

ANÁLISIS GGE BILOT DEL RENDIMIENTO DE TRIGO (*Triticum* spp.) CON RIEGO NORMAL Y RESTRINGIDO EN EL BAJÍO, MÉXICO

GGE BILOT ANALYSIS OF WHEAT (*Triticum* spp.) YIELD UNDER NORMAL AND RESTRICTED IRRIGATION IN EL BAJÍO, MÉXICO

Lourdes Ledesma-Ramírez, Ernesto Solís-Moya*, M. Pilar Suaste-Franco,
J. Fermín Rodríguez-Caracheo, M. Lourdes de la Cruz-Gonzalez

Programa de Trigo. Campo Experimental Bajío. INIFAP km 6.5 Carretera Celaya-San Miguel de
Allende. 38000. Celaya, Guanajuato. (esolismoya@hotmail.com).

RESUMEN

El Bajío es una de las principales áreas productoras de trigo (*Triticum* spp.) en México, ya que contribuye con 28 % del total nacional. Entre los principales problemas que afectan la producción de trigo en El Bajío está la escasez de agua, porque el balance hidráulico subterráneo presenta un déficit importante. A través del mejoramiento genético es posible obtener genotipos con rendimientos altos, con riego normal y restringido. El objetivo de este estudio fue analizar la interacción genotipo ambiente de ocho cultivares de trigo en tres calendarios de riego en Celaya, Guanajuato, México, con el modelo GGE biplot. En los ciclos agrícolas otoño-invierno de 1999 al 2008 se evaluaron cinco cultivares de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) y tres de trigo cristalino (*Triticum durum* Desf.) con dos, tres y cuatro riegos (0-55, 0-45-75 y 0-45-75-100 d después de la siembra). El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para el análisis de estabilidad fenotípica se utilizó el modelo GGE biplot. El modelo explicó 78 % de los efectos combinados de genotipos y de la interacción genotipo ambiente, el CP1 63 % y el CP2 15 % de la variabilidad debida a genotipos y a la interacción genotipo ambiente. De acuerdo con el modelo, Bárcenas S2002 fue el cultivar más productivo en 24 ambientes, Eneida F94 sobresalió en dos y Camón5 en uno. Salamanca S75 y Saturno S86 obtuvieron los valores menores del CP2; por tanto, este modelo los clasificó como los más estables. Los resultados obtenidos mostraron que Bárcenas S2002 fue el mejor tanto con riego normal como restringido y que la estabilidad fenotípica es útil sólo cuando se considera conjuntamente con el rendimiento a través de ambientes.

ABSTRACT

El Bajío is one of the principal wheat (*Triticum* spp.) producing areas in México, as it contributes 28 % of the national total. Among the principal problems affecting wheat production in El Bajío is lack of water, given that the groundwater balance presents an important deficit. Through genetic breeding it is possible to obtain genotypes with high yields, under normal and restricted irrigation. The objective of the present study was to analyze the genotype-by-environment interaction of eight wheat cultivars in three irrigation calendars in Celaya, Guanajuato, México, with the GGE biplot model. In the fall-winter agricultural cycles of 1999 to 2008, five flour wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars were evaluated, and three of crystalline wheat (*Triticum durum* Desf.) with two, three and four irrigations (0-55, 0-45-75 and 0-45-75-100 d after sowing). The experimental design was complete randomized blocks with three replicates. For the analysis of phenotypic stability, the GGE biplot model was used. The model explained 78 % of the combined effects of genotypes and of the genotype-by-environment interaction, the CPI 63 % and the CP2 15 % of the variability due to genotypes and the genotype-by-environment interaction. According to the model, Bárcenas S2002 was the most productive cultivar in 24 environments, Eneida F94 was outstanding in two and Camón 5 in one. Salamanca S75 and Saturno S86 obtained the lowest values of the CP2; therefore, this model classified them as the most stable. The results obtained showed that Bárcenas S2002 was the best both under normal and restricted irrigation, and that phenotypic stability is useful only when it is considered together with yield through environments.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2011. Aprobado: diciembre, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 46: 119-131. 2012.

Key words: principal components, stability, water shortage, genotype-by-environment interaction, *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* Desf.

Palabras clave: componentes principales, estabilidad, escasez de agua, interacción genotipo ambiente, *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* Desf.

INTRODUCCIÓN

En México, las principales regiones trigueras están en el noroeste del país, donde se produce 53 % del total nacional, y el Bajío contribuye 28 %. En ambas regiones el trigo (*Triticum* spp.) se produce en el ciclo otoño-invierno (O-I; noviembre-mayo) con riego. El 19 % restante se produce en áreas de temporal, principalmente en el altiplano mexicano (SIAP, 2010). Entre los principales problemas que afectan la producción de trigo en El Bajío está la escasez de agua. En esta región el balance hidráulico subterráneo presenta un déficit de más de 900 millones m³, debido a una sobreexplotación del acuífero (más de 16 000 pozos en operación), que ocasiona un abatimiento del manto freático de 3 a 6 m año⁻¹ y eleva los costos de energía eléctrica en la extracción de agua (Ledesma *et al.*, 2010). La eficiencia en el uso del agua (EUA) es un concepto que incluye cualquier acción que reduzca la cantidad de agua usada por unidad de cualquier actividad y que favorezca el mantenimiento o mejoramiento de la calidad del agua. En los cultivos EUA es modificada por diversas prácticas de manejo agronómico, como rotación de cultivos, sistema de labranza, riego, fertilización, variedades, y fecha de siembra, entre otras (Loomis y Amthor, 1999). También es modificada mediante el mejoramiento de las plantas para aumentar el rendimiento económico en condiciones deficientes de humedad, para lo cual es necesario aplicar métodos de selección que permitan identificar aquellas que muestren mayor EUA (Condon *et al.*, 2004). La mayoría de los programas de fitomejoramiento intentan producir variedades estables en su rendimiento, el carácter más importante para los agricultores cuando adoptan cultivares nuevos. La interacción genotipo ambiente (IGA) es una de las principales dificultades en los procesos de selección; la IGA ocasiona que los mejores genotipos varíen con el ambiente, y dificulta el proceso de selección de cultivares para una región particular (Yan y Holland, 2010).

El concepto de estabilidad tiene diversas definiciones y se han desarrollado varios métodos biométricos para evaluarla (Kang, 1998). Estudios de estabilidad se han realizado en cebada (*Hordeum vulgare* L.)

INTRODUCTION

In México, the principal wheat growing regions are in the northeastern part of the country, where 53 % of the national total is produced, and El Bajío contributes 28 %. In both regions, the wheat (*Triticum* spp.) is produced in the fall-winter cycle (F-W; November-May) under irrigation. The other 19 % is produced in areas of rainfall agriculture, principally in the Mexican high plateau (SIAP, 2010). Among the principal problems affecting wheat production in El Bajío is the lack of water. In this region the groundwater balance presents a deficit of more than 900 million m³, due to an overexploitation of the aquifer (more than 16 000 wells in operation), which causes an exhaustion of the water table of 3 to 6 m year⁻¹ and raises the costs of electric energy in water extraction (Ledesma *et al.*, 2010). Water use efficiency (WUE) is a concept that includes any action that reduces the amount of water used per unit of any activity and that favors the maintenance or improvement of water quality. In crops WUE is modified by diverse practices of agronomic management, such as crop rotation, tillage system, irrigation, fertilization, varieties, and sowing date, among others (Loomis and Amthor, 1999). It is also modified through the improvement of plants to increase economic yield under conditions of moisture deficiency, for which it is necessary to apply selection methods that make it possible to identify those that show higher WUE (Condon *et al.*, 2004). Most of the plant improvement programs are aimed at producing varieties that are stable in yield, the character most important for farmers when they adopt new cultivars. The genotype-by-environment interaction (GEI) is one of the main difficulties in the selection processes; the GEI causes the best genotypes to vary with the environment, and makes difficult the selection process of cultivars for a particular region (Yan and Holland, 2010).

The concept of stability has diverse definitions and various biometric methods have been developed to evaluate it (Kang, 1998). Stability studies have been conducted in barley (*Hordeum vulgare* L.) (Jalata, 2011), corn (*Zea mays* L.) (González *et al.*, 2009) and wheat (Mohammadi *et al.*, 2010). A significant IGA could be: 1) of the uncrossed type when the order of classification of the genotypes through the environments is maintained, and changes only occur

(Jalata, 2011), maíz (*Zea mays* L.) (González *et al.*, 2009) y trigo (Mohammadi *et al.*, 2010). Una IGA significativa puede ser: 1) del tipo sin cruce cuando el orden de clasificación de los genotipos a través de los ambientes se mantiene, y sólo se presentan cambios en la magnitud de la expresión del carácter evaluado; 2) del tipo cruzado cuando la clasificación de los genotipos cambia con el ambiente. Según Baker (1990), la interacción de cruce es más importante que la interacción sin cruce. Cuando se realiza la selección de genotipos para varios ambientes, los fitomejoradores buscan el tipo de interacción sin cruce, esto es, genotipos con adaptación general y el tipo de interacción con cruce para adaptación específica (Okoye *et al.*, 2008).

En la identificación de cultivares estables se usaron métodos paramétricos univariados como los de Eberhart y Russell (1969), Shukla (1972) y Francis y Kannenberg (1978). Estos métodos requieren pocos cálculos y sus parámetros son fáciles de interpretar biológicamente, pero tienen utilidad limitada cuando la respuesta de los genotipos a los ambientes no es lineal; además, la clasificación de estabilidad sólo se aplica a los genotipos y a los ambientes evaluados (González *et al.*, 2009).

La identificación de cultivares sobresalientes también puede efectuarse desde una perspectiva multivariada con la técnica de componentes principales. Yan *et al.* (2000) desarrollaron la metodología GGE biplot para el análisis gráfico de los datos de pruebas multiambientales (MET). En una MET, el ambiente (E) representa 80 % de la variación, el genotipo (G) y la interacción genotipo ambiente (GE) 10 % cada uno (Yan y Kang, 2003). Para evaluar cultivares sólo los efectos de genotipos y de la interacción son importantes (Gauch y Zobel, 1996); como estos componentes de la variación son los de interés en pruebas de cultivares se propuso el término GGE. Un biplot (Gabriel, 1971) es una gráfica que muestra simultáneamente genotipos y ambientes (o en términos generales, filas y columnas de los factores). El GGE biplot es una gráfica que muestra los genotipos y los ambientes de los datos MET (Yan, 2001). Se construye mediante el trazado de los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2, también llamados efectos primarios y secundarios) derivados de la descomposición en valores singulares (SVD) de los datos centrados en el ambiente. Los modelos que descomponen los datos centrados en el ambiente se conocen

in the magnitude of the expression of the character evaluated; 2) of the crossed type when the classification of the genotypes changes with the environment. According to Baker (1990), the interaction of cross is more important than the interaction without cross. When the selection of genotypes is made for various environments, the plant breeders look for the non-crossed type interaction, that is, genotypes with general adaptation and the cross type interaction for specific adaptation (Okoye *et al.*, 2008).

In the identification of stable cultivars, univariate parametric methods have been used, such as those of Eberhart and Russell (1969), Shukla (1972) and Francis and Kannenberg (1978). These methods require few calculations and their parameters are easy to interpret biologically, but they have limited use when the response of the genotypes to the environments is not linear; furthermore, the classification of stability is only applied to the genotypes and the environments evaluated (González *et al.*, 2009).

The identification of outstanding cultivars can also be made from a multivariate perspective with the technique of principal components. Yan *et al.* (2000) developed the GGE biplot methodology for the graphic analysis of the data of multi-environmental tests (MET). In a MET, the environment (E) represents 80 % of the variation, the genotype (G) and the genotype-by-environment interaction (GE) 10 % each one (Yan and Kang, 2003). For evaluation of cultivars only the effects of genotypes and of interaction are important (Gauch and Zobel, 1996); as these components of variation are those of interest in tests of cultivars, the term GGE was proposed. A biplot (Gabriel, 1971) is a graph that shows simultaneously genotypes and environments (or in general terms, rows and columns of the factors). The GGE biplot is a graph that shows the genotypes and environments of the MET data (Yan, 2001). It is constructed by means of graphing the first two principal components (PC1 and PC2, also called primary and secondary effects) derived from the singular values decomposition (SVD) of the data centered in the environment. The models that decompose the data centered in the environment are known as site regression models or SREG and the SREG model with two principal components is called SREG2 (Yan and Kang, 2003).

One of the merits of the GGE biplot model is that it can graphically show “who (which cultivar)-won-

como modelos de sitios de regresión o SREG y el modelo SREG con dos componentes principales se llama SREG2 (Yan y Kang, 2003).

Uno de los méritos del modelo GGE biplot es que puede mostrar gráficamente “quién (que cultivar) -ganó-dónde (en que localidad)” en un conjunto de datos (Yan *et al.*, 2000). Esto es, las marcas de los genotipos más alejados del origen (0,0) se conectan con líneas rectas para formar un polígono; de tal manera que las marcas de los otros cultivares están dentro del polígono. Para cada lado del polígono se traza una línea perpendicular, desde el origen del biplot, y se extiende más allá del polígono; así, el biplot se divide en varios sectores, y las marcas de los sitios de prueba son separadas dentro de estos sectores. El cultivar en el vértice de cada sector es el que tiene mejor comportamiento en los sitios incluidos en dicho sector, siempre que la proporción de los efectos de GGE sea explicada suficientemente por PC1 y PC2. Así, los grupos de sitios que presentan comportamiento similar son identificados gráficamente (Yan, 2001).

El conocimiento de la magnitud de la interacción entre el genotipo y el ambiente puede permitir estimar la estabilidad de los cultivares con riego normal y restringido cuando se evalúan con diferentes calendarios de riego. También puede permitir evaluar los potenciales productivos y las posibles limitaciones de los genotipos en cada condición de humedad. La hipótesis del presente estudio fue que a través del mejoramiento genético pueden obtenerse genotipos con altos rendimientos con riego normal y restringido. El objetivo fue analizar la naturaleza de la IGA de ocho cultivares de trigo, con tres calendarios de riego en el ciclo otoño-invierno entre 1999 y 2008, en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío (Celaya, Guanajuato, México) con el modelo GGE biplot.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ) del INIFAP, en Celaya, Guanajuato; 20° 32' N, 100° 48' O y 1752 m de altitud; la precipitación y temperatura media anuales son 578 mm y 19.8 °C. El suelo donde se establecieron los experimentos se clasifica como Vertisol, textura arcillosa, pH 7.8, 2.31 % de materia orgánica, 5.62 mg N kg⁻¹ suelo, 12.3 mg P kg⁻¹ suelo y 1016 mg K kg⁻¹ suelo.

La investigación se realizó durante los ciclos agrícolas 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2004-

where (in which locality)” in a set of data (Yan *et al.*, 2000). That is, the marks of the genotypes farthest from the origin (0,0) are connected with straight lines to form a polygon; in such a way that the marks of the other cultivars are found within the polygon. For each side of the polygon, a perpendicular line is drawn from the origin of the biplot, and extends beyond the polygon; thus, the biplot is divided into various sectors, and the marks of the test sites are separated within these sectors. The cultivar in the vertex of each sector is the one that has best behavior in the sites included in this sector, if the proportion of the effects of GGE is sufficiently explained by PC1 and PC2. Thus, the groups of sites that share similar behavior are graphically identified (Yan, 2001).

The knowledge of the magnitude of the interaction between the genotype and the environment can make it possible to estimate the stability of the cultivars under normal and restricted irrigation when they are evaluated with different irrigation calendars. This also can make it possible to evaluate the productive potentials and the possible limitations of the genotypes under each moisture condition. The hypothesis of the present study was that through genetic improvement it is possible to obtain genotypes with high yields both under normal and restricted irrigation. The objective was to analyze the nature of the IGA of eight wheat cultivars, with three irrigation calendars in the fall-winter cycle between 1999 and 2008, in the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío (Celaya, Guanajuato, México) with the GGE biplot model.

MATERIALS AND METHODS

The investigation was conducted in the Campo Experimental Bajío (CEBAJ) of the INIFAP, in Celaya, Guanajuato; 20° 32' N, 100° 48' W and 1752 m altitude; mean annual rainfall and temperature are 578 mm and 19.8 °C. The soil where the experiments were established is classified as Vertisol, clay texture, pH 7.8, 2.31 % organic matter, 5.62 mg N kg⁻¹ soil, 12.3 mg P kg⁻¹ soil and 1016 mg K kg⁻¹ soil.

The investigation was carried out during agricultural cycle 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007 and 2007-2008. Five cultivars of bread wheat were evaluated (*Triticum aestivum* L.): Bárcenas S2002, Cortázar S94, Eneida F94, Saturno S86 and Salamanca S75, and three of durum wheat (*Triticum durum* Desf.): Aconchi C89, Camón 5 and Topacio C97; in three

2005, 2005-2006, 2006-2007 y 2007-2008. Se evaluaron cinco cultivares de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.): Bárcenas S2002, Cortázar S94, Eneida F94, Saturno S86 y Salamanca S75, y tres de trigo cristalino (*Triticum durum* Desf.): Aconchi C89, Camón 5 y Topacio C97; en tres calendarios de riego: dos, tres y cuatro riegos a los 0-55, 0-45-75 y 0-45-75-100 d después de la siembra. Los cultivares fueron generados en el INIFAP en diferentes épocas y sus características agronómicas y tipo de gluten se presentan en el Cuadro 1.

La siembra se hizo en la primera semana de diciembre de cada año, con densidad de 120 kg ha⁻¹. La parcela experimental y útil tuvo dos surcos de 3 m de longitud sembrados en doble hilera, separados 75 cm. Para los tres calendarios de riego se aplicó la dosis de fertilización 240-60-00, la mitad de N y todo el P₂O₅ con la siembra y el resto del N con el primer riego de auxilio. Las fuentes de fertilizantes fueron urea [CO (NH₂)₂] con 46 % N, y superfosfato de calcio triple [Ca(H₂PO₄)₂] 46 % P₂O₅. Las arvenses de hoja angosta se controlaron con Topik 24EC® 28 d después del riego de siembra y las de hoja ancha con Esteron 47® a los 34 d. Durante la etapa fenológica de grano masoso se aplicó Cipermetrina® al 2.5 % para controlar pulgones. La cosecha se realizó con una cosechadora adaptada para parcelas experimentales, cuando el grano alcanzó 12 a 14 % de humedad.

Para el análisis de la IGA, cada calendario de riego se consideró como un ambiente; así, cada año tuvo tres ambientes, uno por cada calendario de riego, y hubo 27 ambientes (tres calendarios × 9 años de evaluación). El diseño experimental fue bloques completos al azar con tres repeticiones por calendario de riego por año.

Con los datos obtenidos en cada calendario de riego se realizó el análisis de varianza combinado para rendimiento de grano (Cuadro 2). Para este análisis el modelo que explica el comportamiento de los genotipos en los ambientes (calendarios de riego) de evaluación fue:

irrigation calendars: two, three and four irrigations at 0-55, 0-45-75 and 0-45-75-100 d after sowing. The cultivars were generated in the INIFAP in different periods and their agronomical characteristics and gluten type are shown in Table 1.

The sowing was made in the first week of December of each year, with a density of 120 kg ha⁻¹. The experimental and useful plot had two rows of 3 m length sown to double row, with 75 cm separation. For the three irrigation calendars the fertilization dose 240-60-00 was applied, half of N and all the P₂O₅ with the sowing and the rest of the N with the first recovery irrigation. The fertilizers sources were urea [CO (NH₂)₂] with 46 % of N, and triple calcium superphosphate [Ca(H₂PO₄)₂] 46 % of P₂O₅. The narrow leafed weeds were controlled with Topik 24 EC® 28 d after the sowing irrigation and the wide leafed weeds with Esteron 47® at 34 d. During the phenological stage of doughy grain, Cipermetrina® at 2.5 % was applied to control aphids. The harvest was made with a harvester adapted for experimental fields, when the grain reached between 12 and 14 % moisture.

For the analysis of the IGA, each irrigation calendar was considered as an environment; thus each year there were three environments, one for each irrigation calendar, and there were 27 environments (three calendars × 9 years of evaluation) The experimental design was completely randomized blocks with three replicates per irrigation calendar per year.

With the data obtained irrigation calendar the combined analysis of variance was made for grain yield (Table 2). For this analysis, the model that explains the behavior of the genotypes in the environments (irrigation calendars) of evaluation was as follows:

$$Y_{ijk} = \mu + a_k + (r_j)_k + gi + (ga)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

where Y_{ijk} = mean behavior of the genotype i in the replicate j in the environment k ; μ = general mean throughout all of the environments; a_k = effect of the environment k ; $(r_j)_k$ = effect

Cuadro 1. Altura de la planta, días para la floración, días para la madurez de grano y tipo de gluten de ocho cultivares de trigo.
Table 1. Plant height, days to flowering, days to grain maturity and gluten type of eight wheat cultivars.

Cultivar	Altura (cm)	Días para la floración	Días para la madurez	Tipo de gluten
Cortázar S94	83-94	67-82	112-138	S
Bárcenas S2002	83-92	68-82	112-136	S
Eneida F94	82-94	69-82	112-134	F
Saturno S86	84-91	68-84	112-137	S
Salamanca S75	73-94	69-85	112-138	S
Aconchi C89	80-90	74-90	118-142	C
Topacio C97	90-100	74-94	119-144	C
Camón 5	75-80	75-95	118-144	C

S: débil; F: fuerte; C: trigo cristalino ♦ S: weak; F: strong; C: durum wheat.

Cuadro 2. Análisis de varianza combinado de ocho cultivares de trigo en tres calendarios de riego durante nueve ciclos agrícolas de 1999 a 2008 en el Campo Experimental Bajío, México.**Table 2. Combined analysis of variance of eight wheat cultivars in three irrigation calendars during nine years from 1999 to 2008 in the Campo Experimental Bajío, México.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	F _{calculada}
Ambientes (A)	(a-1) = 26	CM5	CM5/CM4
Repeticiones/A	a(b-1) = 54	CM4	
Genotipos (G)	(g-1) = 7	CM3	CM3/CM2
G×A	(g-1)(a-1) = 182	CM2	CM2/CM1
Error	a(b-1)(g-1) = 378	CM1	
Total	(abg-1) = 647		

a: 27; b: 3; g: 8.

$$Y_{ijk} = \mu + a_k + (r_j)_k + gi + (ga)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

donde Y_{ijk} = comportamiento medio del genotipo i en la repetición j en el ambiente k ; μ = media general a través de todos los ambientes; a_k = efecto del ambiente k ; $(r_j)_k$ = efecto de la repetición j dentro del ambiente k ; gi = efecto del genotipo i ; $(ga)_{ik}$ = efecto de la interacción del genotipo i en el ambiente k ; ε_{ijk} = error experimental combinado.

En este análisis, los efectos de los genotipos se consideraron fijos y los de ambientes aleatorios. En este caso, para la prueba de F de ambientes (A) el cuadrado medio de repeticiones/ambientes se usó como denominador; para genotipos (G) el cuadrado medio de la IGA se usó como denominador y para la interacción (G×A) el error experimental combinado. Los datos se analizaron con SAS (SAS Institute, 2010).

Análisis de estabilidad

El modelo GGE biplot se usó para el análisis de estabilidad fenotípica (Yan *et al.*, 2000). El análisis se basó en el gráfico producido del biplot simétrico obtenido del programa desarrollado por Burgueño *et al.* (2001). El modelo básico GG biplot es:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + e_{ij}$$

donde Y_{ij} es el rendimiento promedio del genotipo i en el ambiente j ; $\bar{Y}_j$ es el rendimiento promedio de todos los genotipos en el ambiente j ; λ_1 y λ_2 son los valores singulares para CP1 y CP2; ξ_{i1} y ξ_{i2} son los valores del CP1 y CP2 para el genotipo i ; η_{j1} y η_{j2} son los valores del CP1 y CP2 para el ambiente j ; e_{ij} es el residual del modelo asociado con el genotipo i en el ambiente j .

Para mostrar los CP1 y CP2 en un biplot la ecuación es reescrita como:

of the replicate j within the environment k ; gi = effect of the genotype i ; $(ga)_{ik}$ = effect of the interaction of the genotype i on the environment k ; ε_{ijk} = combined experimental error.

In this analysis, the effects of the genotypes were considered fixed and those of the environments random. In this case, for the test of F of environments (A) the mean square of replicates /environments was used as denominator; for genotypes (G) the mean square of the IGA was used as denominator, and for the interaction (G×A) the combined experimental error. The data were analyzed with SAS (SAS Institute, 2010).

Analysis of stability

The GGE biplot model was used for the analysis of phenotypic stability (Yan *et al.*, 2000). The analysis was based on the graph produced from the symmetrical biplot obtained from the program developed by Burgueño *et al.* (2001). The basic GG biplot model is as follows:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + e_{ij}$$

where Y_{ij} is the average yield of the genotype i in environment j ; $\bar{Y}_j$ is the average yield of all of the genotypes in environment j ; λ_1 and λ_2 are the singular values for CP1 and CP2; ξ_{i1} and ξ_{i2} are the values of the CP1 and CP2 for the genotype i ; η_{j1} and η_{j2} are the values of the CP1 and CP2 for environment j ; e_{ij} is the residual of the model associated with the genotype i in environment j .

To show the CP1 and CP2 in a biplot the equation is rewritten as:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + e_{ij}$$

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \xi_{i1}^* \eta_{j1}^* + \xi_{i2}^* \eta_{j2}^* + \xi_{ij}$$

donde $\xi_{in}^* = \lambda_n^{-1/2} \xi_{in}$ y $\eta_{jn}^* = \lambda_n^{-1/2} \eta_{jn}$, con $n = 1, 2$.

Este método tiene la ventaja de que ambos componentes principales tienen las mismas unidades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza combinado para rendimiento detectó diferencias altamente significativas entre ambientes, genotipos e IGA (Cuadro 3). Campbell y Jones (2005) en cultivo de algodón, Mejía y Molina (2003) en maíz y Rodríguez *et al.* (2002) reportan resultados similares en trigo.

Análisis de la estabilidad

El modelo GGE biplot explicó 78 % de los efectos combinados de genotipos y de la interacción genotipo ambiente, el CP1 63 % y el CP2 15 % de la variabilidad total (Cuadro 4). Estos resultados permiten una interpretación confiable del comportamiento de la IGA, ya que un valor aceptable es una proporción mayor a 75 % (Crossa, 1990; Rodríguez *et al.*, 2005).

Los valores del primer componente principal (CP1) en las abscisas del biplot del modelo GGE representan el rendimiento de grano, y los del segundo componente principal (CP2) en las ordenadas representan la IGA (Figura 1). Así, los genotipos o ambientes ubicados en la extrema derecha son los de mayor rendimiento y viceversa. Los genotipos con

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado de ocho cultivares de trigo evaluados en 27 ambientes en el Campo Experimental Bajío, México.

Table 3. Combined analysis of variance of eight wheat cultivars evaluated in 27 environments at the Campo Experimental Bajío, México.

FV	GL	CM
AMB	26	56797867 **
REP(AMB)	54	603265
GEN	7	15597889 **
GEN*AMB	182	602411 **
Error	378	197670
Total	647	

** $p \leq 0.01$. AMB: ambiente; GEN: genotipos; REP: repeticiones ♦ ** $p \leq 0.01$. AMB: environment; GEN: genotypes; REP: replicates.

where $\xi_{in}^* = \lambda_n^{-1/2} \xi_{in}$ and $\eta_{jn}^* = \lambda_n^{-1/2} \eta_{jn}$, with $n = 1, 2$.

This method has the advantage that both principal components have the same units.

RESULTS AND DISCUSSION

The combined analysis of variance for yield detected highly significant differences among environments, genotypes and IGA (Table 3). Campbell and Jones (2005) in cotton crop, Mejía and Molina (2003) in corn and Rodríguez *et al.* (2002) report similar results in wheat.

Analysis of stability

The GGE biplot model explained 78 % of the combined effects of genotypes and of the genotype environment interaction, the CP1 63 % and the CP2 15 % of the total variability (Table 4). These results permit a reliable interpretation of the behavior of the IGA, given that an acceptable value is a proportion higher than 75 % (Crossa, 1990; Rodríguez *et al.*, 2005).

The values of the first principal component (CP1) in the abscissas of the biplot of the GGE model represent the grain yield, those of the second principal

Cuadro 4. Descomposición de la interacción genotipo ambiente mediante el análisis de componentes principales (CP) y pruebas de significancia.

Table 4. Decomposition of the genotype-by-environment interaction by means of the analysis of principal components (CP) and significance tests.

FV (CP)	GL	CM	Porcentaje explicado	Porcentaje acumulado
CP1	32	4316440 **	62.92	62.92
CP2	30	1126834 **	15.3991	78.319
CP3	28	757962 **	9.6676	87.987
CP4	26	366367 **	4.3391	92.326
CP5	24	274824	3.0045	95.33
CP6	22	260313	2.6088	97.939
CP7	20	226217	2.061	100
CP8	18	0	0	100

** $p \leq 0.01$. Porcentajes con respecto a la suma de cuadrados de la interacción genotipo × ambiente; FV: fuentes de variación; GL: grados de libertad; CM: cuadrados medios ♦ ** $p \leq 0.01$. Percentages with respect to the sum of squares of the genotype × environment interaction; FV: variation sources; GL: degrees of freedom; CM: mean squares.

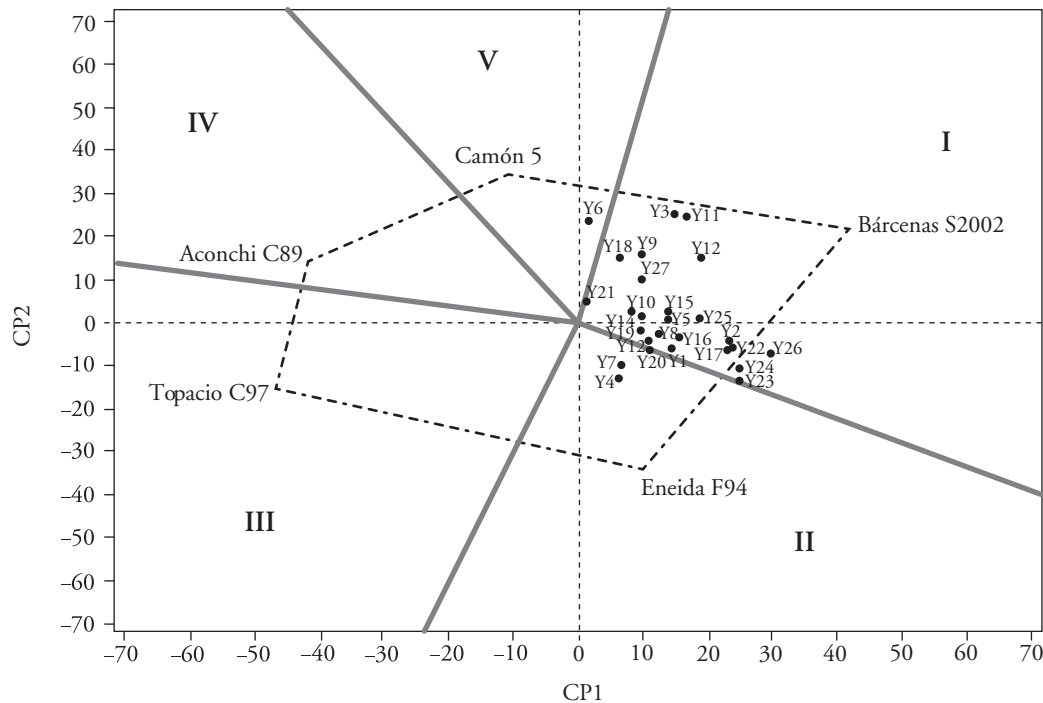


Figura 1. Biplot GGE para rendimiento de grano de ocho cultivares de trigo evaluados en 27 ambientes en el Campo Experimental Bajío, México. Sat=Saturno S86; Sal=Salamanca S75; Cort=Cortazar S94.

Figure 1. Biplot GGE for grain yield of eight wheat cultivars evaluated in 27 environments at the Campo Experimental Bajío, México. Sat=Saturno S86; Sal=Salamanca S75; Cort=Cortazar S94.

valores menores del CP2 son los más estables. Las líneas punteadas indican el punto cero de los CP1 y CP2. Los dos ejes utilizan la misma escala, una condición importante para la visualización correcta de un biplot (Yan y Kang, 2003).

Comportamiento de cultivares en un ambiente dado

La gráfica GGE biplot permite visualizar el comportamiento de los cultivares en un ambiente dado (Figura 2). La línea que pasa a través del origen del biplot y el valor del ambiente Y26, que es el más alejado del origen que corresponde al calendario de tres riegos en el año 2008 y nombrada eje Y26, clasificó los cultivares según sus proyecciones sobre dicho eje. En este ambiente Bárcenas S2002 obtuvo el mayor rendimiento, por estar más próximo a la marca del ambiente. La línea que pasa por el origen del biplot y es perpendicular al eje Y26 separa los cultivares con un rendimiento mayor a la media. Así, en Y26 los cultivares destacados fueron Bárcenas S2002,

component (CP2) in the ordenates represent the IGA (Figure 1). Thus, the genotypes or environments located in the extreme right are those of highest yield and vice-versa. The genotypes with lower values of the CP2 are the most stable. The dotted lines indicate the point zero of the CP1 and CP2. The two axes utilize the same scale, an important condition for the correct visualization of a biplot (Yan and Kang, 2003).

Behavior of cultivars in a given environment

The GGE biplot graph makes it possible to visualize the behavior of the cultivars in a given environment (Figure 2). The line that passes through the origin of the biplot and the value of the environment Y26, which is the farthest from the origin that corresponds to the calendar of three irrigations in the year 2008 and named axis Y26, classified the cultivars according to their projections on this axis. In this environment Bárcenas S2002 obtained the highest yield, given that it is closer to the mark of the environment. The line that passes

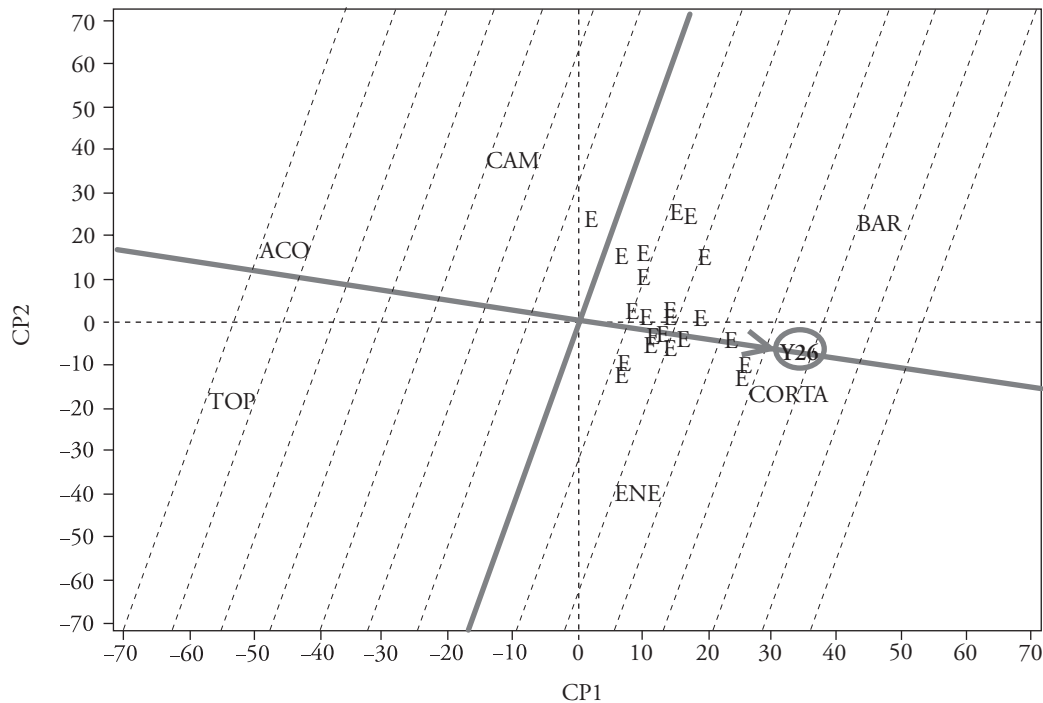


Figura 2. Comportamiento de cultivares de trigo en un ambiente dado. Las letras E representan los ambientes no considerados en el análisis.

Figure 2. Behavior of wheat cultivars in a given environment. The letters E represent the environments not considered in the analysis.

Cortázar S94 y Eneida F94 con rendimientos similares, seguidos por Saturno S86 y Salamanca S75; los cultivares con un rendimiento menor a la media fueron Camon5, Topacio C94 y Aconchi C89. La asociación de esta información con los datos reales depende del porcentaje de la variación total explicada por el modelo. Yan y Kang (2003) señalan que en un experimento el modelo explicó 78 % de la variación, y el coeficiente de determinación fue 75 % entre los valores del modelo y los reales. Así, puede decirse que en el presente estudio el coeficiente de determinación fue similar al reportado por Yan y Kang (2003).

La distancia desde el origen del biplot a la marca de un ambiente se llama vector ambiental, y la longitud del vector es una medida de la habilidad de los ambientes para discriminar entre cultivares. Un vector corto respecto al tamaño del biplot implica que todos los cultivares tienen rendimiento similar en el ambiente asociado. Así, las diferencias entre cultivares basadas en proyecciones con vectores ambientales cortos no son confiables (Yan y Hunt, 2002).

through the origin of the biplot and is perpendicular to the axis Y26 separates the cultivars that yielded higher than the mean. Thus, in Y26 the outstanding cultivars were Bárcenas S2002, Cortázar S94 and Eneida F94 with similar yields, followed by Saturno S86 and Salamanca S75; the cultivars with a yield below the mean were Camon 5, Topacio C94 and Aconchi C89. The association of this information with the real data depends on the percentage of the total variation explained by the model. Yan and Kang (2003) point out that in an experiment the model explained 78 % of the variation, and the coefficient of determination was 75 % between the values of the model and the real ones. Thus, it can be said that in this study the coefficient of determination was similar to that reported by Yan and Kang (2003).

The distance from the origin of the biplot to the margin of an environment is called environmental vector, and the length of the vector is a measurement of the ability of the environments to discriminate among cultivars. A short vector with respect to the size of the biplot implies that all of the cultivars have

Comparación de dos cultivares en todos los ambientes

Para comparar los cultivares Bárcenas S2002 y Eneida F94 se dibujó una línea que pasa por el origen del biplot y es perpendicular a la línea que conecta a los cultivares (Figura 3); esto dividió las localidades en dos grupos. Los ambientes Y4 y Y7 están en el mismo lado de la línea perpendicular que Eneida F94 y los otros 25 ambientes se ubicaron del lado de Bárcenas S2002. Esto indica que Eneida F94 rindió más que Bárcenas S2002 en Y4 y Y7, pero Bárcenas S2002 rindió más que Eneida F94 en los otros 25 ambientes. Cuando se hacen comparaciones por pares es importante considerar la longitud de la línea conectora para hacer inferencias, porque la mayor longitud tiene mayor confiabilidad de la comparación. Una línea conectora corta implica que los dos cultivares que se comparan son similares en todos los ambientes y, por tanto, la comparación puede ser no significativa (Yan y Hunt, 2002).

similar yield in the associated environment. Thus, the differences among cultivars based on projections with short environmental vectors are not reliable (Yan and Hunt, 2002).

Comparison of two cultivars in all of the environments

To compare the cultivars Bárcenas S2002 and Eneida F94, a line was drawn that passes through the origin of the biplot and is perpendicular to the line that connects the cultivars (Figure 3); this divided the localities in two groups. The environments Y4 and Y7 are on the same side of the perpendicular line as Eneida F94 and the other 25 environments are located on the side of Bárcenas S2002. This indicates that Eneida F94 yielded more than Bárcenas S2002 in Y4 and Y7, but Bárcenas S2002 yielded more than Eneida F94 in the other 25 environments. When comparisons are made by pairs, it is important to consider the length of the connecting line to make inferences, because the

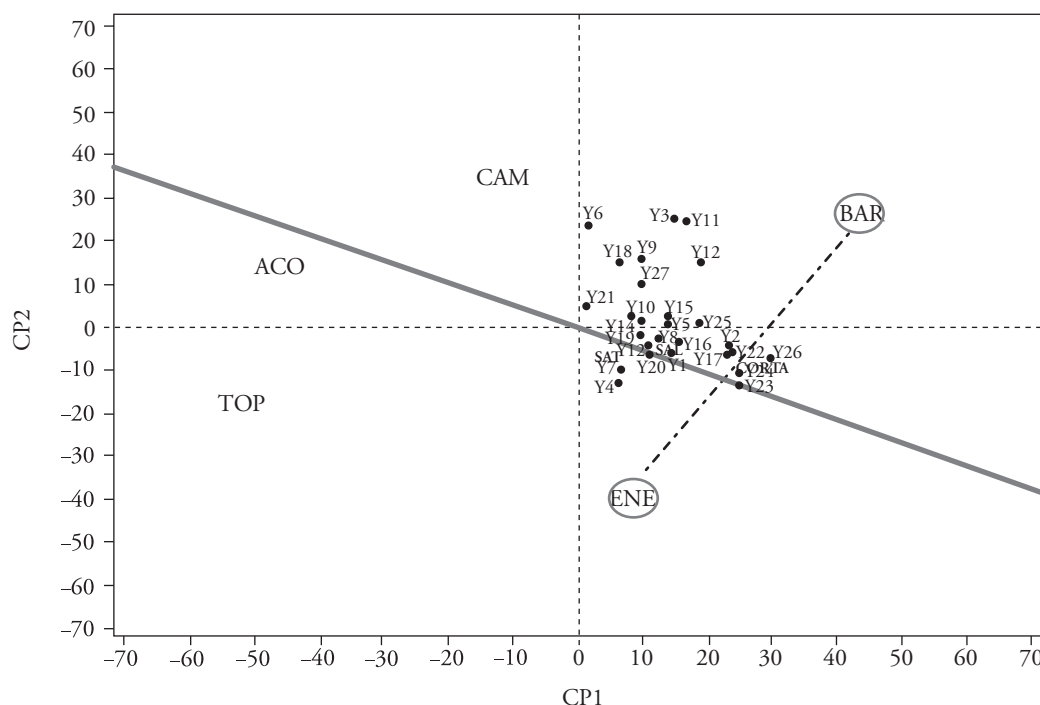


Figura 3. Comparación de dos cultivares de trigo en 27 ambientes.
Figure 3. Comparison of two wheat cultivars in 27 environments.

Identificación del mejor cultivar en cada ambiente

El polígono dibujado con los cultivares más alejados del origen del biplot (Aconchi C89, Camón5, Bárcenas S2002, Eneida F94 y Topacio C97) deja los otros cultivares contenidos en el polígono (Figura 1). Los cultivares en la esquina del polígono se denominan cultivares vértice, son los más alejados del origen del biplot y tienen los vectores más largos en sus direcciones respectivas; ésta es una medida de la capacidad de respuesta a los ambientes. Un cultivar que se encuentra en el origen se clasificaría igual en todos los ambientes; esto es, no respondería al cambio ambiental (Yan y Kang, 2003). El trazo perpendicular en cada lado del polígono y que pasa por el origen, permite obtener cinco sectores (líneas punteadas gruesas, Figura 1) con el cultivar extremo ubicado en el vértice del mismo (los sectores fueron identificados con números romanos en el sentido de las manecillas del reloj). El cultivar vértice es el de rendimiento máximo en todos los ambientes de su sector. Camón 5 fue el de mayor rendimiento en su sector, que contiene el ambiente Y6.

Ningún ambiente cayó en los sectores de Aconchi C89 y Topacio C97. Esto indica que estos cultivares fueron los de rendimiento menor en todos los ambientes. Para generalizar, los cultivares vértice son los de mayor respuesta, esto es, son los mejores o los peores en algunos o todos los ambientes.

En la Figura 1 destaca Bárcenas S2002 que obtuvo el rendimiento mayor en 24 ambientes; en el sector de Bárcenas S2002 se ubicó Cortázar S94, lo cual indica que este cultivar obtuvo rendimiento alto en la mayoría de los ambientes, aunque inferior a Bárcenas S2002. Eneida F94 sobresalió en dos ambientes y Camón5 obtuvo el mayor rendimiento en Y6.

Solís *et al.* (2003) compararon el rendimiento de variedades de gluten débil recomendadas para El Bajío y reportan que Bárcenas S2002 superó en 12.0 % a Salamanca S75, 9.2 % a Cortázar S94 y 7.1 % a Saturno S86. Estos resultados son parecidos a los obtenidos en la presente investigación, ya que Bárcenas S2002 superó el rendimiento de los demás cultivares. Además, Solís y Ramírez (2010) muestran que Cortázar S94 y Bárcenas S2002 y los cultivares nuevos Urbina S2007 y Maya S2007 obtienen rendimientos mayores que los antiguos con riego restringido (dos o tres riegos).

greater length has more reliability of the comparison. A short connecting line implies that the two cultivars that are compared are similar in all of the environments and, therefore, the comparison may not be significant (Yan and Hunt, 2002).

Identification of the best cultivar in each environment

The polygon drawn with the cultivars farthest from the origin of the biplot (Aconchi C89, Camón 5, Bárcenas S2002, Eneida F94 and Topacio C97) leaves the other cultivars contained in the polygon (Figure 1). The cultivars in the corner of the polygon are denominated vertex cultivars, they are the farthest from the origin of the biplot and have the longest vectors in their respective directions; this is a measurement of the capacity of response to the environments. A cultivar that is found at the origin would be classified the same in all the environments; that is, it would not respond to the environmental change (Yan and Kang, 2003). The perpendicular line in each side of the polygon and which passes through the origin, makes it possible to obtain five sectors (thick dotted lines, Figure 1) with the extreme cultivar located in the its vertex (the vectors were identified with Roman numerals clockwise). The vertex cultivar is that of maximum yield in all of the environments of its sector. Camón 5 was the one of highest yield in its sector, which contains environment Y6.

No environment fell in the sectors of Aconchi C89 and Topacio C97. This indicates that these cultivars were those of lowest yield in all of the environments. To generalize, the vertex cultivars are those of highest response, that is, they are the best or the worst in some or all the environments.

In Figure 1 Bárcenas S2002 stands out, which obtained the highest yield in 24 environments, Cortázar S94 was located in the sector of Bárcenas S2002, which indicates that this cultivar obtained high yield in most of the environments, although inferior to Bárcenas S2002. Eneida F94 was outstanding in two environments and Camón 5 obtained the highest yield in Y6.

Solís *et al.* (2003) compared the yield of weak gluten varieties recommended for El Bajío and report that Bárcenas S2002 surpassed Salamanca S75 by 12.0 %, Cortázar S94 9.2 % and Saturno

Salamanca S75 y Saturno S86 obtuvieron los valores menores del CP2; por tanto, este modelo los clasificó como los más estables. Yan y Kang (2003) señalan que la estabilidad es importante, aunque es sólo un modificador del rendimiento medio. Una medida de la estabilidad determinada por la IGA, es útil sólo cuando se considera conjuntamente con el rendimiento de los cultivares. Por ejemplo, Saturno S86 y Salamanca S75 son más estables que Bárcenas S2002; esto no significa que sean los cultivares más deseables, pues el resultado sólo indica que obtuvieron rendimientos medios en la mayoría de los ambientes (Yan y Kang 2003).

Solís *et al.* (2008) señalan que la evaluación alternada de cultivares bajo riego restringido y normal, tanto en su fase de segregante como de líneas avanzadas, dará lugar a cultivares eficientes en el uso del agua y con alto potencial de rendimiento. Este es el caso de Maya S2007 que fue sometido en su fase segregante a riego restringido (tres riegos) y bajo esta condición supera a Salamanca S75 en 22.6 % y con riego normal es 12.2 % superior. Así, Bárcenas S2002 que fue seleccionado como línea bajo riego restringido supera a los cultivares antiguos tanto con riego normal como limitado.

CONCLUSIONES

El modelo explicó 78 % de los efectos combinados de cultivares y de la interacción genotipo ambiente, el CP1 63 % y el CP2 15 % de la variabilidad debida a genotipos y a la interacción genotipo ambiente.

De acuerdo con el modelo, Bárcenas S2002 fue el cultivar más productivo en los 24 ambientes, Eneida F94 sobresalió en dos y Camón5 en uno. Salamanca S75 y Saturno S86 obtuvieron los valores menores del CP2; por lo tanto, este modelo los clasificó como los más estables. Los resultados de este estudio mostraron que Bárcenas S2007 es el genotipo ideal, ya que destaca con riego normal (cuatro riegos) y limitado (dos y tres riegos). Esto indica que es posible obtener avance genético simultáneamente para ambas condiciones de humedad.

LITERATURA CITADA

Baker, R. J. 1990. Crossover genotype-environment interaction in spring wheat. In: Kang, M.S. (ed). Genotype-by-Environment Interaction. Louisiana State University Agricultural Center, Baton Rouge, LA. pp: 42-51.

S86 by 7.1 %. These results are similar to those obtained in the present study, given that Bárcenas S2002 surpassed the yield of the other cultivars. Furthermore, Solís and Ramírez (2010) show that Cortázar S94 and Bárcenas S2002 and the new cultivars Urbina S2007 and Maya S2007 obtained higher yields than the old ones with restricted irrigation (two or three irrigations).

Salamanca S75 and Saturno S86 obtained the lowest values of the CP2; therefore, this model classified them as the most stable. Yan and Kang (2003) point out that stability is important, although it is only a modifier of the mean yield. A measurement of stability determined by the IGA is useful only when it is considered along with the yield of the cultivars. For example, Saturno S86 and Salamanca S75 are more stable than Bárcenas S2002; this does not mean that they are the most desirable cultivars, because the result only indicates that they obtained moderate yields in most of the environments (Yan and Kang, 2003).

Solís *et al.* (2008) point out that the alternate evaluation of cultivars under normal and restricted irrigation, both in the segregating phase and of advanced lines, will give place to cultivars that are efficient in water use and with high yield potential. This is the case of Maya S2007 which was subjected in its segregating phase to restricted irrigation (three irrigations) and under this condition surpasses Salamanca S75 by 22.6 % and with normal irrigation is 12.2 % superior. Thus, Bárcenas S2002 which was selected as line under restricted irrigation, surpasses the older cultivars both with normal and restricted irrigation.

CONCLUSIONS

The model explained 78 % of the combined effects of cultivars and of the genotype-by-environment interaction, the CP1 63 % and the CP2 15 % of the variability due to genotypes and the genotype-by-environment interaction.

According to the model, Bárcenas S2002 was the most productive cultivar in the 24 environments, Eneida F94 was outstanding in two and Camón 5 in one. Salamanca S75 and Saturno S86 obtained the lowest values of the CP2; therefore, this model classified them as the most stable. The results of this study showed that Bárcenas S2007 is the ideal

- Burgueño J., J. Crossa, and M. Vargas. 2001. SAS Programs for graphing GE and GGE biplot. The AMMI analysis and graphing the biplot. Biometrics and Statistics Unit CIMMYT, México. pp: 29-36.
- Campbell, T., and M. Jones. 2005. Assessment of genotype $\times$ interactions for yield and fiber quality in cotton performance trials. *Euphytica* 144: 69-78.
- Condon, A. G., R. A. Richards, G. J. Rebetzke, and G. D. Farquhar. 2004. Breeding for high water-use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55(407): 2447-2460.
- Crossa J. 1990. Statistical analysis of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44: 55-85.
- Eberhart, S. A., and W. A. Russell. 1969. Yield stability for a 10-line diallel of single-cross and double-cross maize hybrids. *Crop Sci.* 9: 357-361.
- Francis, T. R., and L. W. Kannenberg. 1978. Yield stability studies in short season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 58: 1029-1034.
- Gabriel, K. R. 1971. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika* 58: 453-467.
- Gauch, H. G., and R. W. Zobel. 1996. AMMI analysis of yield trials. In: Kang, M. S., and H. G. Gauch (eds). *Genotype-by-Environment Interaction*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp: 85-122.
- González H., A., J. Sahagún, L. M. Vázquez, J. E. Rodríguez, D. J. Pérez, A. Domínguez, O. Franco, y A. Balbuena. 2009. Identificación de variedades de maíz sobresalientes considerando el modelo AMMI y los índices de Eskridge. *Agríc. Téc. Méx.* 35(2): 189-200.
- Jalata, Z. 2011. GGE-biplot analysis of multi-environment yield trials of barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes in Southeastern Ethiopia highlands. *Int. J. Plant Breed. Gen.* 5: 59-75.
- Kang, M. S. 1998. Using genotype by environment interaction for crop cultivar development. *Adv. Agron.* 62: 199-252.
- Ledesma R., L., E. Solís, M. P. Suaste F., y M. F. Rodríguez G. 2010. Relación de métodos de labranza, siembra, riego y dosis de nitrógeno con el rendimiento de trigo. *Rev. Mex. Ciencias Agríc.* 1: 55-63.
- Loomis, R. S., and J. S. Amthor. 1999. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. *Crop Sci.* 39: 1584-1596.
- Mejía C., J. A., y J. D. Molina. 2003. Cambios de estabilidad en el rendimiento de variedades tropicales de maíz. *Fitotec. Mex.* 26: 89-94.
- Mohammadi, R., R. Haghparsat, A. Amriand, and S. Ceccarelli. 2010. Yield stability of rainfed durum wheat and GGE biplot analysis of multi-environment trials. *Crop Pasture Sci.* 61(1): 92-101.
- Okoye, M. N., C. O. Okwuagwu, and M. I. Uguru. 2008. Genotype and genotype by environment (GGE) biplot analysis of fresh fruit bunch yield and yield components of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *J. Appl. Biosci.* 8(1): 288-303.
- Rodríguez P., J. E., J. Sahagún, H. E. Villaseñor, J. D. Molina, y A. Martínez. 2002. Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.) de temporal. *Fitotec. Mex.* 25: 143-151.
- genotype, given that it is outstanding with normal (four irrigations) and limited (two and three irrigations) irrigations. This indicates that it is possible to obtain genetic advancement simultaneously for both moisture conditions.
- End of the English version—
- *
- Rodríguez P., J. E., J. Sahagún, H. E. Villaseñor, J. D. Molina, y A. Martínez. 2005. La interacción genotipo $\times$ ambiente en la caracterización de áreas temporales de producción de trigo. *Agrociencia* 39: 51-64.
- SIAP. 2010. (Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera). SAGARPA. México. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/> (Consulta: octubre 2010).
- Shukla, G. K. 1972. Some statistical aspects of partitioning genotype $\times$ environmental components of variance. *Heredity* 29: 237-245.
- SAS, Institute. 2010. Statistical Analysis System. The SAS system for window. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Solís M. E., A. Salazar Z., J. Huerta E., A. Ramírez R., H. E. Villaseñor M., E. Espitia R. 2003. Bárcenas S2002: nueva variedad de trigo harinero para el Bajío. *Fitotec. Mex.* 26(1): 73-74.
- Solís M. R., J. Huerta E., H. E. Villaseñor M., A. Ramírez R., y P. Pérez H. 2008. Maya S2007: nueva variedad de trigo harinero para la región "El Bajío", México. *Rev. Mex. Ciencias Agríc.* 34 (3): 365-370.
- Solís M. E., y A. Ramírez R. 2010. Variedades de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) para el Bajío. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. Celaya, Gto., México. Folleto Técnico Núm. 7. 40 p.
- Yan, W. 2001. GGE-biplot- a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agron. J.* 93(5): 1111-1118.
- Yan, W., and J. B. Holland. 2010. A heritability-adjusted GGE biplot for test environment evaluation. *Euphytica* 171: 355-369.
- Yan, W., and L. A. Hunt 2002. Biplot Analysis of Multi-environment Trial Data. In: Kang, M. S. (ed). *Quantitative Genetics, Genomics, and Plant Breeding*. CABI Publishing, CAB International, Wallingford, Oxon OX10 8DE UK. 400 p.
- Yan, W., and M. Kang. 2003. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL. 271 p.
- Yan, W., L. A. Hunt, S. Qinglai, and Z. Szalvins. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sc.* 40: 597-605.