

Análisis de la interacción genotipo-ambiente en diferentes condiciones edafoclimáticas en Cuba mediante el GGE biplots

Irenaldo Delgado-Mora^{1*}, Héctor Jorge-Suárez^{1*}, Leneidy Pérez-Pelea² y María Teresa-Cornide-Hernández¹

1. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA).

Carretera a CUJAE, km 1½, Boyeros, La Habana, Cuba, C.P. 19390

*ireinaldo.delgado@inicavc.azcuba.cu, hector.jorge@inica.azcuba.cu

2. Facultad de Biología. Universidad de La Habana. Ministerio de Educación Superior.

Calle 25 # 455 e/ I y J, Plaza. La Habana, Cuba.

RESUMEN

Se plantaron 28 experimentos de genotipos de caña de azúcar en cuatro localidades del país (siete por cada sitio), sobre diferentes tipos de suelos: Ferralítico rojo compactado (Ferralsoles), en la provincia de Matanzas; Pardo, sin carbonato, en Cienfuegos; Pardo, con carbonato, en Santiago de Cuba (Cambisoles) y Pardo con carbonato plastogénico, en Camagüey (Cambisoles éutrico). El diseño empleado fue de bloque al azar, con tres repeticiones, en áreas secano, y la variable del rendimiento evaluada fue el porcentaje de pol (% pol en caña). El objetivo del trabajo fue analizar la interacción genotipo-ambiente en diferentes condiciones edafoclimáticas en Cuba, mediante el GGE biplots. Se obtuvo como resultado que los ambientes de prueba Localidad 1, en la cepa de caña-planta y retoño son discriminatorios pero no representativos, lo que son útiles para seleccionar genotipos con adaptación específica, es decir, son útiles para detectar genotipos inestables, mientras que los ambientes de la Localidad 3, en ambas cepas, son discriminatorios y representativos en presencia de varios megaambientes. El genotipo C89-176 es el de más alto rendimiento y estable, así como el C88-380 es altamente inestable. Se identificaron tres candidatos a megaambientes.

Palabras clave: megaambiente, interacción genotipo ambiente, estabilidad, discriminatorios, representativos.

ABSTRACT

They were once 28 experiments of genotypes of sugarcane in four localities of the country were set up (seven for each place), on acrisols red compacted (Ferralsols) in the province of Matanzas, Pardo without carbonate in Cienfuegos, Pardo with carbonate in Santiago de Cuba (Cambisols) and Pardo with carbonate plastogénico in Camaguey (Cambisols éutrico). The used design came from random block with three repetitions, in areas dry region, and the variable of the performance evaluated was the percentage of pol (% pol in cane). The objective of the work was analyzing the genotype environment interaction in different conditions edafoclimáticas in intervening Cuba the GGE biplots. It was obtained as a result than the environments of proof Localidad 1 in the stock of cane plants and the sprout are discriminating but non-representational, what they are useful to select genotypes with specific adaptation, that is, they are useful for detecting unstable genotypes, while the environments of the Locality 3 in both stocks are discriminatory and representative in the presence of several ambient mega. The genotype C89-176 is the one of higher performance and stable, as well as C88-380 it shifts highly about. Three candidates' presence authenticated to mega environments.

Key words: mega environment, genotype environment interaction, stability, discriminatory, representative.

INTRODUCCIÓN

En Cuba, la caña de azúcar se encuentra distribuida a través de todo el territorio nacional y ocupa alrededor de 659167,5 ha⁻¹, en donde hay plantadas 82 cultivares, de ellos 72 son cubanos, obtenidos por el programa de mejoramiento genético y 12 extranjeros; sin embargo, solo 11 cultivares poseen porcentajes superiores al 3 % del área cañera nacional (1).

Se han realizado numerosos estudios relacionados con la evaluación de genotipos en diferentes ambientes de producción y sus implicaciones en el mejoramiento de los rendimientos cañeros y azucareros (2 - 5).

Los resultados de estos estudios reiteran la importancia y significación de la interacción genotipo-ambiente, lo que apunta a la necesaria evaluación multiambiental de los cultivares durante el proceso de selección, fundamentalmente, en las etapas finales. Es necesario profundizar en esta temática, si se considera que el clima global se ha alterado significativamente (Cambio Climático Global), como resultado del aumento de concentraciones de gases invernadero, incremento de la temperatura media, cambio en la cantidad y distribución de la lluvia, incremento de la concentración de CO₂ atmosférico y eventos extremos (5).

El objetivo del trabajo es analizar la interacción genotipo-ambiente (IGA) en diferentes condiciones edafoclimáticas en Cuba, mediante el GGE biplots.

MATERIALES y MÉTODOS

Para la confección del trabajo fueron plantados 28 experimentos con 19 genotipos de caña de azúcar, ubicados en suelos Ferralítico rojo compactado (Ferralsoles), en la provincia de Matanzas, Pardo sin carbonato, en Cienfuegos; Pardo con carbonato, en Santiago de Cuba (Cambisoles) y Pardo con carbonato plastogénico, en Camagüey (Cambisoles éutrico), según (6) y (7).

El diseño empleado fue de bloques, completamente al azar, con tres repeticiones, en áreas secano, según la metodología establecida por el INICA (8). El área de las parcelas es de 48 m², con un largo de 7.5 m, por un ancho de 1.60 m, con cuatro surcos de ancho (9). La variable del rendimiento evaluada fue: porcentaje de pol (% pol en caña), según la metodología establecida por el INICA (8).

En cada localidad fueron plantados siete ensayos (unidad experimental), durante el período de septiembre de 2009 a febrero de 2010, de la forma siguiente: dos en septiembre y dos en noviembre de 2009; dos en enero, y uno en febrero de 2010); con el propósito de cosecharlos con edades óptimas entre 14 y 15 meses, durante todo el período de zafra (desde noviembre de 2010 hasta mayo 2011), en la cepa caña planta (P) y en el primer retoño (R), con 12 meses de edad, durante el período de noviembre de 2011 a mayo de 2012.

Evaluación de la interacción genotipo-ambiente

Se utilizaron para los estudios multiambientales 19 cultivares (tabla 1), todos resultantes del Programa de Mejora cubano.

Tabla 1. Cultivares estudiados

No.	Genotipos	No.	Genotipos	No.	Genotipos	No.	Genotipos
1	C1051-73	6	C86-251	11	C89-250	16	C90-530
2	C323-68	7	C86-56	12	C89-372	17	C91-115
3	C86-12	8	C88-380	13	C90-317	18	C91-356
4	C86-156	9	C89-148	14	C90-469	19	C91-367
5	C86-165	10	C89-176	15	C90-501		

Procesamiento estadístico

Los datos fueron evaluados respecto a su normalidad y homogeneidad de varianza, mediante pruebas de Chí cuadrado y Bartlett-Box F, y se promediaron en cada localidad y cepa, los valores de los siete meses evaluados de la variable porcentaje de pol en caña (% de pol en caña). Se realizó un análisis de varianza trifactorial, que ofreció como efectos principales (Variedad-Localidad-Cepa) y sus interacciones.

Para la estimación de la estabilidad y la adaptabilidad fenotípica, se definen como ambientes la combinación de las cuatro localidades en las dos cepas estudiadas (tabla 2) y como genotipos a los 19 cultivares anteriormente señalados.

Tabla 2. Ambientes en estudio

No.	Ambientes	Definición
1	C1L1	Cepa caña planta en la localidad 1 (Matanzas)
2	C2L1	Cepa retoño en la localidad 1 (Matanzas)
3	C1L2	Cepa caña planta en la localidad 2 (Cienfuegos)
4	C2L2	Cepa retoño en la localidad 2 (Cienfuegos)
5	C1L3	Cepa caña planta en la localidad 3 (Camagüey)
6	C2L3	Cepa retoño en la localidad 3 (Camagüey)
7	C1L4	Cepa caña planta en la localidad 4 (Santiago de Cuba)
8	C2L4	Cepa retoño en la localidad 4 (Santiago de Cuba)

Se utilizó el modelo multivariado de efectos principales de los genotipos, más efectos de la interacción genotipo-ambiente, también llamado Modelo de Regresión de Sitios, (SREG: *Sites Regression model*) (10) y el modelo de Regresión de Genotipos, GREG: *Genotypes Regression model*) (11).

Para visualizar los patrones de interacción con remoción de los efectos de ambiente (datos centrados por sitio), (10) se proponen los gráficos GGE biplots. A partir de estos gráficos, se puede investigar la diferenciación de megaambientes entre los ambientes en estudio y seleccionar cultivares superiores en un megaambiente dado.

Los análisis estadísticos se realizaron mediante el software Infogen (12).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza trifactorial (Variedad-Localidad-Cepa) del porcentaje de pol en caña (PPC) (tabla 3), ofrece diferencias significativas en todos los efectos principales y sus interacciones, excepto la interacción de primer orden VAR*CEP, que resultó no significativo. La interacción genotipo-ambiente expresada por la interacción VAR*LOC y VAR*LOC*CEP (variedad x localidad y variedad x localidad x cepa), reflejó la existencia de esta.

Tabla 3. ANOVA trifactorial del porcentaje de pol en caña (PPC)

Fuente de variación	GL	CM	F	p
VAR	18	39.3	13.3	0.000000
LOC	3	1060.8	359.5	0.000000
CEP	1	207.4	70.3	0.000000
VAR*LOC	54	14.0	4.8	0.000000
VAR*CEP	18	2.6	0.9	0.584640
LOC*CEP	3	293.2	99.4	0.000000
VAR*LOC*CEP	54	7.3	2.5	0.000000
Error	3040	3.0		

Al resultar significativa la interacción de segundo orden, se procedió a desarrollar diferentes salidas obtenidas por el GGE biplots en la IGA.

Evaluación de ambientes en el GGE biplots

En el plano de las dos primeras componentes (CP1 y CP2) (figura 1), se muestran los resultados del análisis de componentes principales sobre la base de la matriz de correlaciones simples de los datos originales,

donde se observa el vector ambiental del GGE biplot que explica el 75.7 % de la variación fenotípica total, que caracteriza, principalmente, la CP1 por el ambiente C1L1 y C2L1 positivamente, así como en la CP2 por el ambiente C1L2 en dirección positiva y C2L4 en lo negativo.

Los ambientes C1L1 y C2L1 forman un ángulo agudo entre ellos, demuestran correlación, así como ángulo obtuso con los demás ambientes, y presentan una correlación negativa, es decir, son inversamente proporcionales. Los ambientes C1L3, C2L3 y C2L2 están muy pegados, formando ángulos agudos, y sugieren un candidato a megambiente entre ellos, así como los ambientes C1L4 y C2L4, forman un ángulo recto entre ellos, y ofrecen carencia de correlación.

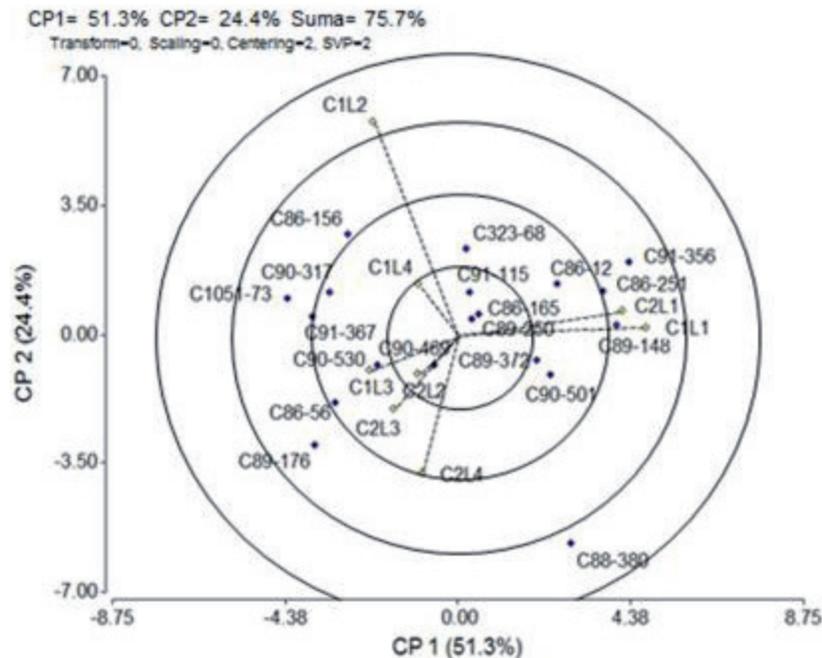


Figura 1. Evaluación de ambientes de prueba por su habilidad discriminadora de los genotipos mediante el análisis GGE biplots.

La presencia de un ángulo obtuso indica un fuerte cambio de rango y demuestra que la IGA es moderadamente grande (13).

Los ambientes C1L1, C2L1 y C1L2 presentan los vectores más largos (figura 1), e indican que son los ambientes más informativos y de mayores valores discriminativos; sin embargo, C1L3 y C2L3 ofrecen valores de su vector más pequeño. Un ambiente de prueba que no discrimine ofrece poca información sobre los genotipos (13).

La figura 2 es similar a la figura 1, excepto que presenta el eje del promedio ambiental, aspecto que fue añadido (14), para estudiar la representatividad de los ambientes de prueba.

El ambiente C1L3 es el más representativo y forma un ángulo pequeño con respecto al promedio ambiental (figura 2); sin embargo, los ambientes C1L1 y C2L1 son los más alejados, es decir, los menos representativos.

Los ambientes de prueba C1L1 y C2L1, son discriminatorios, pero no representativos, por lo que son útiles para seleccionar genotipos con adaptación específica en presencia de varios megaambientes, así como si pertenecen a un mismo megaambiente, son útiles para detectar genotipos inestables, mientras que los ambientes C1L3 y C2L3, son representativos y no discriminatorios.

El ambiente ideal pudiera ser el más discriminativo (informativo) y también el más representativo. En la figura 3, se define un ambiente ideal, el cual aparece como un círculo, los ambientes C2L2 y C1L3, son los más cercanos a estas características, mientras que los ambientes C1L1 y C2L1 son los más pobres para seleccionar cultivares.

Yan y Tinker (13) definen a la prueba ambiental ideal, como un punto de círculos concéntricos en el eje del promedio ambiental en dirección positiva (más representativa), con una distancia desde el origen de biplot igual al vector más largo de todos los ambientes (más informativo). Aquel ambiente que esté más cercano a dicho punto, es el más recomendable.

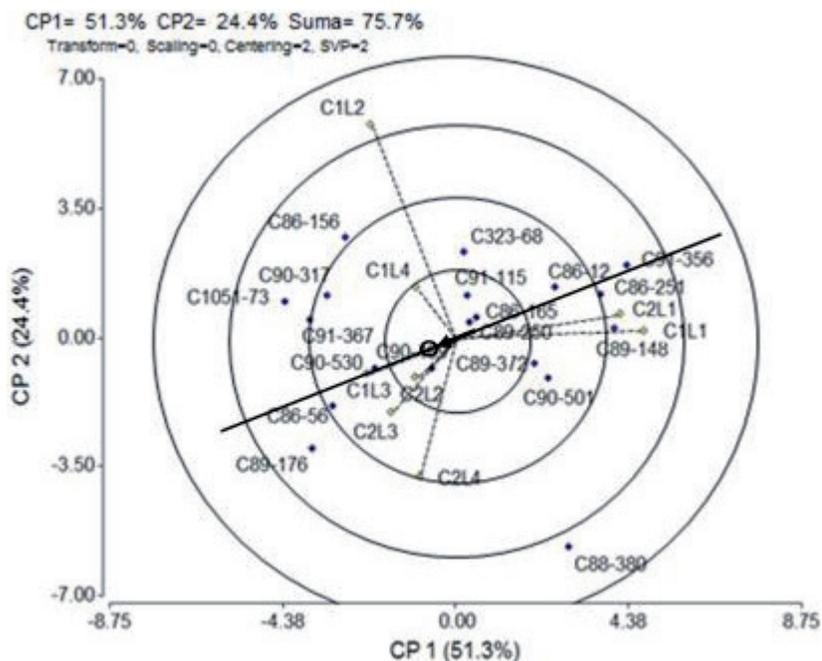


Figura 2. Habilidad discriminatoria y representatividad de los ambientes de prueba mediante los vectores ambientales resultantes del análisis GGE biplot.

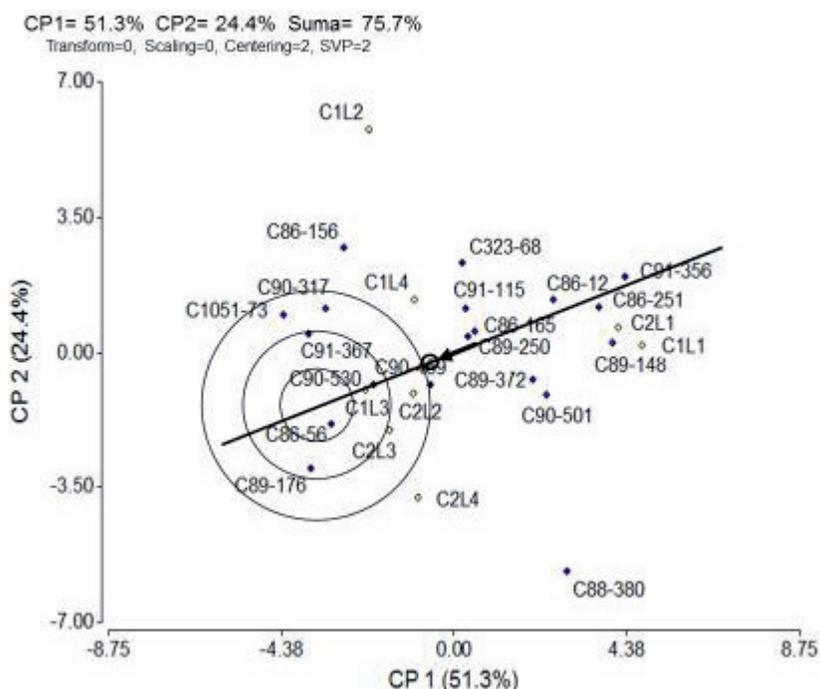


Figura 3. Determinación de la clasificación de los ambientes de prueba en relación con el ambiente de prueba ideal, mediante el análisis GGE biplot.

Yan y Tinker (13) planteron que era necesario estudiar varios años el comportamiento para confirmar que una localidad es ideal (15-17), también coincidieron con los anteriores autores, al expresar que era necesario evaluar en múltiples ambientes por varios años.

Identificar los mejores sitios de pruebas es importante, porque son buenos para discriminar genéticamente diferentes genotipos para diferentes ambientes (17, 18).

Evaluación de genotipos basada en el biplots GGE

En la figura 4 se muestra el comportamiento de los genotipos en cada ambiente. Los genotipos C91-356, C89-148, C86-251 y C86-12, forman un ángulo agudo con los ambientes C1L1 y C2L1, así como C86-156 con C1L4, C90-469 con C2L3 y C89-176, C86-56, C90-530 con los ambientes C2L2 y C1L3, significa que la contribución principal es de G, y resulta una media superior al de todos los genotipos en sus respectivos ambientes.

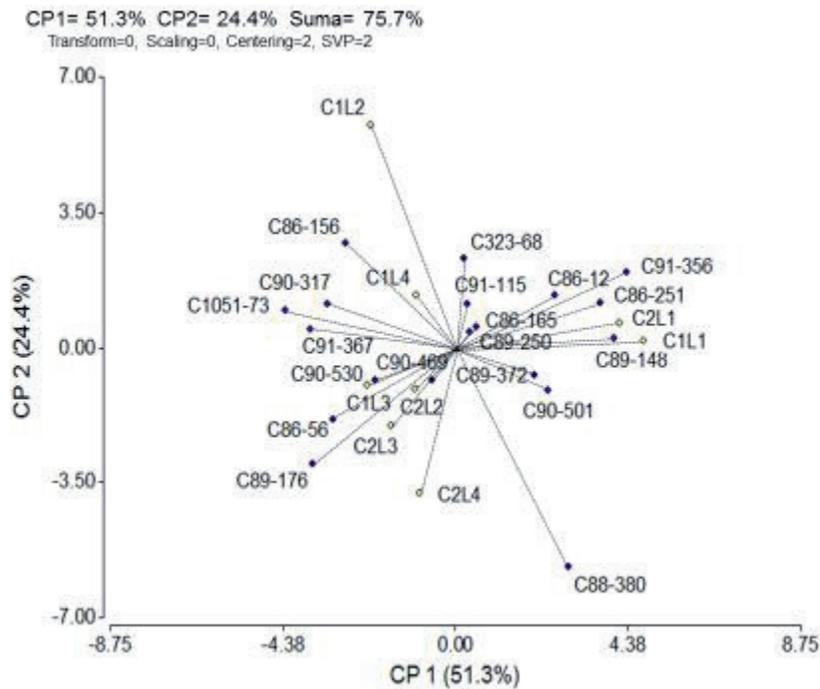


Figura 4. Comportamiento de los genotipos en cada ambiente presentando el biplot GGE.

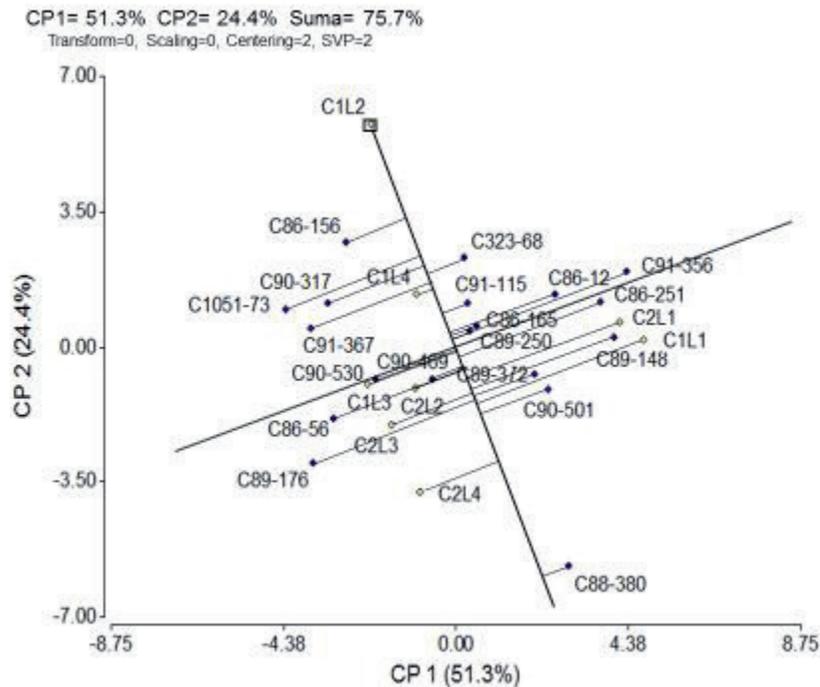


Figura 5. Clasificación de los genotipos basada en el comportamiento de un ambiente específico (C1L2).

Clasificación de genotipos basada en el comportamiento en un ambiente

La figura 5 ofrece el rango de los genotipos basados en el comportamiento en el ambiente C1L2. Los genotipos C89-148, C90-501, C91-356, C89-372, C86-251, C86-12 y C88-380, son de bajos rendimientos para este ambiente, principalmente, este último, así mismo C89-250, C90-469 y C86-165 son cercanos al rendimiento promedio y los demás son de altos rendimientos. El genotipo C88-380 fue el de más bajo rendimiento para este ambiente, así como C86-156 el de valores más altos.

Clasificación de ambientes basada en el comportamiento del genotipo

La figura 6 muestra la clasificación de una prueba ambiental en lo relativo al comportamiento del genotipo C89-176. Se muestra que este genotipo tiene bajos valores de rendimiento promedio en los ambientes C1L1 y C2L1, así como valores cercanos a la media en C1L4 y más altos valores en los demás ambientes, fundamentalmente, en C1L3 y C2L3.

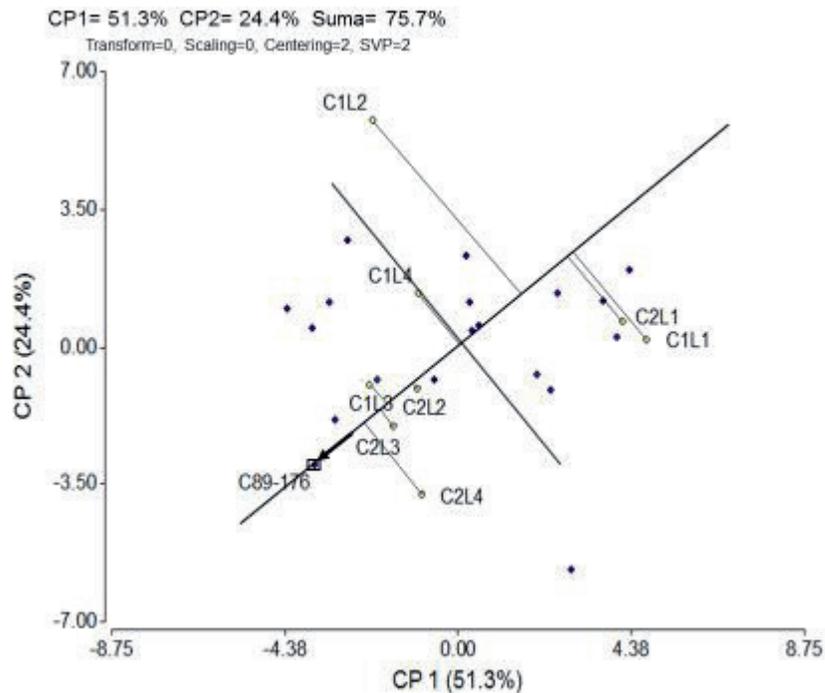


Figura 6. Clasificación de los ambientes basada en el comportamiento de un genotipo específico (C89-176).

Comportamiento medio y estabilidad de los genotipos

La figura 7 muestra, en el biplot GGE, el comportamiento y la estabilidad de los genotipos basados en el eje promedio ambiental.

El genotipo C1051-73 posee el rendimiento más alto, mientras que C86-165, C91-115, C89-250 y C323-68, presentan valores cercanos a la media ambiental, así como C86-251, C89-148 y C91-356 poseen los más bajos valores de rendimiento medio, fundamentalmente, este último. El genotipo C89-176 es el de más alto rendimiento y estable.

El genotipo C88-380 es altamente inestable; sin embargo, C89-176 es altamente estable.

Clasificación de los genotipos en relación con un genotipo ideal

Un genotipo ideal posee alto rendimiento y estabilidad a través de los ambientes. En la figura 8 se define un genotipo ideal (el centro de los círculos concéntricos), por ser un punto en el eje promedio ambiental (absolutamente estable) en la dirección positiva. Los genotipos estrechamente localizados cerca al genotipo ideal, son más deseables que otros. Ejemplo, en la figura 8 se observa que los genotipos C90-469, C86-165, C89-250, C91-115 y C323-68 fueron más deseables que C1051-73, C91-367 o que C86-156, a pesar de que posean mayor rendimiento promedio. El genotipo C91-356 fue el más pobre (menos deseado).

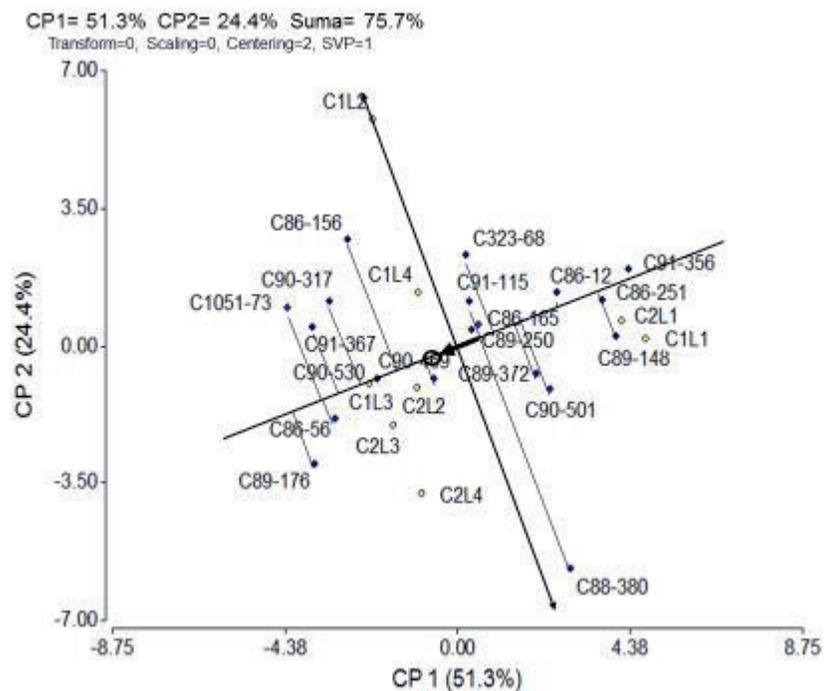


Figura 7. Comportamiento medio y estabilidad de los genotipos en el eje de coordenadas del ambiente promedio.

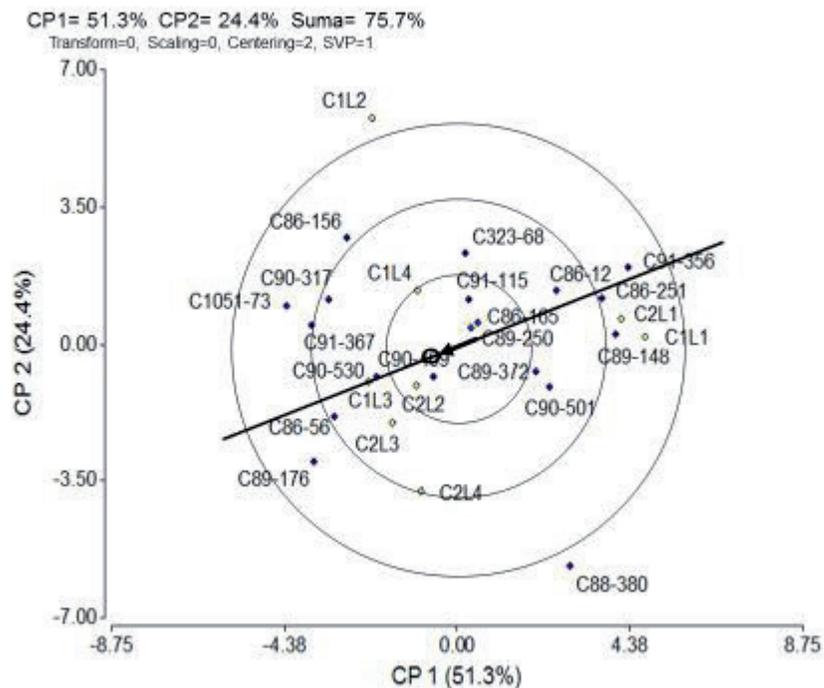


Figura 8. Clasificación de los genotipos en relación con un genotipo ideal.

Which-won-where (www)

Una de las figuras más atractivas del biplot GGE es el diseño which-won-where (quien-gana-donde), para representar la respuesta de un genotipo en varios ambientes (figura 9). Muchos investigadores aciertan en el uso de este interesante biplot, por la importante habilidad de mostrar gráficamente conceptos como: interacción genotipo-ambiente, diferenciación de mega ambientes, adaptación específica, etc (13).

3. López, E. 1986. Influencia de algunos factores del ambiente sobre el rendimiento y aplicación de tres métodos de estabilidad en los estudios de regionalización de variedades de caña de azúcar en las provincias de Camagüey y Ciego de Avila. Tesis en opción al grado de doctor en Ciencias Agrícolas. Camagüey, Cuba. Ministerio de Educación Superior. Universidad Agraria de La Habana. 198 p.
4. Jorge, H. (1996). Estudio genético de los componente agroazucareros en las etapas clonales del esquema de selección partiendo de posturas aviveradas de caña de azúcar (*Saccharum spp*). Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA. MINAZ, 90 pp.
5. Rodríguez, R. Perfeccionamiento del programa de mejora genética de la caña de azúcar (*Saccharum spp.*) para la obtención de nuevos genotipos tolerantes al estrés por déficit hídrico. Tesis para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA, La Habana, Cuba. 2012, 100 p.
6. Hernández, A.; Pérez, J.M.; Bosch, D. y Rivero, L. 1999. Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. La Habana. AGRINFOR, 64 p
7. Hernández; A., J. Pérez, O. Ortega, L. Avila, A. Cárdenas, A. Marrero y N. Companioni. 1975. II Clasificación genética de los suelos de Cuba. Revista Agricultura. VIII (1): 47-69.
8. Jorge, H.; González, R.; Casas, M. y Jorge, I. 2011. Normas y Procedimientos del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en Cuba. La Habana, Cuba, PUBLINICA. 308 p.
9. Pérez, J.L. y N. Milanés 1979. Revista Ciencias de la Agricultura. No. 4.
10. Crossa, J. and P. Cornelius. 1997. Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variances. Crop Sci. 37: 406-415.
11. Balzarini Mónica, Cecilia Bruno, Alejandra Arroyo. 2004. ANÁLISIS DE ENSAYOS AGRÍCOLAS MULTI-AMBIENTALES. Ejemplos con Info-Gen.. Estadística y Biometría. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
12. Balzarini M.G., Di Rienzo J.A. InfoGen versión 2016. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.info-gen.com.ar>.
13. Yan, W., and N.A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. Can. J. Plant Sci. 86:623–645.
14. Yan, W. 2001. GGEbiplot – a Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. Agronomy Journal 93(5), 1111.
15. Annicchiarico, P. 1997. Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. Euphytica 94 (1): 53–62.
16. Rao, P.S., P.S. Reddy, A. Rathore, B.V. Reddy, and S. Panwar. 2011. Application GGE biplot and AMMI model to evaluate sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids for genotype 9 environment interaction and seasonal adaptation. Indian Journal of Agricultural Sciences 81: 438–444.
17. Luo, J., Y.-B. Pan, Y. Que, H. Zhang, M. P. Grisham, and L. Xu. 2015. Biplot evaluation of test environments and identification of mega-environment for sugarcane cultivars in China. Scientific Reports 5:15505.
18. Badu-Apraku, B., R. Akinwale, K. Obeng-Antwi, A. Haruna, R. Kanton, I. Usman, S. Ado, N. Coulibaly, G. Yallou, and M. Oyekunle. 2013. Assessing the representativeness and repeatability of testing sites for drought-tolerant maize in West Africa. Canadian Journal of Plant Science 93 (4): 699–714.
19. Cherinet Alem, Abebe Worku, Molla Mekonnen, Tazebachew Asres, Desalew Fentie, Esmelealem Mihiretu and Jemal Esmael. 2016. Int. J. Plant Breed. Genet., 10 (2): 104-109, 2016. GGE Stability Analysis of Seed Yield in Sunflower Genotypes (*Helianthus annuus L.*) in Western Amhara Region, Ethiopia. International Journal of Plant Breeding and Genetics
20. Donoso-Ñanculao Gabriel, Mario Paredes, Viviana Becerra, Camila Arrepol, and Mónica Balzarini. 2016. GGE biplot analysis of multi-environment yield trials of rice produced in a temperate climate. CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH 76(2) APRIL-JUNE 2016.