

**ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE DE GENOTIPOS DE TRIGO UTILIZANDO EL
MODELO GGE BILOT
STUDY OF THE ENVIRONMENTAL GENOTYPE INTERACTION OF WHEAT GENOTYPES USING THE
GGE BILOT MODEL**

*Lourdes Ledesma-Ramírez¹; Ernesto Solís-Moya¹; Luis Antonio Mariscal-Amaro¹; Aquilino Ramírez-Ramírez¹; Adán Ulises Chávez-Solís¹; Sarahyt Santamaría González-Figueroa^{1,2}

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Campo experimental Bajío. Carretera Celaya – San Miguel Allende km 6.5 C. P. 38010 Celaya Gto., México. Tel: 800 088 2222. ² Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Roque. Carretera Celaya-Juventino Rosas km 8, S/N; C.P. 38110, Apartado Postal 508, Celaya, Guanajuato, México

Autor responsable: *lulis_amigui@hotmail.com
Recibido: 21 marzo 2021, aceptado: 28 sept 2021

Artículo científico

RESUMEN

Los experimentos de fechas de siembra se han establecido por más de 40 años en el Campo Experimental Bajío. Estos experimentos han permitido identificar la fecha óptima de siembra para el cultivo de trigo, la cual ocurre entre el 1 y 15 de diciembre, debido a que el trigo sembrado en estas fechas se desarrolla en temperaturas más frescas, lo que alarga las etapas reproductiva temprana y tardía, con la consecuente producción de un mayor número de espiguillas y sobrevivencia de un mayor número de flores; además, en esta fecha hay una menor muerte de macollos y la etapa de llenado de grano se desarrolla en temperaturas menores, lo que origina granos con mayor peso hectolítrico. El objetivo de esta investigación fue estudiar la interacción genotipo ambiente de ocho genotipos de trigo evaluados en cinco fechas de siembra, utilizando el modelo GGE biplot. En este

estudio se evaluaron cinco fechas de siembra: 15 de noviembre (A), 1° de diciembre (B), 15 de diciembre (C), 1° de enero (D) y 15 de enero (E) y ocho variedades de trigo: V20 (20), Anatoly C2011 (31), Cortázar S94 (1), Alondra F2014 (11), Cisne F2016 (25), Ibis M2016 (8), Elia M2016 (34) y Faisán S2016 (15), en un arreglo de serie de experimentos con un diseño bloques al azar. Las fechas de siembra tempranas 1 y 15 de diciembre permiten obtener mayores rendimientos que las fechas tardías. La variedad Elia M2016 fue la que mostró mayor rendimiento y estabilidad a través de fechas de siembra; esto originó que el modelo GGE la identificara como el genotipo ideal.

Palabras clave: fechas de siembra, rendimiento, genotipo ideal.

ABSTRACT

Sowing date experiments have been established for more than 40 years in the Bajío Experimental Field. These experiments have allowed to identify the optimal sowing date for the wheat crop, which occurs between December 1 and 15, due to the fact that the wheat sown on these dates develops in cooler temperatures, which lengthens the early and late reproductive stages with the consequent production of a greater number of spikelets and survival of a greater number of flowers, in addition, on this date there is less tiller death and the grain filling stage takes place at lower temperatures, which results in grains with a higher test weight. The objective of this work was to study the environmental genotype interaction of eight wheat genotypes evaluated at five sowing dates using the

GGE biplot model. In this study, five sowing dates were evaluated November 15 (A), December 1 (B), December 15 (C), January 1 (D) and January 15 (E) and eight varieties of wheat V20 (20), Anatoly C2011 (31), Cortazar S94 (1), Alondra F2014 (11), Cisne F2016 (25), Ibis M2016 (8), Elia M2016 (34) and Faisan S2016 (15), in a series arrangement of experiments with a randomized block design. Early sowing dates December 1 and 15 allow higher yields than late dates. The Elia M2016 variety was the one that showed the highest yield and stability through sowing dates, this led to the GGE model identifying it as the ideal genotype.

Keywords: sowing dates, yield, ideal genotype.

INTRODUCCIÓN

Los experimentos de fechas de siembra se han establecido por más de 40 años en el Campo Experimental Bajío. Estos trabajos iniciaron evaluando seis fechas de siembra empezando el 1 de noviembre y finalizando el 15 de enero con intervalo de 15 días. A partir de 1990 se descartó la fecha de siembra del 1 de noviembre debido a que pocos o ninguno de los productores pueden establecer su cultivo en esta fecha, ya que en la región se siembran dos cultivos al año: maíz o sorgo en el ciclo primavera – verano y trigo o cebada en el ciclo otoño – invierno. Estos experimentos han permitido identificar la fecha óptima de siembra para el cultivo de trigo, la cual ocurre entre el 1 y 15 de diciembre, debido a que el trigo sembrado en estas fechas se desarrolla en temperaturas más frescas, lo que alarga las etapas reproductiva temprana y tardía con la consecuente producción de un mayor número de espiguillas y

sobrevivencia de un mayor número de flores; además, en esta fecha hay una menor muerte de macollos y la etapa de llenado de grano se desarrolla en temperaturas menores lo que origina granos con mayor peso hectolítrico. Si bien, esta serie de experimentos ha cumplido con uno de sus objetivos que fue identificar la mejor fecha de siembra de las variedades de trigo; la existencia de la interacción genotipo ambiente exige continuar con este tipo de estudios, ya que es muy importante para un programa de mejoramiento identificar la estabilidad de los genotipos más destacados en rendimiento, resistencia a enfermedades y calidad industrial para liberar aquellos que muestren mayor adaptación a los diferentes ambientes de evaluación. El objetivo de esta investigación fue estudiar la interacción genotipo ambiente de ocho genotipos de trigo evaluados en cinco fechas de siembra utilizando el modelo GGE biplot.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el INIFAP Campo Experimental Bajío (CEBAJ), ubicado en el Km 6.5 de la carretera Celaya – San Miguel de Allende, en Celaya, Gto., cuya localización geográfica se encuentra aproximadamente a 20° 34' Latitud Norte; 100° 49' Longitud Oeste; y una altura de 1769 msnm. La densidad de siembra fue de 120 kg ha⁻¹. En este estudio se evaluaron cinco fechas de siembra: 15 de noviembre (A), 1 de diciembre (B), 15 de diciembre (C), 1 de enero (D) y 15 de enero (E) y ocho variedades de trigo V20 (20), Anatoly C2011 (31), Cortazar S94 (1), Alondra F2014 (11), Cisne F2016 (25), Ibis M2016 (8), Elia M2016 (34) y Faisán S2016 (15), en un arreglo de serie de experimentos con un diseño bloques al azar. La parcela experimental estuvo formada por dos surcos de 3 m de largo separado 75 cm. La dosis de fertilización utilizada fue 240-60-00 (N-P-

K); como fuente de nitrógeno se utilizó sulfato de amonio (Sulfamín) aplicando el 50% a la siembra y el resto en el primer riego de auxilio; como fuente de fósforo se utilizó súper fosfato de calcio triple en una sola aplicación a la siembra. El control de malezas de hoja ancha se realizó aplicando 0.75 L ha⁻¹ de Estarane a los 22 días y 1.0 L ha⁻¹ de Esterón 47 a los 34 días después de la siembra. Para la hoja angosta se utilizó Topik más ámber a los 30 días. Se evaluó la variable rendimiento en grano (RG); los datos fueron sometidos al análisis de varianza y la prueba de comparación de medias (DMS, $p < 0.05$) usando el programa estadístico RStudio. Para la interacción genotipo-ambiente se utilizó el modelo GGE para el carácter rendimiento usando el paquete metan- package versión 1.12.0 bajo el programa RStudio versión 1.3.959.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis a través de localidades

El análisis de varianza combinado detectó diferencias altamente significativas para fechas de

siembra (FS) variedades (GEN) y la interacción FS*GEN (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza combinado de la variable rendimiento de grano de ocho genotipos de trigo evaluados en cinco fechas de siembra. Celaya, Gto. P-V 2020

FV	GL	SC	CM	F value	Pr(>F)	
FS	4	147912527	36978132	97.7943	< 2.2e-16	***
Rep	2	588900	294450	0.7787	0.4625	
GEN	7	34586351	4940907	13.067	5.18E-11	***
FS*GEN	28	37002641	1321523	3.495	7.07E-06	***
Error	78	29493489	378122			
Media	5441					
CV	11.3					
shapiro.test	0.34					
bartlett.test	0.52					

Las comparaciones de medias para fechas de siembra (Cuadro 2) mostró que las fechas de siembra del 15 y 1 de diciembre (FSC y B) fueron superiores significativamente en rendimiento a las otras fechas evaluadas; esto indica que son las

fechas que deben utilizar los agricultores de la región para obtener los mejores rendimientos las FS E (31 de diciembre), A (15 de noviembre) y D (31 de diciembre) (DMS \leq 0.05) con diferencias de 1974, 2266 y 2494 kg ha⁻¹, respectivamente.

Cuadro 2. Comparación de medias entre fechas de siembra de la variable rendimiento mediante la prueba de DMS. CAEB. PV-2020.

Fecha de siembra	Rkg/ha	grupos
FSC	6790	a
FSB	6783	a
FSE	4816	b
FSA	4524	bc
FSD	4296	c
DMS	353	

^a letras diferentes entre fechas indica significancia estadística

La comparación de medias entre genotipos mostró que las variedades Elia M2016 y Cisne F2016 superaron significativamente (DMS \leq 0.05) a las variedades Ibis M2016 (8), Faisán S2016 (15),

Alondra F2014 (11), Anatoly C2011 (11) y Cortazar S94 (1); las diferencias entre Elia M2016 y Cortazar S94 fueron de hasta 1502 kg ha⁻¹ en promedio a través de fechas de siembra.

Cuadro 3. Comparación de medias de variedades a través de fechas de siembra con la variable rendimiento de grano (Rkg/ha) mediante la prueba de DMS. CAEB. PV-2020.

Variedad	Rkg/ha	Grupos
34	6095	a
25	6058	a
20	5924	ab
8	5551	bc
15	5337	c
11	5228	c
31	4750	d
1	4593	d
DMS	353	

Análisis de la interacción genotipo ambiente con el modelo GGE biplot

Biplot de similitud de genotipos

El modelo GGE biplot explicó el 91% de la variación del rendimiento de las ocho variedades evaluadas en cinco fechas de siembra (Figura 1). En el modelo básico se observa en un mismo plano el comportamiento de los genotipos y los ambientes. Los genotipos son representados por el número de variedad en color naranja, mientras que los ambientes son representados por vectores de diferente dimensión de color verde. El ángulo entre los vectores indica la correlación entre los ambientes, un ángulo agudo indica correlación positiva como es el caso de las fechas de siembra C y B. Un ángulo recto indica que no existe correlación entre los ambientes, en este estudio los ambientes con un comportamiento aproximado serían las fechas de siembra A y D. Finalmente un ángulo obtuso indica correlación negativa situación que no se observó en este trabajo. Los genotipos

próximos a los vectores de los ambientes son los que obtuvieron mayor expresión del carácter en estudio (rendimiento), así se observa que las variedades Elia M2016, Cisne F2016 y la V20 están próximos a los vectores de las fechas de siembra A, B, C y E por lo tanto se asume que estos genotipos obtuvieron los rendimientos más altos en estas fechas de siembra. Las variedades 31 (Anatoly C2011) y 1 (Cortazar S94) se encuentran muy alejados de todos los vectores lo cual significa que obtuvieron los rendimientos más bajos en todos los ambientes. Este gráfico indica, además, la similitud y disimilitud entre los genotipos; por ejemplo, Cisne F2016, Elia M2016 y V20 se encuentran muy próximos entre ellos lo que indica que estos genotipos son similares en rendimiento; la distancia de éstos con Alondra F2014 y Cortazar S94 indica que son diferentes en este carácter.

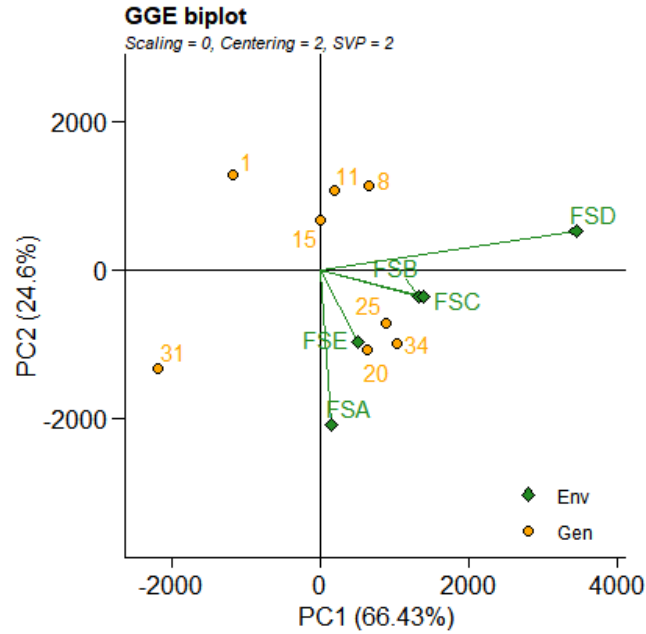


Figura 1. Gráfico de similitud y disimilitud entre genotipos de trigo evaluados en cinco fechas de siembra en el ciclo 2019-20.

Biplot de la media ambiental y estabilidad de los genotipos

En este gráfico se dibuja el promedio de los ambientes que pasa por el origen del biplot (llamada coordenada ambiental promedio, CAP). Las proyecciones de los marcadores genotípicos se aproximan al rendimiento medio de los genotipos. Por lo tanto, Elia M2016 (34) fue el genotipo más destacado en rendimiento, pero cerca están Cisne F2015 (15) y V20 (20), mientras que los genotipos de menor rendimiento fueron Cortazar S94 (1) y Anatoly C2011 (31). La ordenada CAP es la línea que pasa por el origen

del biplot y es perpendicular a la abscisa CAP. Por lo tanto, si la abscisa CAP representa a los genotipos, la ordenada CAP debe aproximarse a la interacción genotipo ambiente asociada con cada genotipo, que es una medida de variabilidad o inestabilidad de los genotipos (Yan *et al.*, 2007). Una mayor proyección sobre la ordenada CAP independientemente de la dirección significa una mayor inestabilidad. En la Figura 2 podemos observar que cuatro genotipos, Elia M2016, Cisne F2016, V20 y Cortazar S94 son variedades muy estables; Anatoly C2011 (31) se comportó como la variedad más inestable.

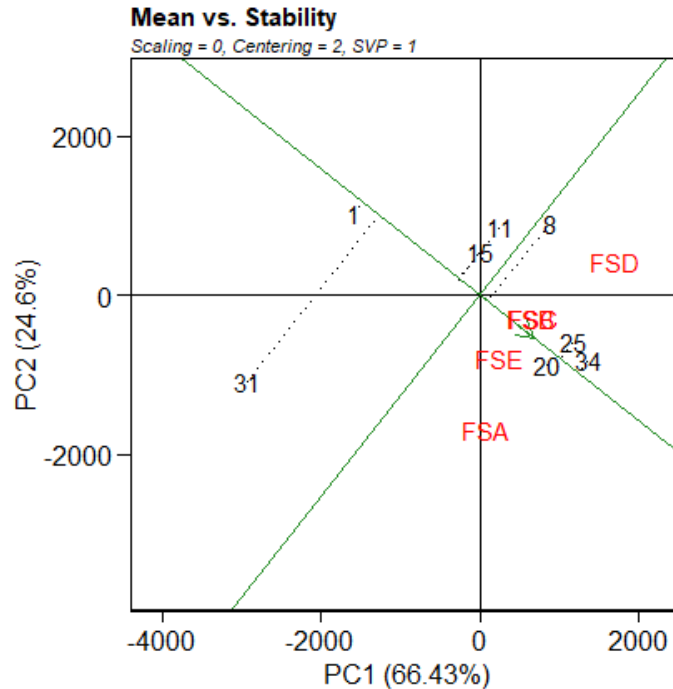


Figura 2. Biplot que mide la estabilidad de los genotipos en los ambientes evaluados

Biplot quien ganó donde

En este biplot se dibuja un polígono que une los genotipos (1, 8, 34 y 31) que se encuentran más alejados del origen del biplot para que todos los demás genotipos estén contenidos en el polígono. Los genotipos vértice tienen los vectores más largos, en sus respectivas direcciones, lo que es una medida de la capacidad de respuesta a los ambientes. Los genotipos vértice se encuentran, por lo tanto, entre los genotipos más sensibles; todos los demás genotipos responden menos en sus respectivas direcciones. Un genotipo ubicado en el origen se clasificaría igual en todos los

ambientes y no responde en absoluto a los cambios ambientales. Las líneas perpendiculares a los lados del polígono dividen el biplot en sectores. Cada sector tiene un genotipo vértice. Por ejemplo, el sector con el genotipo vértice 34 (Elia M2016) puede denominarse sector 34; y cuatro ambientes (FSA, FSB, FSC y FSE), cayeron en este sector. Como regla general, el genotipo vértice es el genotipo de mayor rendimiento en todos los ambientes que comparten el sector con él (Yan *et al.* 2007). En este caso, Elia M2016 fue el de mayor rendimiento en las fechas de siembra A, B, C y E.

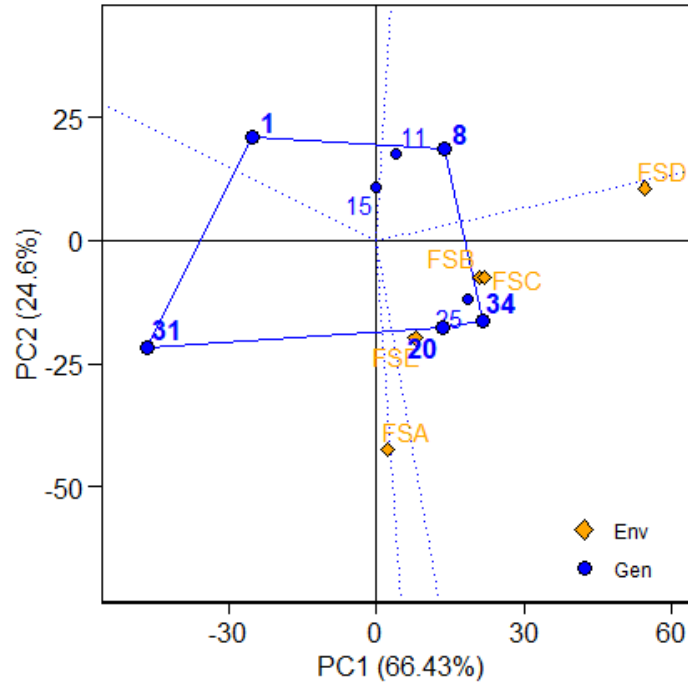


Figura 3. Biplot que indica que genotipo ganó en qué ambiente de evaluación. Mejorar

Biplot para examinar un ambiente (FSB)

La identificación de los genotipos más adaptados a un ambiente se puede lograr fácilmente mediante un biplot GGE. Para visualizar el desempeño de diferentes genotipos en un ambiente dado, FSB, se dibujó una línea que pasa por el origen del biplot y el marcador de FSB. Los genotipos se pueden

clasificar de acuerdo con sus proyecciones sobre el eje FSB en función de su desempeño en este ambiente, en la dirección que señala la flecha. En esta fecha de siembra el genotipo de mayor rendimiento fue Elia M2016 y el de menor rendimiento fue Anatoli C2011, y el orden de los genotipos fue 34 > 25 > 20 > 8 > 11 > 15 > 1 > 31 (Figura 4).

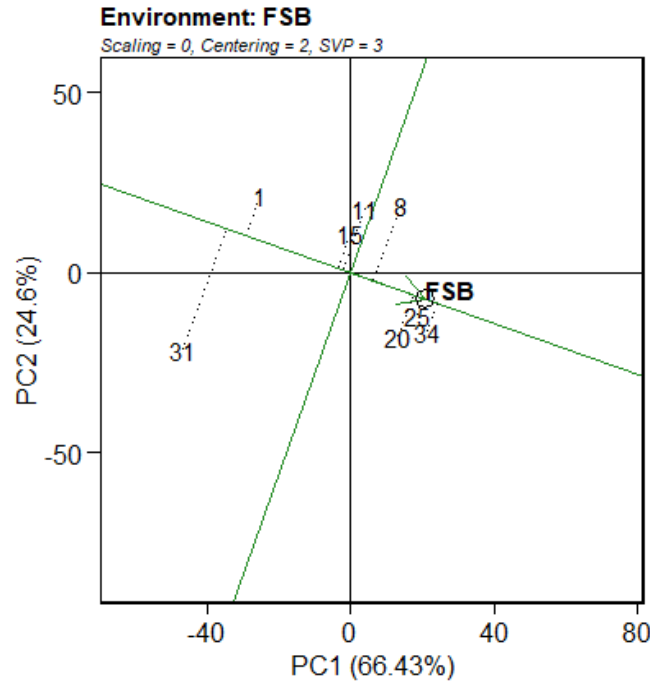


Figura 4. Biplot que clasifica los genotipos de acuerdo a su comportamiento en la fecha de siembra B.

Biplot para examinar un ambiente (FSD)

En la FSD donde se obtuvo el menor rendimiento el orden de los genotipos fue similar al observado en la FSB. En este caso nuevamente el genotipo de mayor rendimiento fue Elia M2016 y el de menor

rendimiento Anatoly C2011, y el orden de los genotipos fue 34 > 8 > 25 > 20 > 11 > 15 > 1 > 31 (Figura 5).

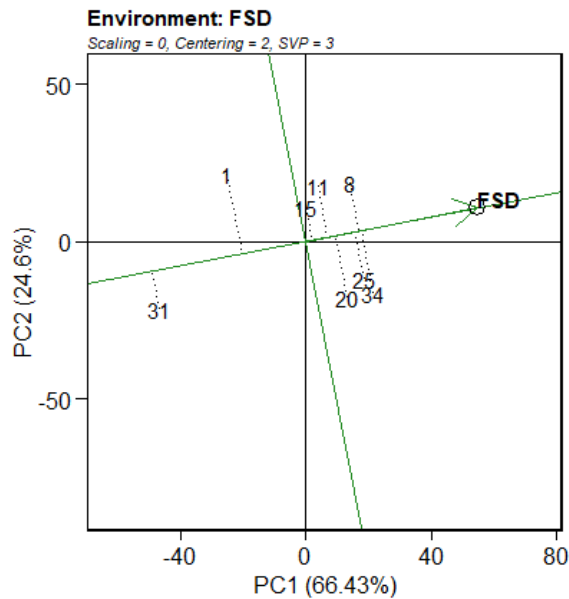


Figura 5. Biplot que clasifica los genotipos de acuerdo a su comportamiento en la fecha de siembra D.

Biplot para examinar un genotipo

De forma análoga a la visualización del rendimiento de los genotipos en un ambiente dado (Figura 6), la visualización de la media y la estabilidad de los genotipos se logra dibujando una coordenada ambiental promedio (CAP) en el biplot centrado en

el genotipo (Yan *et al.* 2007). En este estudio de fechas de siembra se observó que Elia M2016 (34), obtuvo su mejor ubicación (primer lugar) en la FSD seguida de la FSA, FSC, FSB y FSE.

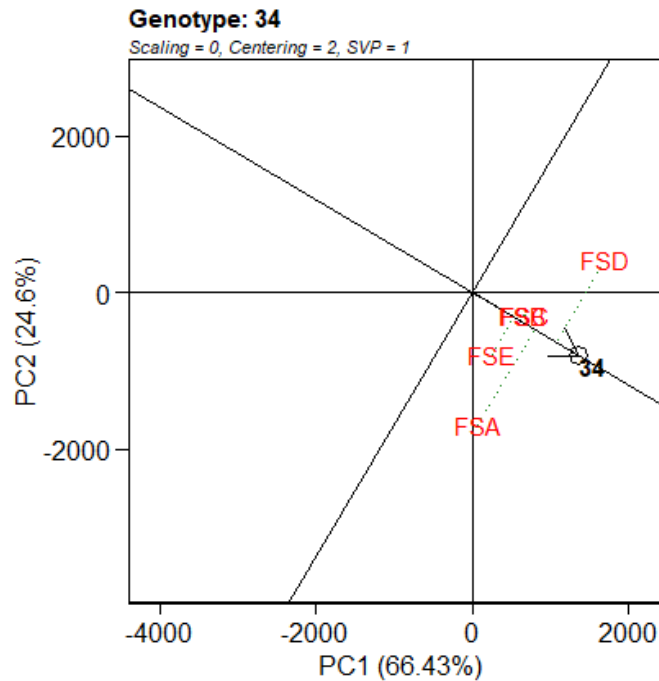


Figura 6. Biplot que describe el comportamiento de Elia M2016 en las cinco fechas de siembra evaluadas.

Biplot que identifica el genotipo ideal

Esta biplot compara todos los genotipos con el genotipo "ideal", el genotipo ideal, representado por el círculo pequeño con una flecha apuntando hacia él, se define como el de mayor rendimiento en todos los ambientes. Es decir, tiene el rendimiento medio más alto y es absolutamente estable. Los

genotipos se clasifican en función de su distancia del genotipo ideal (Yan *et al.* 2007). En este estudio, se encontró que Elia M2016, Cisne F2016 y V20 superan a los otros genotipos en rendimiento de grano (Figura 7).

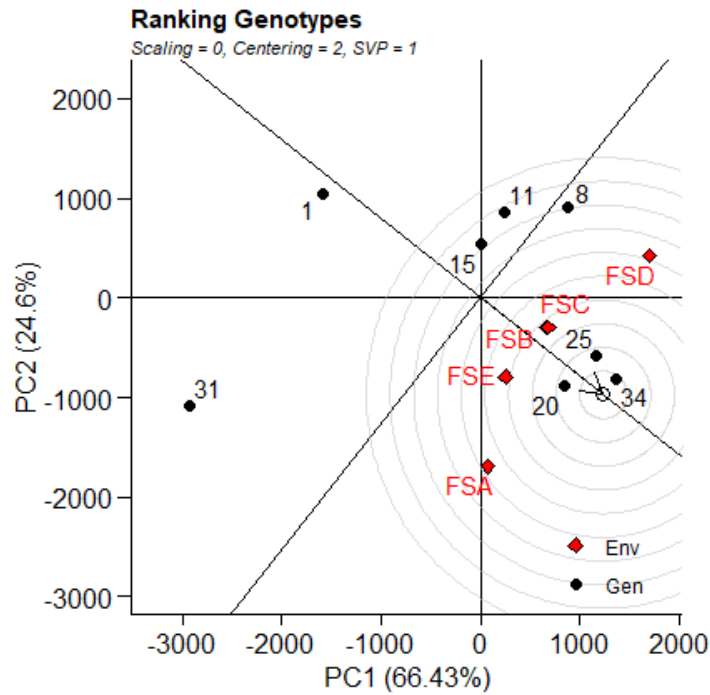


Figura 7. Biplot que identifica el genotipo ideal en los ambientes de evaluación.

Biplot para comparar dos genotipos

Para comparar los genotipos Elia M2016 (34) y Cortazar S94 (1), se dibujó una línea de conexión para conectarlos y se dibujó una línea perpendicular que pasa por el origen del biplot y es perpendicular a la línea de conexión (Figura 8).

Vemos que los cinco ambientes están del lado de la línea perpendicular, junto con Elia M2016. Esto indica que Elia M2016 rindió más que Cortazar S94 en las cinco fechas de siembra (Yan *et al.* 2007).

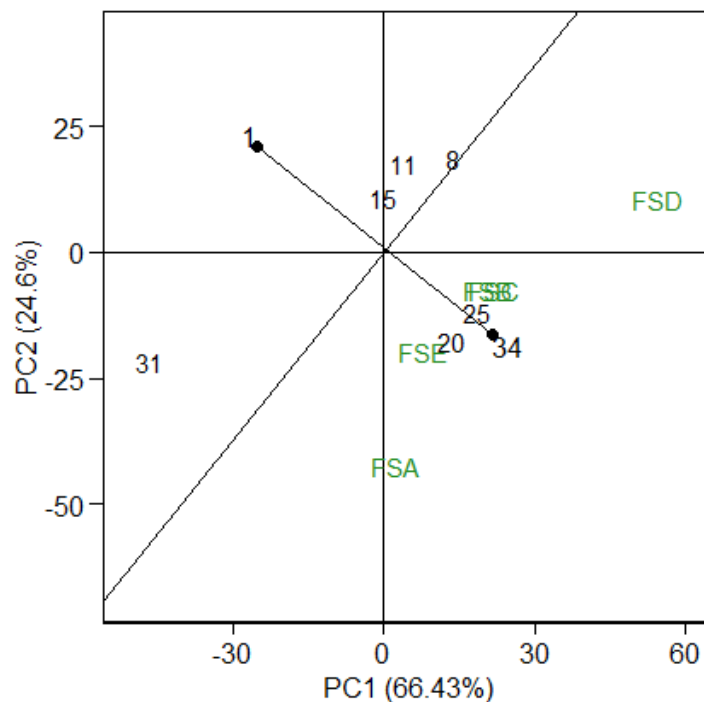


Figura 8. Biplot que compara el comportamiento de los genotipos Elia M2016 y Cortázar S94 en cinco fechas de siembra evaluadas en el ciclo OI 2019-20.

CONCLUSIONES

Las fechas de siembra tempranas 1 y 15 de diciembre permiten obtener mayores rendimientos que las fechas tardías. La variedad Elia M2016 fue la que mostró mayor rendimiento y estabilidad a través de fechas de siembra; esto originó que el modelo GGE la identificara como el genotipo ideal.

Las variedades liberadas después de 2014 superaron el rendimiento de la variedad Cortázar S94, la más destacada de ellas Elia M2016 la superó hasta con 1502 kg ha⁻¹ a través de fechas de siembra.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Yan, W., M. S. Kang, B. Ma, S. Woods, and P. L. Cornelius. 2007. "GGE Biplot vs. AMMI Analysis of Genotype-by-Environment Data." *Crop Science* 47 (2): 641–53. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.06.0374>.