



## RENDIMIENTO Y COMPONENTES AGRONÓMICOS EN HÍBRIDOS DE MAÍZ MORADO (*Zea mays* L.) USANDO EL MODELO AMMI

### Yield and agronomic characteristics of purple corn (*Zea mays* L.) hybrids with different inbreeding using the AMMI model

Gilberto Rodríguez-Pérez<sup>1\*</sup> ; Alejandro García-Ramírez<sup>1</sup> ; Felipe de Jesús Reynaga-Franco<sup>1</sup> ; Jaime Edzael Mendivil-Mendoza<sup>1</sup> ; Alba Rocío Ochoa Meza<sup>1</sup> ; Francisco Cervantes-Ortiz<sup>2</sup> ; Enrique Andrio Enriquez<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui, Av. Tecnológico, Block 611, Valle del Yaqui Bácum, Ciudad Obregón Sonora, México.  [gilberto rp@vyaqui.tecnm.mx](mailto:gilberto rp@vyaqui.tecnm.mx), [alejand ro.gr@vyaqui.tecnm.mx](mailto:alejand ro.gr@vyaqui.tecnm.mx), [felipe.rf@vyaqui.tecnm.mx](mailto:felipe.rf@vyaqui.tecnm.mx), [jmendivil.mendoza@itvy.edu.mx](mailto:jmendivil.mendoza@itvy.edu.mx), [aochoa.meza@itvy.edu.mx](mailto:aochoa.meza@itvy.edu.mx)

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México-Roque, Km 8 Carretera Celaya-Juventino Rosas, Celaya, Guanajuato, México.  [francisco.co@roque.tecnm.mx](mailto:francisco.co@roque.tecnm.mx), [enrique.ae@roque.tecnm.mx](mailto:enrique.ae@roque.tecnm.mx)

\*Email: [gilberto rp@vyaqui.tecnm](mailto:gilberto rp@vyaqui.tecnm)

Recibido: 30/12/2022; Aceptado: 09/06/2023; Publicado: 16/06/2023

### ABSTRACT

The production of corn (*Zea mays* L.) in Mexico is deficient despite producing 27 million tons, in the last four years the production of corn in Sonora has increased, producing from 544 to 680 thousand tons in 2018 and 2021 respectively, 97% of the production corresponds to white corn, 3% to yellow corn; however, in colored maize there are no planting records. The objective of this research was to estimate grain yield and its agronomic components in improved purple maize hybrids in southern Sonora. A randomized complete block experimental design was used with three repetitions with the AMMI model, the plots were two rows four meters long with a population density of 100,000 plants per hectare, the variables were: grain yield, seed weight, thousand grains, ear length, grains per row, rows per ear and test weight. The results showed statistical significance between hybrids, years and their interaction in all the variables. The AMMI model was useful to understand the existing genotype-environment interaction between hybrids of mode color in grain yield. The AMMI

#### Forma de citar el artículo (Formato APA):

Rodríguez-Pérez, G., García-Ramírez, A., Reynaga-Franco, F., Mendivil-Mendoza, J., Ochoa, A., Cervantes-Ortiz, F., Andrio, E. (2023). Rendimiento y componentes agronomicos en híbridos de maíz morado (*Zea mays* L.) usando el modelo AMMI. *Anales Científicos*. 84(1), 54-67. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v84i1.1681>

Autor de correspondencia (\*): Rodríguez-Pérez Email: [gilberto rp@vyaqui.tecnm](mailto:gilberto rp@vyaqui.tecnm)

© Los autores. Publicado por la Universidad Nacional Agraria La Molina.

This is an open access article under the CC BY.

allowed hybrids 10, 1, 17, 4 and 2 to be identified as more stable in RG, GH, HM and LM for the year 2020. On the other hand, hybrids 9, 12, 3 and 13 in 2019; however, those with the greatest interaction were 7, 16 and 4 presented performances below the general average; hybrids 16, 10, 14 and 19 obtained higher yield, as well as higher PMG, PH GH, and LM. There was a correlation between grain yield with PMG, PH, LM, GH and HM; in PMG there was more association with PH, GH and HM.

**Key words:** maize | grain yield | hybrids | stability and adaptability | biplot

## RESUMEN

La producción de maíz (*Zea mays L.*) en México es deficitaria a pesar de producir 27 millones de toneladas, en los últimos cuatro años se ha incrementado la producción de maíz en Sonora, produciendo de 544 a 680 mil toneladas en 2018 y 2021 respectivamente, el 97% de la producción corresponde a maíces de color blanco, 3% a maíces amarillos; sin embargo, en maíces de color no hay registros de siembras. El objetivo de esta investigación fue estimar el rendimiento de grano y sus componentes agronómicos en híbridos mejorados de maíz morado en el sur de Sonora. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones con el modelo AMMI, las parcelas fueron de dos surcos en cuatro metros de longitud con una densidad de población de 100,000 plantas por hectárea, las variables fueron: rendimiento de grano, peso de mil granos, longitud de mazorca, granos por hilera, hileras por mazorca y peso hectolitrico. Los resultados mostraron significancia estadística entre híbridos, años y su interacción en todas las variables, el modelo AMMI fue útil para comprender la interacción genotipo-ambiente existente entre los híbridos de color modado en el rendimiento de grano. El AMMI, permitió identificar los híbridos 10, 1, 17, 4 y 2 como más estables en RG, GH, HM y LM para el año 2020, Por otra parte, los híbridos 9, 12, 3 y 13 en 2019; sin embargo, los de mayor interacción fueron 7, 16 y 4 presentaron rendimientos inferiores a la media general; los híbridos 16, 10, 14 y 19 obtuvieron mayor rendimiento, así como mayor PMG, PH GH, y LM. Existió correlación entre el rendimiento de grano con PMG, PH, LM, GH Y HM; en PMG hubo más asociación con PH, GH E HM.

**Palabras clave:** maíz | rendimiento de grano | híbridos | estabilidad y adaptabilidad | biplot

## 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en el sur de Sonora ha incrementado sustancialmente la superficie sembrada en los últimos cuatro años de 48,967 a 785,860 hectáreas, produciendo 544 a 680 mil toneladas en 2018 y 2021 respectivamente, el 97% de la producción corresponde a maíces de color blanco, el 3% a maíz amarillo; donde lo producen productores que cuentan con tecnologías adecuadas y recursos económicos en la conducción de su cultivo, se utilizan híbridos

mejorados de empresas transnacionales con buena estabilidad de rendimiento (Vázquez et al., 2020); sin embargo, no existen registros de siembras comerciales de maíces pigmentados como los de color morado, solo de forma experimental, estos materiales son una alternativa por sus rendimientos y propiedades antioxidantes que contienen los maíces pigmentados, surge la importancia de promover siembras y realizar innovaciones agrícolas en el manejo agronómico del maíz morado que puedan contribuir con buena productividad en el mercado local

y nacional, además de las condiciones edafoclimáticas que se presentan en el sur de Sonora son idóneas, lo cual es un indicador importante para introducir materiales competitivos en rendimiento, estabilidad y precio para incrementar significativamente la producción de grano en maíces (Acevedo et al., 2019).

El rendimiento de grano es la característica más importante para considerar cuando se realizan evaluaciones con maíz en diferentes años, ya que los efectos ambientales (E) cuentan con el mayor porcentaje de la suma de cuadrados sobre los genotipos (G) y la interacción genotipo-ambiente (GE) (López-Morales et al., 2019). La interacción GE es el comportamiento relativo diferencial que muestran los genotipos al evaluarse en diferentes ambientes (Ponce et al., 2022; Gómez et al., 2018).

Por lo anterior, cuando los fitomejoradores buscan genotipos con rendimientos mayores para diferentes localidades o condiciones ambientales enfrentan desafíos como la estabilidad y adaptabilidad (Fayeun et al., 2018). La estabilidad es la capacidad del genotipo de comportarse consistentemente con altos o bajos niveles de rendimiento a través de ambientes y la adaptabilidad es la capacidad del genotipo en manifestar un desempeño óptimo en diversas condiciones ambientales (Neisse et al., 2018). Eberhart y Russell (1966) señalaron que la estabilidad es una característica genética y que los genotipos con amplia adaptabilidad poseen una baja interacción GE; por ello, es importante determinar la estabilidad y la adaptabilidad para la selección y recomendación de genotipos de maíz en ambientes específicos (Gómez et al., 2018).

El modelo de análisis multivariado (AMMI) ha mostrado ser efectivo en el análisis de ensayos multirregionales, por capturar una gran proporción de la suma de cuadrados de la

IG\*A, separando en forma precisa los efectos principales de aquellos correspondientes a la interacción (Gauch, 2006). El modelo integra el análisis de varianza (ANDEVA) y el Análisis de Componentes Principales (ACP) como lo mencionaron Martínez et al. (2018). La mayoría de los trabajos con AMMI han enfatizado la producción de grano en diversos cultivos y muy pocos han evaluado la producción de biomasa. Resultados que consideren cortes múltiples no se han registrado. El análisis segmentado de la información en el estudio de la IG\*A se ha realizado en trabajos anteriores como el de Eberhart y Russell (1966) quienes utilizaron los parámetros de estabilidad de para analizar la producción de grano. Ellos separaron los ambientes con base en sus índices (sitios de alto rendimiento y sitios de bajo rendimiento) y realizaron el análisis correspondiente para cada grupo de sitios. Además, ellos propusieron una nueva clasificación de los genotipos. El objetivo de esta investigación fue estimar el rendimiento de grano y sus componentes agronómicos en híbridos mejorados de maíz morado en el sur de Sonora.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental y material genético

En los experimentos se utilizaron 20 híbridos de maíz mejorados de color morado proporcionadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, CIMMYT (Tabla 1).

Los ensayos fueron establecidos a través de tres años de evaluación en el campo experimental del Tecnológico Nacional de México-Valle del Yaqui en Ciudad Obregón, Sonora, México, situado al sur del estado de Sonora, entre la Sierra Madre Occidental, y el Golfo de California, entre 27,41367 latitud y -100,13194 longitud a una altura de 13 msnm. El clima predominante es BW (h), muy cálido extremoso, la temperatura media

**Tabla 1.** Material genético utilizado en la evaluación a través de tres años en el sur de Sonora, México.

Híbrido	Genealogía	Híbrido	Genealogía
1	GD20B-BLST002TC-1341/1345	11	GD20B-BLST002TC-1349/1351
2	GD20B-BLST006TC-1031/1029	12	GD20B-BLST003TC-1413/1417
3	GD20B-BLST011TC-1539/1543	13	GD20B-BLST006TC-1055/1051
4	GD20B-BLST011TC-1559/1557	14	GD20B-BLSTA3WTC-1593/1597
5	GD20B-BLST002TC-1325/1323	15	GD20B-BLST007TC-1147/1143
6	GD20B-BLSTA3WTC-1587/1591	16	GD20B-BLST007TC-1139/1137
7	GD20B-BLSTA3WTC-1581/1585	17	GD20B-BLST003TC-1397/1395
8	GD20B-BLST008TC-1273/1269	18	GD20B-BLST008TC-1255/1257
9	GD20B-BLST007TC-1163/1165	19	GD20B-BLSTA3WTC-1577/1575
10	GD20B-BLST002TC-1333/1329	20	GD20B-BLST008TC-1265/1263

anual es de 24 °C y la media máxima es de 31 °C; de julio a agosto la máxima es de 48 °C y en enero la mínima es de 16 °C con una precipitación promedio de 450 mm anuales, los suelos cultivables son franco, el 21.96% de arcilla, 46.04% de arena, 32.00% de limo y 0.86% de materia orgánica (García,1973).

### Diseño experimental y manejo agronómico

Se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; la unidad experimental estuvo compuesta por dos surcos de 4 m de longitud, utilizando arreglos espaciales de 0,80 m de separación entre surcos y 12,5 cm distancia entre plantas; los experimentos fueron diseñados para colocar dos semillas por punto de siembra.

Las siembras se realizaron en noviembre, diciembre, enero del 2019, 2020 y 2021, respectivamente. En cada evento se aplicó la fórmula de fertilización 200 N, 90 P, 00 K, en dos etapas: el 50% de N y el total de P en el momento de sembrar, y el resto en el momento de la escarda a los 30 días después de la siembra. El riego que se aplicó fue de gravedad y se regó procurando que no faltara humedad en el suelo, el control de maleza fue manual con presencia de quelite cenizo y verdolaga; se dieron dos deshierbes antes de la escarda y tres después del aporcado del cultivo.

Posteriormente, se realizó un raleo transcurridos 30 días después de la siembra del experimento, dejando sólo una planta por punto de siembra, previendo una población final de 100,000 plantas por hectárea, aproximadamente.

### Variables agronómicas registradas

Para determinar el efecto de la interacción genotipo ambiente y el potencial productivo en los híbridos estudiados, se utilizó el rendimiento de grano (RG), ajustado a 15% de humedad, granos por hilera (GH), hileras por mazorca (HM), peso de mil granos (PMG), longitud de mazorca (LM) y peso hectolitrico (PH). Los ensayos fueron establecidos y cosechados en forma manual y el manejo agronómico se realizó conforme a las recomendaciones técnicas establecidas para el cultivo por el INIFAP en cada ambiente de prueba.

### El análisis estadístico

Se realizó mediante un ANDEVA individual y combinado para la media de cada unidad experimental, utilizando el procedimiento GLM del SAS, versión 9,4. El ANDEVA combinado se efectuó conforme al modelo  $Y_{ijkl} = \mu + t_i + R_j(l) + \beta_k(jl) + \lambda_l + \tau_{il} + \epsilon_{ijkl}$ , donde:  $Y_{ijkl}$  representó la observación obtenida en el genotipo  $i$ , evaluado en la repetición  $j$ , dentro de cada año de prueba  $l$ , en el bloque  $k$ ;  $\mu$  fue la media general;  $t_i$  fue

el efecto fijo del genotipo;  $R_j(1)$  fue el efecto aleatorio de la repetición dentro de cada año;  $\beta_k(jl)$  fue el efecto aleatorio del bloque dentro de la repetición y año;  $\lambda_l$  fue el efecto aleatorio por año;  $\tau_{lil}$  fue el efecto aleatorio de la interacción entre el genotipo y año;  $\epsilon_{ijkl}$  es el error asociado a la observación  $Y_{ijkl}$ , conforme a Steel y Torrie (1988).

Una vez detectada la presencia de la interacción genotipo ambiente, se procedió a realizar el análisis multivariado, para obtener los valores singulares de los primeros términos AMMI significativos para los genotipos y ambientes, basados en los procedimientos establecidos por Vargas y Crossa (2000), utilizando sólo las medias ajustadas, por lo cual fue necesario proporcionar al programa la información correspondiente al valor del estimador del error combinado, los grados de libertad de dicho error y el número de repeticiones, de acuerdo al siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + a_j + \sum_{k=1}^n \lambda_k Y_{ik} a_{jk} + \epsilon_{ij}$$

donde  $Y_{ij}$  representó la media del genotipo  $i$  en el ambiente (año)  $j$ ;  $\mu$  fue la media general;  $g_i$  y  $a_j$  fueron los efectos del genotipo y el ambiente, respectivamente;  $n$  fue el número de componentes principales (CP) retenidos en el modelo;  $k$  fue el valor singular para cada CP;  $ik$  fueron valores de los vectores de los genotipos para cada CP;  $jk$  fueron los valores de los vectores de los ambientes para cada CP;  $ij$  fue el residual de la IGA;  $\epsilon_{ij}$  fue el error experimental medio. Para cada genotipo y ambiente (año) fueron obtenidos los valores genotípicos y ambientales por medio del procedimiento PROC GML del SAS.

La significancia de cada CP fue medida mediante una prueba de F al nivel 0,05 de probabilidad, comparando el cuadrado medio de cada CP, con el cuadrado medio

del error experimental, conforme a Crossa et al. (1990). El número de ejes posibles (CP) que el modelo puede retener en AMMI es el mínimo (G-1; E-1); los ejes que resultaron no significativos se incluyeron en el residual y los valores del CP1 y el rendimiento medio de genotipos/ambientes fueron utilizados para construir el gráfico de doble representación biplot del modelo AMMI (García et al., 2020).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

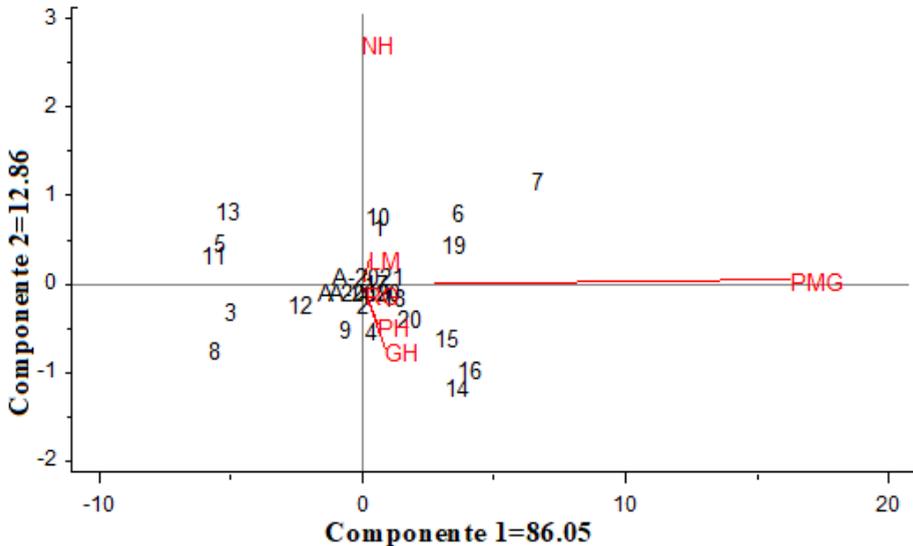
La Tabla 2 evidenció diferencias estadísticas ( $P \leq 0,01$ ) en todas las variables de estudio en años, híbridos, la interacción años\*híbridos (IGA), de acuerdo con el modelo de efectos principales aditivos y de interacción multiplicativa (AMMI), realizado con la rutina desarrollada por Vargas y Crossa (2000), se observa que años, híbridos y A\*H en la variable PMG obtuvo valores superiores en los cuadrados medios, seguido de AM y GH. Estos valores que mostraron los híbridos de maíz en los años manifestaron amplia diferencia genética bajo las condiciones ambientales que se dieron a través de años (López-Morales et al., 2019; Ponce et al., 2022 y García-Mendoza et al., 2021).

El análisis AMMI explicó el 98.91% de la IGA en ambos componentes (Figura 1) entre rendimiento de grano y sus componentes a través de tres años de evaluación; en tanto que los híbridos 10, 1, 17, 4 y 2 fueron más estables en RG, GH, HM y LM para los años 2020 y 2021. En estas variables, solo el primer componente principal resultó altamente significativo, sugiriendo que las interacciones de los híbridos con los años fueron más complejas, debido probablemente a diferencias en precocidad de los maíces estudiados y que sin duda influyó en el coeficiente de variación reportado en dicha variable (Martínez et al.,

**Tabla 2.** Cuadrados medios y significancia del AMMI para rendimiento de grano y sus caracteres agronómicos para 20 híbridos de maíz morado evaluados en tres años del sur de Sonora, México.

FV	GL	RG (t ha <sup>-1</sup> )	PMG (g)	LM (cm)	GH	HM	PH (kg hL <sup>-1</sup> )
Repetición	2	0.76	2.22	0.22	1.36	0.75	1.10
Años	2	19.48**	1064.15**	41.34**	582.91**	88.94**	96.08**
Híbridos	19	7.67**	33304.78**	17.46**	146.23**	44.18**	76.51**
A*H	38	0.20**	57.71**	0.90**	0.77**	2.19**	0.39**
CP-1	20	0.32*	107.72**	0.94*	1.26*	3.35**	0.69*
CP-2	18	0.07*	2.13**	0.84**	0.23**	0.91**	0.06*
Residual	120	0.21	70.16	1.73	8.70	4.15	0.90
CV (%)		8.16	10.35	15.24	7.28	10.21	6.36

\*, \*\*Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente. FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, RG: rendimiento de grano, PMG: peso de mil granos, LM=longitud de mazorca, GH=granos por hilera, HM=hileras por mazorca, PH: peso hectolitrico.



**Figura 1.** Interacción genotipo ambiente para rendimiento de grano y sus componentes en híbridos de maíz morado evaluados en el sur de Sonora, México.

2018). Por otra parte, los híbridos 9, 12, 3 y 13 en 2019 fueron estables, pero presentaron valores negativos; sin embargo, los de mayor interacción fueron 7, 16 y 4 por estar mas alejados al centro de origen y tuvieron rendimientos inferiores a la media general (6,5 t ha<sup>-1</sup>), estos resultados coinciden por lo reportado de Lozano et al. (2015).

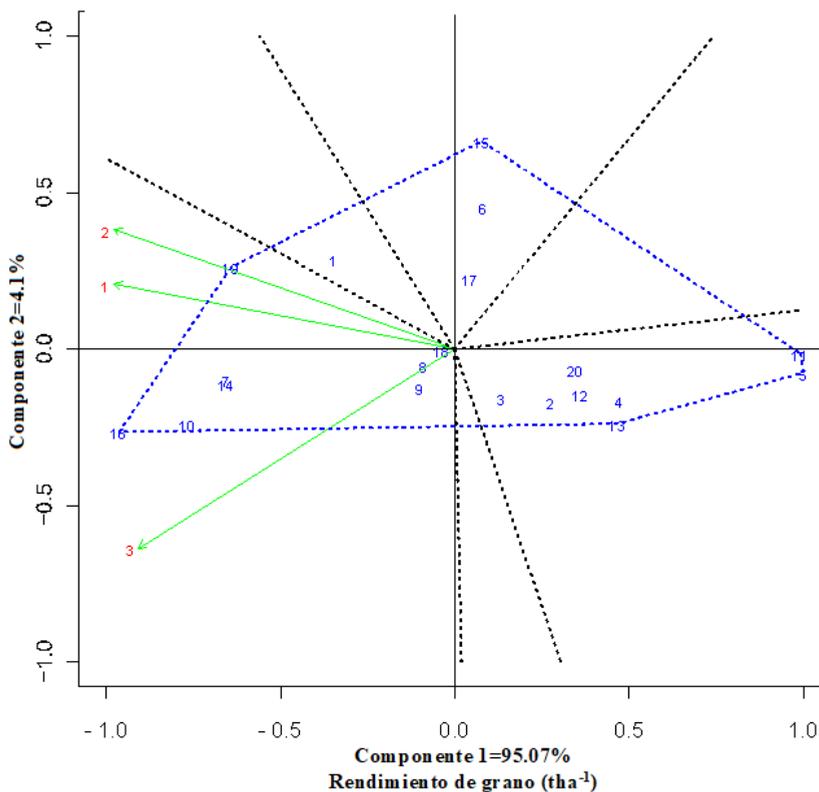
**Análisis de regresión en rendimiento de grano**

La Figura 2 muestra el gráfico para rendimiento de grano cuyos dos componentes explicaron el 99.17% de la variación total en la IGA. Al trazar un polígono entre los híbridos más alejados del origen y líneas perpendiculares que van del origen a cada

lado del polígono, los híbridos y ambientes con respuesta similar se agruparon y se pudieron identificar a los híbridos 16, 10, 14, 7 y 19 donde sus rendimientos fueron superiores a la media general ( $6,58 \text{ t ha}^{-1}$ ), en el 2020 por más de  $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ ; mientras que los híbridos 5 y 11 estuvieron lejos del vector, por lo tanto, sus rendimientos fueron menores a la media general, obteniendo rendimientos promedios de  $4,90$  y  $4,91 \text{ t ha}^{-1}$  respectivamente (Vázquez-Carrillo et al., 2018). Respecto a los ambientes (años), es sabido que en ambientes con vectores largos discriminan mejor entre genotipos; en ese sentido, si queremos saber cómo se adapta un híbrido en los tres años, podemos rastrear una línea imaginaria desde el origen hasta el híbrido 13, 10 y 16 y observamos que en 2020 fue el ambiente donde los híbridos

tuvieron mejor rendimiento donde los híbridos 17, 15 y 3 presentaron rendimientos por debajo de la media general, obteniendo  $6,50$ ,  $6,43$ , y  $6,36 \text{ t ha}^{-1}$  respectivamente. En esta investigación se ubicaron a los híbridos con un alto rendimiento en los vértices que formaron un polígono en los tres años de evaluación que estuvieron fuera del polígono y permitieron la discriminación entre híbridos (Yan et al., 2016).

Este tipo de estabilidad clasificada resulta útil en la agricultura, dado que los productores demandan cultivares que muestren comportamiento consistente a través de evaluación en diferentes ambientes, pero que al mismo tiempo respondan favorablemente, lo que significa que, cultivares que presenten el mejor desempeño bajo cualquier condición



**Figura 2.** Biplot de SREG con los dos primeros componentes del rendimiento de grano ( $\text{t ha}^{-1}$ ) en híbridos morados en el Sur de Sonora, México.

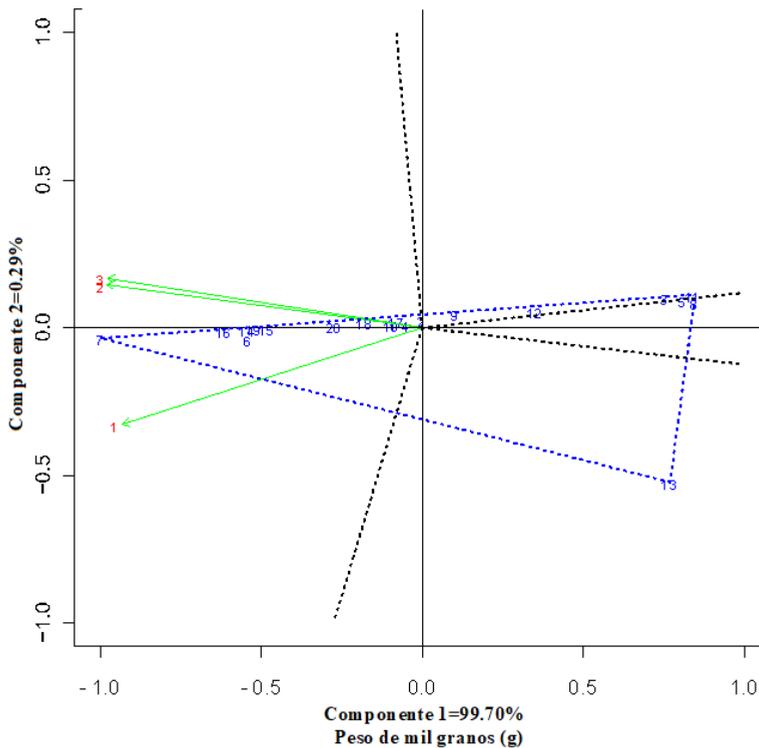
ambiental, son los más deseables (Acevedo et al., 2019).

### Peso de mil granos

En la Figura 3 se muestra el biplot generado por el análisis SREG para peso de mil granos, donde los componentes explicaron el 99,99% de la variación total en la IGA indicando que los híbridos de mayor peso se encontraron en 7, 16, 14, 6, 19 y 15 por arriba de la media general en el 2020 que apporto mayor contribución con la IGA, pudiendo considerarse como un ambiente idóneo con mucha capacidad en la estabilidad de estos híbridos (García et al., 2020).

Estos resultados indican que el peso de mil granos es el comportamiento directo de mayor importancia en la selección

indirecta del rendimiento para seleccionar genotipos. Por otra parte, los híbridos 8, 11, 5 y 13 obtuvieron pesos inferiores y se concentraron en los vectores más alejados presentando mayor interacción. Salinas et al. (2010) reportaron que los granos grandes tienen un peso mayor a 380 g, los medianos entre 330 y 379 g, en tanto que los pequeños presentan valores menores a 330 g. Con base en esa clasificación sólo el híbrido 7 presentó granos grandes (399,78 g), los híbridos 16, 14, 6, 19 y 15 fueron de tamaño mediano, mientras que el resto tuvo granos de tamaño pequeño. Se observó que en 2020 se obtuvieron granos más pesados que en 2019 y 2021; esto pudo ser consecuencia por la fecha de siembra realizada a mediados de noviembre, lo que influyó positivamente durante el periodo de llenado de grano.



**Figura 3.** Biplot de SREG con los dos primeros componentes de peso de mil granos (g) en híbridos morados en el Sur de Sonora, México.

Vázquez-Carrillo et al. (2018) observaron resultados similares respecto al efecto positivo de la fecha de siembra en el llenado en el grano y su efecto en el peso.

**Peso hectolítrico**

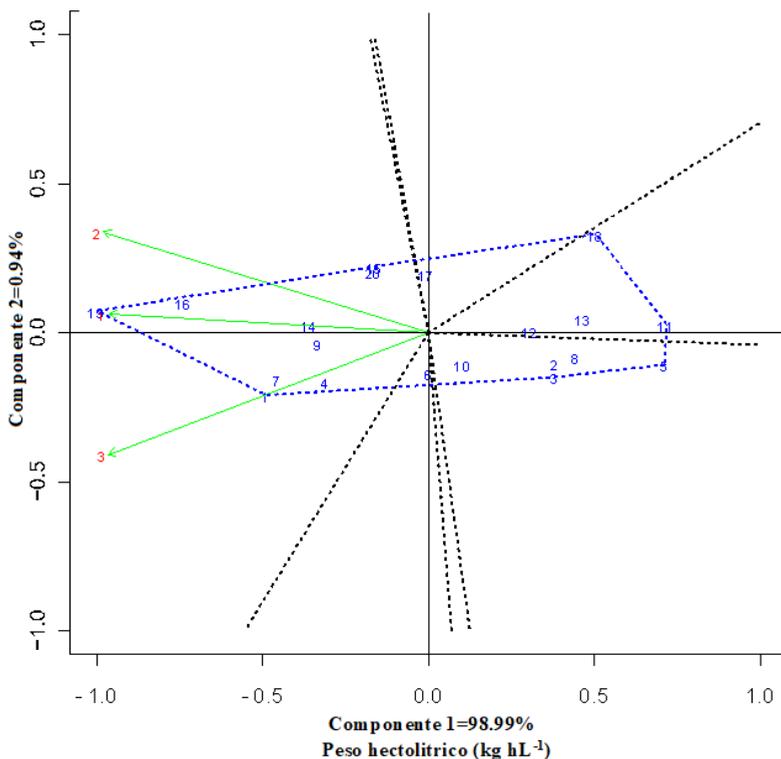
Los híbridos que presentaron peso hectolítrico (Figura 4), favorables fueron 19, 16, 1 y 7 tuvieron promedios superiores a la media general con 83,70, 82,13, 80,63 y 80,44 Kg hL<sup>-1</sup> respectivamente considerándose con mayor estabilidad, mientras que los híbridos 11 (73,38), 5 (73,41), 18 (74,16) y 13 (74,89) obtuvieron valores inferiores a la media general (77,69 kg hL<sup>-1</sup>).

El 90% de los híbridos tuvieron un PH $\geq$ 74 kg hL<sup>-1</sup>, el cuál es un indicador de la dureza del grano entre los híbridos evaluados. Este

valor indica que los híbridos son más duros que los híbridos 11, 5, 18 y 13 cuyos valores fueron inferiores a 74 kg hL<sup>-1</sup> por lo que pueden destinarse a elaborar cereales tener un peso hectolítrico menor a 74 kg hL<sup>-1</sup>; por lo tanto, el grano de estos híbridos analizados en este trabajo, podrían ser una opción para la elaboración de cereales Vázquez-Carrillo et al. (2018).

**Granos por hilera e hileras por mazorca**

Los híbridos 19, 16, 7, 1 y 4 tuvieron el mayor número de granos por hilera e hileras por mazorca, no así los híbridos 5 y 11, el cual presentaron valores inferiores (Figura 5). Estos resultados indican que los híbridos fueron altamente afectados por la IGA en el 2021. Ponce et al. (2022) reportaron que los híbridos más sobresalientes por



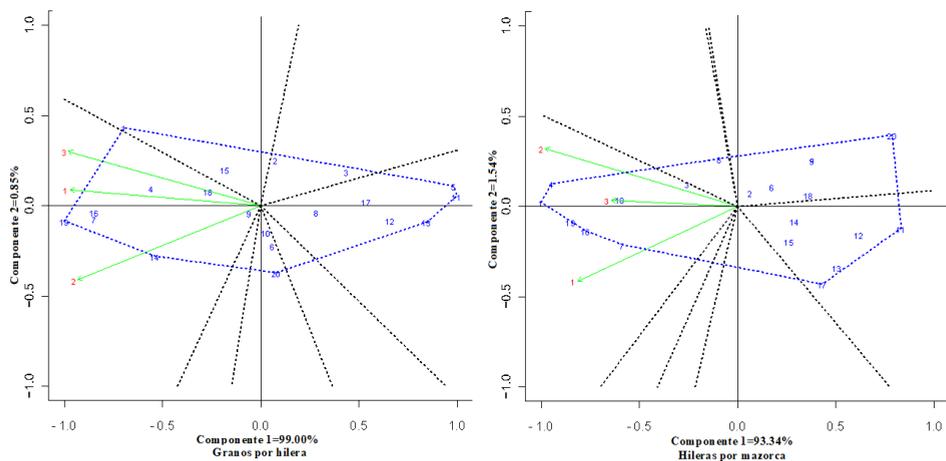
**Figura 4.** Biplot de SREG con los dos primeros componentes en peso de hectolítrico (kg hL<sup>-1</sup>) en híbridos morados en el Sur de Sonora, México.

su amplia estabilidad y adaptabilidad en la interacción genotipo-ambiente son los más idóneos a considerarse dentro de un programa de mejoramiento. El bajo número de granos e hileras por mazorca limita su aprovechamiento productivo en los maíces de color; por el contrario, aquellos genotipos de maíces con mayor número de granos e hileras que se obtengan permitirán ofrecer a los agricultores genotipos más sobresalientes en rendimiento y calidad para el proceso industrial nixtamalizada (López et al., 2019). En granos por hilera e hileras por mazorca se observó una tendencia clara entre los híbridos de maíz ya que el 45% de estos tuvieron valores superiores a la media general (36 y 12) respectivamente.

### Longitud de mazorca

En cuanto longitud de mazorca (Figura 6), se pudieron identificar aquellos que se adaptaron mejor como fueron los híbridos 19, 7, 18, 16 y 17 estuvieron cerca de la dirección del vector por lo que sus longitudes fueron superiores a la media general (15,2 cm) en el 2020; mientras que los híbridos 5, 11, 4, 9 y 13 estuvieron lejos del vector, por lo tanto, sus longitudes fueron inferiores a la media

general, obteniendo promedios por debajo de los 13 cm presentando interacciones negativas con el primer componente, lo que se espera menor producción de la expresada como promedio. Estos resultados indican que los híbridos de baja longitud fueron altamente afectados por la IGA en los años 2019 y 2021. Yan et al. (2016) reportaron que la fecha de siembra y las condiciones climáticas presentes durante el ciclo del cultivo son factores que influyeron negativamente en la producción de grano y otros caracteres agronómicos como: peso de mil granos, peso hectolitrico, longitud de mazorca, granos por hileras e hileras por mazorca como fue en esta investigación donde las siembras realizadas en el 2019 y 2021 afectaron estas variables por sus valores inferiores y consecuentemente limita su aprovechamiento agronómico; por el contrario, en los híbridos que se obtuvieron mayores longitudes y fueron más estables pueden ser viables en el procesamiento industrial y agronómico que les permitirá ofrecer a los agricultores híbridos con potencial para las condiciones climáticas del sur de Sonora (Acevedo et al., 2019).



**Figura 5.** Biplot de SREG con los dos primeros componentes de granos por hileras e hileras por mazorca en híbridos morados en el Sur de Sonora, México.

**Correlación entre rendimiento de grano y sus componentes agronómicos**

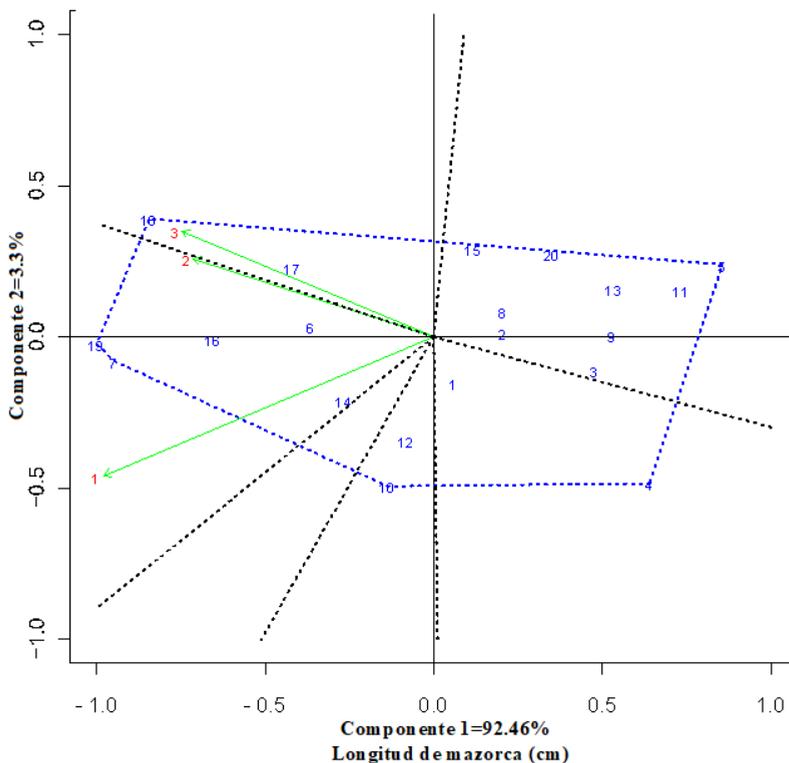
En la Tabla 3 se observa que existió correlación entre el rendimiento de grano con PMG, PH, LM, GH Y HM; en PMG hubo más asociación con PH, GH E HM; sin embargo, al considerar PH denotó correlación mediana con LM y HM, en la variable HM se asoció más con LM y GH. Por otra parte, PMG y PH indican la densidad y/o el grado de llenado que tuvo el grano durante el desarrollo del cultivo. Normalmente, cuando el grano no está completamente lleno, los valores de PMG y PH son bajos provocan rendimientos inferiores. Cabe señalar que las condiciones climáticas favorecieron el llenado de grano, contribuyendo a mayores promedios en las propiedades químicas (Aguilar-Hernández et al., 2019).

**Tabla 3.** Correlación entre rendimiento de grano y sus componentes agronómicos en maíces de color morado evaluados el sur de Sonora, México.

	PMG	PH	LM	GH	HM
RG	0.85*	0.94*	0.84*	0.82*	0.83*
PMG		0.93*	0.77*	0.80	0.84*
PH			0.74*	0.67*	0.79*
HM			0.83*	0.74*	0.80*
LM				0.87*	0.89*
GH					0.93*

**4. CONCLUSIONES**

El modelo de análisis multivariado fue útil para comprender la interacción genotipo-ambiente existente entre los híbridos de color modado en el rendimiento de grano, sus componentes agronómicos y la



**Figura 6.** Biplot de SREG con los dos primeros componentes de longitud de mazorca en híbridos morados en el Sur de Sonora, México.

discriminación. La aplicación de SREG (sitios de regresión) fue altamente efectiva comparado con AMMI, permitiendo la identificación de los híbridos 10, 1, 17, 4 y 2 fueron más estables en RG, GH, HM y LM para el año 2020, por otra parte, los híbridos 9, 12, 3 y 13 en 2019; sin embargo, los de mayor interacción fueron 7, 16 y 4 por estar más alejados al centro de origen y tuvieron rendimientos inferiores a la media general; los híbridos 16, 10, 14 y 19 obtuvieron mejores rendimientos así como mayor PMG, PH GH, y LM. Existió correlación entre el rendimiento de grano con PMG, PH, LM, GH Y HM; en PMG hubo más asociación con PH, GH E HM.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Internacional de Maíz y Trigo (CIMMYT) por haber proporcionado el material genético de maíces morados para su evaluación en tres años.

#### Conflictos de intereses

Los autores firmantes de la presente investigación declaran no tener ningún potencial conflicto de interés personal o económico con otras personas, instituciones u organizaciones que puedan influir indebidamente con el presente manuscrito.

#### Contribución de autores

Gilberto Rodríguez-Pérez: titular, concepción y desarrollo de la investigación. Gilberto Rodríguez-Pérez, Alejandro García-Ramírez, Felipe de Jesús Reynaga-Franco, Jaime Edzael Mendivil-Mendoza: establecimiento del experimento, desarrollo y generación de datos.

Gilberto Rodríguez-Pérez, Alba Roció Ochoa-Meza, Francisco Cervantes-Ortiz y Enrique Andrio Enriquez: redacción e interpretación de resultados.

Gilberto Rodríguez-Pérez, Alejandro García-Ramírez: Revisión y aprobación final del artículo

#### 5. REFERENCIAS

- Acevedo, B.M., Álvarez, R., Silva, O., Torres, E. (2019). Interacción genotipo ambiente en arroz para identificar mega-ambientes y ambientes ideales mediante el modelo de regresión por sitios y biplot. *Bioagro* 31(1): 35-44. *Bioagro* 33(2): 67-78. 2021. doi: <http://www.doi.org/10.51372/bioagro332.1>.
- Crossa, J., Gauch, H., Zobel, R. (1990). Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Sci.* 30: 493-500. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X03000030003xCitations:159>.
- Eberhart, S.A., and Russel, W.A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6(1):36-40. Doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x.
- Fayeun, L.S., Alake, C.G., Akinlolu, O.A. (2018). GGE biplot analysis of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) landraces evaluated for marketable leaf yield in Southwest Nigeria. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 17(4):416-423. Doi.org/10.1016/j.jssas.2016.10.001.
- García, M.P.J., Pérez, C.A.A., Silva, D.R.J., Álvarez, P.R.M., Monasterio, P.P., Taramona, R.L.A. (2020). Evaluación del potencial agronómico de híbridos de maíz amarillo basado en el análisis GGE Biplot y el modelo AMMI. *Bioagro* 32(2): 95-106. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047390006>.
- García-Mendoza, P.J., Pérez-Almeida, I.B., Prieto-Rosales, G.P., Medina-Castro, D.E., Manayay-Sánchez, D., Marín-Rodríguez, C.A., Ricse-Nestares, J.C., Ortecho-Llanos, R., Medina-Hoyos, A.E.

- (2021). Interacción genotipo ambiente y potencial productivo de 25 variedades de maíz amiláceo en la provincia de Tayacaja, Perú. *Revista Bioagro* 33(2): 67-78. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3070>.
- García, E. (1973). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. [http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020081042/1020081042\\_011.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020081042/1020081042_011.pdf). (Noviembre, 2021).
  - Gauch, H.G. (2006). Statistical Analysis of Yield Trials by AMMI and GGE. *Crop Science*, 46: 1488-1500. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0193>
  - Gauch, H.G., Zobel, R.W. (1996). AMMI analysis of yield trials. In: M.S. Kang y H. G. Gauch. (eds.). Genotype-by-Environment interaction. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. pp. 85-122. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420049374.ch4>.
  - Gómez, M.Y., Boicet, F.T., Tornés, O.N., Meriño, H.Y. (2018). Interacción genotipo ambiente de cuatro variedades de tomate en la provincia Granma. *Rev. Centro Agrícola*. 45(2):21-28.
  - López, M.F., Chura, C.J., García, P.G. (2019). Interacción genotipo por ambiente del rendimiento de maíz amarillo en híbridos trilineales, Perú. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10(4):859-872. Doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1696.
  - Lozano, R.Á., Santacruz, V.A., San-Vicente, G.F., Crossa, J., Burgueño, J., Molina, G.J.D. (2015). Modelación de la interacción genotipo ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Rev. Fitotec. Mex.* 38(4):337-347. Doi.org/10.35196/rfm.2015.4.337.
  - Martínez, G.A., Zamudio, G.B., Tadeo, R.M., Espinosa, C.A., Cardoso, G.J., Vázquez, C.G., Turrent, F.A. (2018). Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de valles Altos de México. *Rev. Mex. de Cienc. Agríc.* 7(9):1447-1458. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>.
  - Neisse, A.C., Kirch, L.J., Hongyu, K. (2018). AMMI and GGE biplot for genotype x environment interaction: a medoid-based hierarchical cluster analysis approach for high dimensional data. *Biometrical Letters*. 55(2):97-121. Doi.org/10.2478/bile-2018-0008.
  - Ponce-Encinas, M.C., Chura-Chuquija, J., Hernández-Leal, E., Hernández-Salinas, G., Aragón-García, A. (2022). Interacción genotipo-ambiente del rendimiento en híbridos de maíz amarillo mediante AMMI y SREG. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(7): 1247-1258. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3070>.
  - SAS Institute. (2012). User's Guide of SAS. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 550 p.
  - SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2022) Avance de siembras y cosechas. Resumen nacional por estado. [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do) (Consultado Mayo, 2022).
  - Salinas, M.Y., Gómez, M., Cervantes, J.M., Sierra, M.M., Palafox, A.C., Betanzos M.E., Coutiño, E.B. (2010). Calidad nixtamalera y tortillera en maíces del trópico húmedo y sub-húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:509-523. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263120639005>.
  - Steel, R., Torrie, J. (1988).

- Bioestadística: Principios y Procedimientos. McGraw-Hill / Interamericana, México. Doi: <https://arveja.awardspace.com>.
- Vázquez-Carrillo, M.G., Santiago-Ramos, D., Gaytán-Martínez, E., Morales-Sánchez, E., Guerrero-Herrera, M.J. (2018). High oil content maize: Physical, thermal and rheological properties of grain, masa, and tortillas. *LWT-Food Science and Technology* 60:156-161. DOI:10.1016/j.lwt.2014.07.043.
  - Vázquez, C.G., Martínez, G.A., Zamudio, G.B., Espinosa, C.A., Tadeo, R.M., Turrent, F.A. (2020). Estabilidad de rendimiento y características fisicoquímicas de grano de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8(11):1803-1814. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1990>.
  - Vargas, H.M., Crossa, J. (2000). El análisis AMMI y la gráfica del biplot en SAS. Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) y Unidad de Biometría y Estadística, CIMMYT. México, DF. 42 p. [https://repositorio.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/3489/23\\_73248.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/3489/23_73248.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (consulta de mayo, 2022).
  - Yan, W., Frégeau, R.J., Pageau, D., Martin, R. (2016). Genotype-by-environment interaction and trait associations in two genetic populations of oat. *Crop Sci.* 56(3):1136-1145. Doi.org/10.2135/cropsci2015.11.0678.
  - Zobel, R.W., Wright, M.J., y Gauch, H.G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80: 388-393. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>.