dobles y triples); y, en segundo lugar, a que existen dos grupos de híbridos, los comerciales (nacionales) y los experimentales introducidos desde el CIMMYT (con y sin adaptación a las condiciones ambientales del Litoral ecuatoriano). Adicionalmente, en este análisis se determinó que únicamente el primer componente (ACP1) obtenido a partir del efecto de la interacción fue significativo ($P \leq 0,01$), el cual explicó el 82,11% de la suma de cuadrados de la interacción genotipo × ambiente.

En concordancia con nuestros resultados García *et al.* (2009), usando AMMI para determinar la estabilidad de rendimiento de siete cultivares de maíz, evaluados en varias localidades de Venezuela, reportaron que el modelo explicó alrededor del 83% de la suma de cuadrados de la IGA; a diferencia de este estudio los autores encontraron significación estadística en los dos primeros ACP (60,61 y 22,29% para ACP1 y ACP2, respectivamente).

Cuadro 5. Análisis de varianza para los efectos lineales y multiplicativos según el modelo AMMI en 27 híbridos de maíz evaluados en tres ambientes del Litoral ecuatoriano

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Significación estadística	Suma de cuadrados AMMI (%)
Total	242	612,78	2,53		
Híbridos	26	268,30	10,32	**	43,78
Ambientes	2	84,20	42,08	**	13,74
Interacción (Genotipo × Ambiente)	(52)	95,00	1,83	**	15,50
ACPI	27	78,00	2,89	**	82,11
Residual	25	17,00	0,68		17,89
Error	162	165,30	1,02		26,98

En el cuadro 3, se muestran los promedios de rendimiento y los valores absolutos del análisis de componentes principales de los 27 híbridos de maíz evaluados. El híbrido H9, obtuvo el mayor rendimiento entre los híbridos experimentales, siendo también uno de los más estables con valor de ACPI próximo a cero; por el contrario, el híbrido H4 mostró el menor rendimiento de grano y es uno de los híbridos que más aportaron al primer eje de la interacción.

En el gráfico 2, se muestra el rendimiento medio en función de las coordenadas del primer eje del análisis de componentes principales (ACPI) de híbridos y ambientes. Los híbridos y ambientes con coordenadas elevadas sobre el ACPI, considerados en valor absoluto, contribuyeron en mayor medida a la IGA; mientras que, los genotipos y ambientes con ACPI próximos a cero lo hicieron mínimamente. El rendimiento promedio fluctuó entre ambientes, de 5,8 t.ha⁻¹ en Quevedo y Balzar a 7 t.ha⁻¹ en Santa Ana. Para los híbridos, el máximo rendimiento (8,3 t.ha⁻¹) fue registrado por el H24 y el mínimo por el H4.

Con respecto a la estabilidad de los híbridos experimentales evaluados, se encontró que los híbridos H5, H7, H9, H10, H11, H13 y H15, resultaron con los valores más cercanos a cero, en la representación gráfica, lo que permitió clasificarlos como estables. El híbrido H25 fue el de mayor estabilidad dentro del grupo de los híbridos comerciales. El ambiente más estable fue Quevedo; sin embargo, mostró bajo rendimiento. Como ya se mencionó, la estabilidad es muy importante debido a que permite al genotipo ajustar su capacidad productiva a la más amplia variación ambiental (Lin *et al.*, 1986).

De los híbridos experimentales que mostraron estabilidad, los híbridos H15, H11, H10 y H9 presentaron pro-

medios de rendimiento mayores al promedio general (6,2 t.ha⁻¹), con 6,3; 6,5; 6,6 y 6,9 t.ha⁻¹, respectivamente.

Los híbridos H4, H14, H16 y H22, junto con los ambientes Balzar y Santa Ana, fueron los que más aportaron al primer eje de la interacción, con valores de ACPI más alejados de cero.

El modelo AMMI subdivide los ambientes de evaluación en zonas más pequeñas de ambientes homogéneos, es así que, se puede observar dos grupos: en el primero están los ambientes y los híbridos con rendimientos menores al promedio; mientras que, en el segundo grupo se encuentra el ambiente y los híbridos que presentaron mayor rendimiento respecto al promedio (Gráfico 2).

En Quevedo y Balzar, los híbridos H9, H11, H15, H16, H17, H25 y H27 fueron los que mejor comportamiento mostraron, con rendimientos superiores a 6,2 t.ha⁻¹. En Santa Ana, los híbridos que presentaron mejor comportamiento fueron H10, H18, H19, H20, H23, H24 y H26.

En el biplano, cuando genotipo y ambiente tienen el mismo signo sobre el eje del primer ACPI, sus interacciones son positivas. Por el contrario, si genotipo y ambiente se encuentran en distinto semiplano con signos distintos, sus interacciones son negativas y no convenientes, como en el caso de los híbridos H2, H5, H6 y H12, en los ambientes de Quevedo y Balzar, al igual que los híbridos H27 y H25 en Santa Ana.

Al realizar un análisis comparativo de los híbridos de alto rendimiento y estabilidad seleccionados, tanto por el análisis de consistencia como por el modelo AMMI, únicamente el híbrido H15 fue común en los dos métodos, por lo que se lo consideró como un híbrido promisorio con toda seguridad.

En relación al uso del modelo AMMI, resultados similares a los obtenidos en la presente investigación han sido reportados en diferentes estudios. En el caso del maíz, Castañón *et al.* (2000) resaltaron la eficiencia de los métodos AMMI y clúster en la estimación de la estabilidad de híbridos experimentales evaluados en condiciones ambientales de México; por su parte García *et al.* (2009), recomendaron la producción de los híbridos Portuguesa-2002, P-30R92 y Portuguesa-2012, en diferentes zonas productoras de Venezuela, basados en los resultados del modelo AMMI. De igual forma, Rad *et al.* (2013), utilizando AMMI identificaron varias cruces entre líneas de trigo que presentaron alto rendimiento y estabilidad para diferentes ambientes de Australia. Adicionalmente, varios autores han demostrado la eficiencia del método AMMI en la determinación de la estabilidad para diferentes cultivos, como: cebada (Kadi *et al.*, 2010), sor-

go dulce (Srinivasa Rao *et al.*, 2011), soya (Asfaw *et al.*, 2009) y arroz (Nassir y Ariyo, 2011).

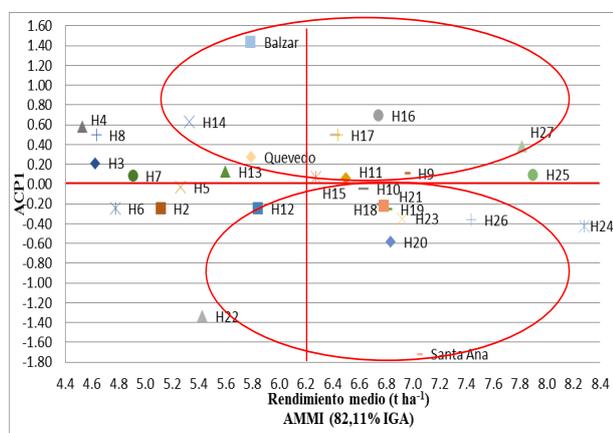


Gráfico 2. AMMI biplot para rendimiento de 27 híbridos de maíz evaluados en tres ambientes del Litoral ecuatoriano

CONCLUSIONES

Los rendimientos superiores a la media general (6,2 t.ha⁻¹) fueron observados en 17 de 27 híbridos, donde se destacaron los híbridos comerciales con 7,2 t.ha⁻¹. El ambiente donde se obtuvieron los más altos rendimientos fue Santa Ana con una media 7,0 t.ha⁻¹, mostrando mayor eficiencia al momento de discriminar los genotipos.

Los híbridos triples H11 (detectado solo por el modelo AMMI) y H15 identificado por los dos métodos (análisis de consistencia y modelo AMMI), presentaron alto potencial productivo y buena estabilidad en los distintos ambientes; por lo que fueron seleccionados como promisorios, para continuar con el proceso de mejoramiento.

El modelo AMMI resultó muy útil para identificar con mayor seguridad híbridos de maíz altamente productivos y buena estabilidad ambiental.

LITERATURA CITADA

- Asfaw, A., Alemayehu, F., Gurum, F., and Atnaf, M. 2009. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia, *Scientific Research and Essays*. 4:1322-1330,
- Bergamaschi, H., Dalmago, G. A., Comiran, F., Bergonci, J. I., Müller, A. G., França, S., Santos, A. O., Radin, B., Bianchi, C. A. M., and Pereira, P. G. 2006. Deficit hídrico e produtividade na cultura do milho, *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 41:243-249.
- Castañón, G., Zetina, R., Arano, R., and Raygoza, B. 2000. El Ammi y Clúster en la selección de los mejores híbridos experimentales de maíz, *Agronomía mesoamericana*. 11:71-76.
- Crossa, J., Gauch, H., and Zobel, R. W. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials, *Crop Science*, 30:493-500.
- Ebdon, J., and Gauch, H. 2002. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turf-grass performance trials, *Crop science*, 42:497-506.
- Falconer, D. S., and Mackay, T. F. C. 2006. *Introducción a la genética cuantitativa*, Acribia.
- Finlay, K., and Wilkinson, G. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme, *Crop and Pasture Science*, 14:742-754.
- García, M., Cabrera, P., Pérez, C., Silva, D., Álvarez, P., Marín, R., Monasterio, P., and Santella, Q. 2009. Yield stability and agronomic potential of maize cultivars with normal and QPMendospem in agroecological zone of Venezuela, *Agronomía Tropical (Maracay)*. 59:433-443.
- Gauch, H. G., Piepho, H.-P., and Annicchiarico, P. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: further considerations, *Crop science*. 4: 866-889.
- Geerts, S., and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*. 96:1275-1284.
- Gordón-Mendoza, R., Camargo-Buitrago, I., Franco-Barrera, J., and Saavedra, A. G. 2006. Evaluación de la

- adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, *Azuero, Panamá, Agronomía Mesoamericana*. 17: 189-199.
- Harfouche, A. 2000. A non-parametric data analysis for studying genotype×environment interaction effects in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Genetics*. 7:253-263.
 - Kadi, Z., Adjel, F., and Bouzerzour, H. 2010. Analysis of the genotype X environment interaction of barley grain yield (*Hordeum Vulgare* L.) under semi arid conditions. *Advances in environmental biology*. 34-41.
 - Kang, S., Liang, Z., Pan, Y., Shi, P., and Zhang, J. 2000. Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area. *Agricultural Water Management*. 45:267-274.
 - Kaya, Y., and Turkoz, M. 2016. Evaluation of genotype by environment interaction for grain yield in durum wheat using non-parametric stability statistics, *Turkish Journal of Field Crops*. 21:51-59.
 - Kempton, R. 1984. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions, *J, Agric, Sci*. 103:123-135.
 - Lehrsch, G, A., Sojka, R., and Westermann, D. 2000. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield. *Agronomy Journal*. 92:1266-1275.
 - Lin, C, S., Binns, M, R., and Lefkovitch, L, P. 1986. Stability analysis: where do we stand? *Crop science*, 26:894-900.
 - Liu, Y,-J,, Chuan, D,, Tian, M,-L,, Hu, E,-L,, and Huang, Y,-B. 2010. Yield stability of maize hybrids evaluated in maize regional trials in southwestern china using nonparametric methods, *Agricultural Sciences in China*. 9:1413-1422,
 - Magari, R,, and Kang, M, S. 1993. Genotype selection via a new yield-stability statistic in maize yield trials. *Euphytica*. 70:105-111.
 - Nassir, A, L,, and Ariyo, O, J. 2011. Genotype x environment interaction and yield-stability analyses of rice grown in tropical inland swamp, *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 39:220.
 - Palemón-Alberto, F., Gómez-Montiel, N, O., Castillo-González, F., Ramírez-Vallejo, P., Molina-Galán, J, D., and Miranda-Colín, S, 2012, Estabilidad de cruas intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia*. 46:133-145.
 - Rad, M, N., Kadir, M, A., Rafii, M., Jaafar, H, Z., Naghavi, M, R., and Ahmadi, F. 2013. Genotypex environment interaction by AMMI and GGE biplot analysis in three consecutive generations of wheat (*Triticum aestivum*) under normal and drought stress conditions, *Australian Journal of Crop Science*. 7: 956-961.
 - Rea, R., and De Sousa-Vieira, O. 2001. Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad en ensayos regionales de caña de azúcar en Venezuela. *Caña de azúcar* 19.
 - Ribaut, J,-M., Jiang, C,, Gonzalez-de-Leon, D., Edmeades, G,, and Hoisington, D. 1997. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize, 2, Yield components and marker-assisted selection strategies, *Theoretical and Applied Genetics*. 94:887-896.
 - Sadras, V, O, and Angus, J, F. 2006. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments, *Crop and Pasture Science*. 57:847-856.
 - SINAGAP (Sistema de Información Nacional de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca). 2014. Boletín Situacional Maíz Duro 2014, Coordinación General del Sistema de Información Nacional, MAGAP, Quito, p. 6. Disponible en: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2014/iboletin->

maiz-duro-seco-2014-actualizado.pdf (consultado el 5 Marzo 2017).

- Soluki, M., Ghanbari, A., Sadehi, A, A, V., and Kazemipour, A. 2008. Yield stability analysis in hulless barley (*Hordeum vulgare* L.), *Asian Journal of Plant Sciences*. 7:589-593.
- Srinivasa Rao, P., Reddy, P, S., Rathore, A., Reddy, B, V., and Panwar, S. 2011. Application GGE biplot and AMMI model to evaluate sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids for genotype x environment interaction and seasonal adaptation, *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 81:438-444.
- Tollenaar, M., and Lee, E, 2002, Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*. 75:161-169.
- Voltas, J., van Eeuwijk, F., Igartua, E., Garcia del Moral, L., Molina-Cano, J, L., and Romagosa, I. 2002. Genotype by environment interaction and adaptation in barley breeding: basic concepts and methods of analysis, *Barley science: Recent advances from molecular biology to agronomy of yield and quality*: 205-241.
- Wold, S., Esbensen, K., and Geladi, P. 1987. Principal component analysis, *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. 2:37-52.
- Yan, W., Hunt, L., Sheng, Q., and Szlavnic, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*. 40: 597-605.
- Zobel, R, W., Wright, M, J., and Gauch, H, G. 1988. Statistical analysis of a yield trial, *Agronomy journal*. 8: 388-393.