





## Estabilidad del rendimiento en maíz morado de Perú utilizando los modelos de Eberhart-Russell y Lin-Binns

Víctor Vásquez-Arce<sup>1\*</sup> , Alicia Medina-Hoyos<sup>2</sup> , Héctor A. Cabrera -Hoyos<sup>2</sup> ,  
Luis Jiménez-Díaz<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigación Agraria, Estación Experimental Agraria Baños del Inca, Perú. <sup>3</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. \* Correo electrónico: [vvarce1@yahoo.es](mailto:vvarce1@yahoo.es)

### RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue identificar genotipos de maíz morado que presenten estabilidad de rendimiento de grano utilizando los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell y el modelo de Lin-Binns, así como definir el modelo que mejor describa la interacción genotipo ambiente. Los ensayos fueron conducidos en la provincia de San Marcos, departamento de Cajamarca, Perú durante los periodos de 2017, 2018 y 2019. Se evaluaron cinco genotipos de maíz morado provenientes de la Estación Experimental Baños del Inca, Cajamarca y de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca: 'INIA 601', 'UNC 47', 'MMorado', 'INIA 615' y 'Canteño'. Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, la unidad experimental consistió de cuatro surcos de 5,50 m de largo, separados a 0,80 m, de los cuales se cosecharon los dos surcos centrales, semejante a 8,8 m<sup>2</sup>. El análisis de varianza combinado reveló diferencias altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre años, localidades, genotipos e interacciones de segundo y tercer orden. Los modelos de Eberhart y Russel (1966) y Lin y Binns (1988) identificaron a los genotipos INIA 601 y UNC 47 como los de adaptación a ambientes favorables y desfavorable y con rendimientos de 4,05 y 4,03 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Palabras clave:** genotipo, adaptabilidad, interacción, *Zea mays* L.

---

## Yield stability in purple corn from Peru using the Eberhart-Russell and Lin-Binns models

### SUMMARY

The objective of the present study was to identify purple corn genotypes that show grain yield stability using the Eberhart and Russell stability parameters and the Lin-Binns model, as well as to define the model that best describes the genotype-environment interaction. The trials were conducted in the province of San Marcos, department of Cajamarca, Peru during the period of 2017, 2018 and 2019. Five genotypes of purple corn from the Baños del Inca Experimental Station, Cajamarca and the Faculty of Agrarian Sciences were evaluated. from the National University of Cajamarca: "INIA 601", "UNC 47", "MMorado", "INIA 615" and "Canteño". The experimental design of complete random blocks with four repetitions was used, the experimental unit consisted of four rows of 5.50 m long, separated at 0.80 m, from which the two central rows were harvested, similar to 8.8 m<sup>2</sup>. The combined analysis of variance revealed highly significant differences ( $p < 0.01$ ) between years, localities, genotypes, and second and third order interactions. The models of Eberhart and Russel (1966) and Lin and Binns (1988) identified the genotypes INIA 601 and UNC 47 as those of adaptation to favorable and unfavorable environments and with yields of 4.05 and 4.03 t.ha<sup>-1</sup>, respectively.

**Keywords:** genotype, adaptability, interaction, *Zea mays* L.

Recibido: 16/12/2020 - Aprobado: 29/09/2021

## INTRODUCCIÓN

En el Perú, el maíz (*Zea mays* L.) se siembra en 502.383 ha, de las cuales 240.000 ha corresponden al maíz amiláceo, 257.383 ha al maíz híbrido y solamente 5.000 ha son dedicadas al maíz morado; encontrándose la mayor producción en los departamentos de Cajamarca, Arequipa, Ica, Lima, Huánuco y Ayacucho con un promedio nacional de 3,9 t.ha<sup>-1</sup> (MINAGRI 2017, 2019). El maíz morado ha adquirido una especial importancia por sus propiedades nutricionales. Se utiliza como colorante en la industria de los alimentos y bebidas; así como por las propiedades medicinales de las antocianinas que actúan como antioxidantes, anticancerígeno y reductoras de triglicéridos y de colesterol (Pandey *et al.* 2010, Aguilera *et al.* 2011; García *et al.* 2012). El rendimiento es un carácter cuantitativo gobernado por muchos genes que está influenciado por las variaciones del medio ambiente (Vásquez 1988, Lozano-Ramírez *et al.* 2015, Ochoa-Cadavid *et al.* 2019). La interacción genotipo por medio ambiente (IGA) sucede cuando hay respuesta diferencial de los genotipos a través de años y ambientes variables. Esta interacción causa confusión en la estimación de los parámetros genéticos, reduce la respuesta a la selección y dificulta la elección de genotipos superiores (Vásquez *et al.* 2018, Tirado *et al.* 2019); por lo tanto, es importante integrar los conceptos de adaptabilidad y estabilidad. La adaptabilidad se refiere a la habilidad del genotipo de producir en forma consistente buenos rendimientos en diferentes localidades, en cuanto que la estabilidad se refiere a la característica del genotipo de producir buenos rendimientos a través del tiempo en una misma localidad (Sevilla y Rodríguez 2011).

Existen varios modelos para estimar la estabilidad y la adaptabilidad de rendimiento y otras características agronómicas de un conjunto de genotipos cuando son evaluados en diferentes ambientes. Entre los cuales destacan Finlay y Wilkinson (1963), Eberhart y Russell (1966), Perkins y Jinks (1968), Francis y Kannenberg (1978), Nassar y Huehn (1987), Lin y Binns (1988), Kang (1988), y el modelo que combina el análisis de la varianza para el genotipo y efectos principales del medio con el análisis de componentes principales de la IGA (Zobel *et al.* 1988, Gauch y Zobel 1996, Vargas y Crossa 2000).

El modelo de Eberhart y Russell (1966) propone a la regresión lineal para el estudio de la adaptabilidad fenotípica de cultivares. En este modelo, además del promedio general y del coeficiente de regresión lineal de cada genotipo, fue también considerado como parámetro de estabilidad la varianza de los desvíos de la regresión de cada genotipo

En el modelo de Lin y Binns (1988) se utiliza para evaluar la estabilidad, el cuadrado medio de la distancia entre la media del genotipo y la respuesta media máxima para todos los ambientes, de tal manera que, genotipos con menores valores corresponden a los de mejor desempeño. Este método pondera las desviaciones de comportamiento de los genotipos en los ambientes, es decir, considera la estabilidad de comportamiento.

El objetivo de este estudio fue identificar genotipos de maíz que presenten mejor estabilidad de rendimiento de grano, usando los modelos de Eberhart y Russell y Lin-Binns, así como definir el modelo que mejor describa la interacción genotipo por medio ambiente utilizando datos experimentales de rendimiento de grano

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material genético

La investigación se realizó en condiciones de campo, en seis localidades de Ichocan, provincia San Marcos durante tres campañas agrícolas. Se evaluaron los genotipos “INIA 601”, “Maíz morado”, “Canteño”, “INIA 615” provenientes de la Estación Experimental Baños del Inca, Cajamarca y “UNC 47” seleccionado en la Universidad Nacional de Cajamarca.

### Diseño experimental

El diseño experimental utilizado en todas las localidades fue el de bloque completos al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental estuvo constituida por cuatro surcos de 5,50 m de longitud y 0,80 m de ancho, y una separación entre plantas de 0,50 m. El área efectiva fue de los dos surcos centrales, equivalente a un área por unidad experimental de 8,8 m<sup>2</sup>, obteniéndose una densidad de siembra de 500.000 plantas ha<sup>-1</sup>.

### Ubicación de los experimentos

El estudio se llevó a cabo durante tres campañas agrícolas 2017, 2018 y 2019 en campos de seis agricultores con características climáticas y de suelo presentadas en los Cuadros 1 y 2.

### Manejo agronómico

El manejo agronómico del experimento, preparación del terreno, fertilización y otras labores culturales se ejecutó tal como acostumbra los agricultores de la zona en el cultivo de maíz morado. La siembra se realizó en los meses de octubre y noviembre en cada una de las campañas agrícolas. La fertilización para los experimentos se realizó de acuerdo a la recomendación del laboratorio de análisis de suelos, fluctuando entre 110-50-40 y 120-50-50 unidades de NPK. Las evaluaciones de peso de campo, se llevó a cabo de los dos surcos centrales de cada unidad experimental.

### Propiedades físico-químicas del suelo

El Cuadro 2 muestra los análisis de caracterización físicoquímica del suelo, los cuales se tomaron en cuenta para la fertilización.

### Variable evaluada

Se registró el rendimiento de grano al 14% de humedad. Este último se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$RGC = PC \left( \frac{100 - H^\circ}{86} \right) \left( \frac{10}{AEP} * D \right)$$

dónde: RGC es el rendimiento de grano; PC es el peso de campo;  $H^\circ$  es el porcentaje de humedad del grano;  $(100 - H^\circ)$  es el coeficiente de porcentaje de materia seca; 86 es el coeficiente de corrección de humedad al 14 %;  $(10/AEP)$  es el factor de corrección para transformar  $\text{kg parcela}^{-1}$  en  $\text{t.ha}^{-1}$ ; AEP es el área efectiva de la parcela, igual a  $8,8 \text{ m}^2$  y D es el porcentaje de desgrane equivalente a 0,8.

### Análisis estadístico

Se efectuó el análisis de varianza individual por localidades para cada ensayo y el análisis combinado a través de ambientes con el modelo aditivo lineal del análisis de varianza en diseño de bloques completos al azar el cual es presentado en las ecuaciones 1 y 2, Vásquez (2014).

### Modelo lineal individual

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad \begin{cases} i = 1, \dots, g \text{ genotipos} \\ j = 1, \dots, r \text{ repeticiones} \end{cases} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:  $y_{ijkl}$  = valor del genotipo i en el bloque j;  $\mu$  = es el verdadero efecto medio;  $\tau_i$  = efecto del i-ésimo genotipo;  $\beta_j$  = efecto del j-ésimo bloque;  $\varepsilon_{ij}$  = error experimental.

**Cuadro 1.** Características de las localidades evaluadas en Ichocan-Cajamarca, Perú.

| Localidad          | Años           |                  |                    |                |                  |                    |                |                  |                    |
|--------------------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------|----------------|------------------|--------------------|
|                    | 2016-2017      |                  |                    | 2017-2018      |                  |                    | 2018-2019      |                  |                    |
|                    | Altitud (msnm) | Temperatura (°C) | Precipitación (mm) | Altitud (msnm) | Temperatura (°C) | Precipitación (mm) | Altitud (msnm) | Temperatura (°C) | Precipitación (mm) |
| <b>Montoya</b>     | 2370           | 14,77            | 105,7              | 2420           | 16,75            | 156,60             | 2350           | 15,50            | 88,40              |
| <b>Sunchupampa</b> | 2495           | 14,56            | 143,3              | 2540           | 16,33            | 144,70             | 2550           | 14,89            | 185,40             |
| <b>Llolón</b>      | 2770           | 14,53            | 226,0              | 2765           | 16,54            | 171,40             | 2760           | 14,40            | 205,20             |
| <b>Poroporito</b>  | 2870           | 14,70            | 129,3              | 2880           | 16,10            | 226,30             | 2850           | 14,38            | 185,40             |
| <b>La Victoria</b> | 2927           | 14,46            | 138,5              | 3010           | 14,30            | 189,50             | 3050           | 14,30            | 152,60             |
| <b>Llanupacha</b>  | 3140           | 13,76            | 210,0              | 2920           | 10,12            | 188,50             | 3100           | 12,77            | 169,40             |

**Cuadro 2.** Resultados de los análisis de suelo de cada una de las localidades. Ichocan-Cajamarca, Perú.

| Localidad   | P (ppm) | K (ppm) | MO (%) | pH  | Textura |
|-------------|---------|---------|--------|-----|---------|
| Montoya     | 3,34    | 345     | 2,32   | 7,3 | FA      |
| Sunchupampa | 1,42    | 345     | 2,35   | 7,3 | A       |
| Llollón     | 29,33   | 350     | 2,46   | 7,4 | FA      |
| Poroporito  | 6,62    | 340     | 2,10   | 7,2 | FA      |
| La Victoria | 11,93   | 345     | 3,16   | 7,3 | F       |
| Llanupacha  | 17,65   | 340     | 1,88   | 7,3 | F       |

FA = Francoarcilloso; A = Arcilloso; F = Franco Fuente: INIA. (2019)

### Modelo combinado

$$y_{ijkl} = \mu + L_i + A_j + (LA)_{ij} + \gamma_{l(ij)} + \tau_k + (L\tau)_{ik} + (A\tau)_{jk} + (LAT)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \text{(Ec.2)}$$

$\begin{cases} i = 1, \dots, l \text{ localidades} \\ j = 1, \dots, a \text{ años} \\ k = 1, \dots, g \text{ genotipos} \\ l = 1, \dots, r \text{ repeticiones} \end{cases}$

Dónde:  $y_{ijkl}$  = comportamiento medio del genotipo  $k$  en años  $j$ , localidades  $i$ ;  $\mu$  = es la media general;  $L_i$  = efecto del  $i$ -ésimo ambiente (localidad);  $A_j$  = efecto del  $j$ -ésimo año;  $(LA)_{ij}$  = efecto de la interacción (LxA) del  $i$ -ésimo ambiente en el  $j$ ésimo año;  $\gamma_{l(ij)}$  = efecto del bloque dentro de años y localidades;  $\tau_k$  = efecto del  $k$ -ésimo genotipo;  $(L\tau)_{ik}$  = efecto de la interacción del  $k$ -ésimo genotipo en el  $i$ -ésimo ambiente;  $(A\tau)_{jk}$  = efecto de la interacción del  $k$ -ésimo genotipo en el  $j$ -ésimo año;  $(LAT)_{ijk}$  = efecto de la interacción (LAT) del  $k$ -ésimo genotipo en  $i$ -ésimo ambiente y  $j$ -ésimo año;  $\varepsilon$  = es el error experimental. Se efectuaron pruebas de comparación de medias por Duncan al 0,05 de probabilidad.

Los métodos de adaptabilidad y estabilidad utilizados fueron: (a) Eberhart y Russell (1966) y (b) Lin y Binns (1988).

### Método de Eberhart y Russell

El modelo estadístico que permite describir el comportamiento de un genotipo en una serie de ambientes fue:

$$y_{ij} = \mu_i + \beta_i I_j + \delta_{ij} \begin{cases} i = 1, \dots, g \\ j = 1, \dots, n \end{cases} \quad \text{(Ec.3)}$$

Dónde:  $y_i$  = promedio del genotipo  $i$  en el ambiente  $j$ ;  $\mu_i$  = promedio del genotipo  $i$  en todos los ambientes;  $\beta_i$  = coeficiente de regresión que mide la respuesta del genotipo  $i$  al variar los ambientes;  $I_j$  = índice ambiental del ambiente  $j$ -ésimo, que se calcula como la desviación del promedio de los genotipos en un ambiente dado a partir del promedio general;  $\delta_{ij}$  = desviación de la regresión.

Teniendo entonces:

$$I_j = \frac{\left( \sum_i Y_{ij} \right) - \frac{\sum_i \sum_j Y_{ij}}{ng}}{\sum_j I_j = 0}, \quad \text{Con } \sum_j I_j = 0$$

Parámetros de regresión están dados por:

$$\beta_i = \frac{\sum_j Y_{ij} I_j}{\sum_j I_j^2}, \quad \text{Ho: } \beta_i = 1; \quad t_{\text{calculado}} = \frac{\beta_i - 1}{S_{\beta_i}}$$

La medida de la estabilidad está dada por

$$S_{di}^2 = \left[ \sum_j \delta_{ij}^2 / (n-2) \right] - \frac{S_e^2}{r}, \quad \text{Ho: } S_{di}^2 = 0; \quad F_{\text{calculado}} = \frac{\sum_j \delta_{ij}^2 / (n-2)}{\text{Error conjunto}}$$

La interpretación generalizada de los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell es como se indica en el Cuadro 3:

**Cuadro 3.** Interpretación de los parámetros de estabilidad del modelo Eberhart y Russell.

| Coefficiente de regresión ( $\beta_i$ ) | CM - Sd ( $S_d^2$ ) | Interpretación   |
|---|---------------------|--|
| = 1                                     | = 0                 | Variación estable y predecible                                   |
| = 1                                     | > 0                 | Buena respuesta en todos los ambientes, pero no predecible       |
| < 1                                     | = 0                 | Mejor respuesta en ambientes desfavorables y predecible          |
| < 1                                     | > 0                 | Mejor respuesta en ambientes desfavorables, pero poco predecible |
| > 1                                     | = 0                 | Mejor respuesta en ambientes favorables y predecible             |
| > 1                                     | > 0                 | Mejor respuesta en ambientes favorables, pero poco predecible    |

CM - Sd = Cuadrado Medio de la desviación de la regresión

### Método de Lin y Binns

Se basa en la estimación de un parámetro de adaptabilidad y estabilidad conocido como índice de superioridad ( $P_i$ ), a través del cual la estabilidad de un cultivar se evalúa mediante la suma de cuadrados de las diferencias entre el potencial productivo del cultivar de interés con el máximo rendimiento observado en cada localidad (máximas desviaciones del rendimiento), de modo que, genotipos con menores valores corresponden a los de mejor desempeño, para tal fin, se calcula  $P_i$  de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\bar{X}_{ij} - Max_j)^2}{2n} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$P_i$  = Índice de superioridad y estabilidad del genótipo  $i$ ;

$X_i$  = Rendimiento promedio del genótipo  $i$  en la localidad  $j$ ;

$Max_j$  = Rendimiento promedio máximo en la localidad  $j$ ;

$n$  = Número de localidades o ambiente evaluados;

En esta metodología el genotipo estable es el que presenta menor  $P_i$ , y cuando  $P_i$  es un valor inferior al cuadrado medio del error del análisis de varianza

conjunto, esto indica que existe paralelismo entre la respuesta máxima y el genotipo particular, lo que facilita al fitomejorador la toma de decisiones, ya que selecciona únicamente con base al índice de superioridad; en caso contrario, debe examinar la adaptabilidad de cada genotipo en cada ambiente particular. El análisis de varianza se utiliza para determinar la significancia del índice de superioridad de cada genotipo según lo indicado por Lin y Binns (1988).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de varianza

En el Cuadro 4 se muestra los resultados del análisis de varianza combinado para rendimiento de grano seco a través de seis ambientes en tres años (campañas). Se detectó diferencias altamente significativas ( $p \leq 0,01$ ) entre años (A), ambientes (L), genotipos (G) y en la interacción años x localidades (AxL), años x genotipos (AxG), localidades x genotipos (LxG) y Años x localidades x genotipos (AxLxG).

**Cuadro 4.** Análisis de varianza combinado a través de 3 años, 6 localidades y 5 genotipos de maíz morado para la variable rendimiento de grano seco.

| Fuente de variación    | Grados de libertad | Suma de cuadrado | Cuadrado medio | p-valor | % del modelo |
|------------------------|--------------------|------------------|----------------|---------|--------------|
| <b>Años</b>            | 2                  | 260,01           | 130,01 **      | <0,0001 | 24,5         |
| <b>Bloque (AxL)</b>    | 54                 | 29,93            | 0,55 **        | 0,0086  |              |
| <b>Localidades (L)</b> | 5                  | 122,05           | 24,41 **       | <0,0001 | 11,5         |
| <b>Genotipos (G)</b>   | 4                  | 163,81           | 40,95 **       | <0,0001 | 15,4         |
| <b>A x L</b>           | 10                 | 174,32           | 17,43 **       | <0,0001 | 16,4         |
| <b>A x G</b>           | 8                  | 62,31            | 7,78 **        | <0,0001 | 5,8          |
| <b>L x G</b>           | 20                 | 60,55            | 3,02 **        | <0,0001 | 5,7          |
| <b>A x L x G</b>       | 40                 | 121,24           | 3,03 **        | <0,0001 | 11,4         |
| <b>Error</b>           | 216                | 73,98            | 0,34 ns        |         |              |
| <b>Total</b>           | 359                | 1068,25          |                |         |              |
| <b>CV (%)</b>          | 17,35              |                  |                |         |              |
| <b>Promedio</b>        | 3,37               |                  |                |         |              |
| <b>R<sup>2</sup></b>   | 0,93               |                  |                |         |              |

\*\* = Altamente significativo; ns = no significativo

Estos resultados evidencian diferencias reales entre los promedios de los genotipos, años, localidades e interacciones de primer y segundo orden. Así mismo, muestran que el comportamiento de los genotipos no fue coincidente en los diferentes años y localidades; por lo que es una muestra de que existen buenos materiales para unos ambientes pero que no responden bien en otros. Este hecho hace difícil la identificación de los genotipos que pueden ser recomendados a los agricultores para todas las localidades evaluadas, justificando estudios más detallados de la interacción.

El coeficiente de variación fue de 17,35 %, valor que se considera aceptable, otorgando buena precisión a los experimentos (Vásquez 2014). La contribución de cada una de estas fuentes a la variabilidad total del modelo fluctuó de 5,7 % para la interacción LxA a 24,5 % para años respectivamente. Estos resultados indican que al menos entre 2 años, entre 2 ambientes o entre 2 genotipos existieron diferencias reales en el rendimiento. Resultados similares fueron reportados por Silva *et al.* (2014), Zambrano *et al.* (2017) y Tirado *et al.* (2019). Se considera que la significación más importante fue la varianza debida al factor años y localidades (ambientes), lo que refleja las diferencias en cuanto a clima, humedad relativa y nubosidad en los diferentes ambientes, como lo reportan De León (1984), De León y Pandey (1989) y Betanzos (2001).

El comportamiento diferencial de los genotipos para la variable rendimiento, conllevó a la existencia de interacción genotipo por año y reveló la gran influencia que ejerce el ambiente sobre el rendimiento puesto que éste está fuertemente influenciado por el medio ambiente (Caldis *et al.* 1994, Vayda 1994, Zamora *et al.* 1997). Este resultado contrasta con el obtenido en otras investigaciones, en las que el factor ambiental y de interacción genotipo por ambiente fueron superiores a los efectos de genotipos (Alejos *et al.* 2006, Palemón *et al.* 2012).

La presencia de interacción demuestra el comportamiento diferencial de los genotipos en los diferentes años y pone de manifiesto la gran influencia que la época de siembra y los ambientes ejercen sobre los genotipos de maíz morado. Se ha señalado que la expresión de muchos caracteres cuantitativos está

fuertemente influida por la interacción entre genotipos y ambientes (Tirado *et al.* 2019, Medina *et al.* 2020). La significación encontrada para la interacción genotipo x localidad indica que los genotipos tienden a comportarse de manera desigual en las diferentes localidades. La interacción de segundo orden (GxLxA) que resultó significativa, indica que una gran porción de los efectos de la interacción pueden ser explicados por los efectos de localidades y años siembra. Esto es concordante con los reportes de Hassan *et al.* (2019).

Después de conocer la existencia de interacción genotipos por años, genotipos por localidades, genotipos por años por localidades, se procedió al análisis de la adaptabilidad y estabilidad genotípica mediante el modelo de Eberhart y Russell (1966).

Los resultados del análisis de varianza para el estudio de los parámetros de estabilidad se presentan en el Cuadro 5.

Hubo significación ( $p \leq 0,01$ ) para genotipos, ambiente lineal, GxAmb (Lineal) y desviación conjunta de la regresión, en el rendimiento de grano, lo cual permitió separarlos por sus características de adaptabilidad y estabilidad. La significación para efecto lineal de ambientes revela que hubo una respuesta lineal a los ambientes por parte de los genotipos en la característica evaluada. La significación estadística para la interacción genotipos por ambiente lineal muestra que hay diferencias genéticas en las respuestas de los genotipos a los diferentes ambientes y años, es decir, existen diferencias entre los valores de los coeficientes de regresión de los genotipos sobre los índices ambientales. Se encontró, asimismo, diferencias significativas ( $p \leq 0,01$ ) para la desviación de regresión conjunta.

La prueba de Duncan ( $p \leq 0,05$ ) para la variable rendimiento de grano de los cinco genotipos evaluados se presenta en el Cuadro 6.

Se observó que los rendimientos varían de 2,17 a 4,05 t.ha<sup>-1</sup>. Los genotipos INIA 601 y UNC 47 superan estadísticamente a los genotipos MMorado, INIA 615 y Canteño. Cuatro genotipos evaluados lograron rendimientos superiores a los obtenidos por Medina *et al.* (2020). El rendimiento de los genotipos INIA 601 y UNC 47, fueron superiores al promedio nacional (MINAGRI 2019).

**Cuadro 5.** Análisis de varianza para la estabilidad del rendimiento de grano de genotipos de maíz morado en diferentes ambientes de Ichocan-Cajamarca, Perú.

| Fuente de variación        | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | p-valor |
|----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|
| <b>Total</b>               | 89                 |                   |                  |         |
| <b>Genotipos</b>           | 4                  | 43,16             | 10,79 **         | <0,0001 |
| <b>Ambiente+(GxAmb.)</b>   | 85                 |                   |                  |         |
| <b>Amb (Lineal)</b>        | 1                  | 145,16            | 145,16 **        | <0,0001 |
| <b>GxAmb (Lineal)</b>      | 4                  | 27,80             | 6,95 **          | <0,0001 |
| <b>Desviación conjunta</b> | 80                 | 30,40             | 0,38 **          | <0,0001 |
| <b>Error conjunto</b>      | 216                |                   | 0,34 ns          |         |

\*\* = Altamente significativo; ns = no significativo

### Estabilidad del rendimiento

En el Cuadro 6, se resumen los índices de adaptabilidad y estabilidad propuestos por Eberhart y Russell (1966) y Lin y Binns (1988).

Según el modelo de Eberhart y Russell (Cuadro 6), INIA 601 tuvo un coeficiente de regresión ( $b_i$ ) mayor a la unidad y significativo, presentando una adaptación a ambientes favorables. El genotipo UNC 47 mostró un coeficiente de regresión ( $b_i$ ) igual a la unidad que no difiere de 1, además, fue el cultivar con el rendimiento más alto que la media (3,37 t.ha<sup>-1</sup>) y el de mayor adaptación tanto en ambientes favorables como desfavorables.

Los genotipos MMorado e INIA 615 presentaron un coeficiente de regresión mayor que la unidad, siendo considerado como de adaptación a ambientes favorables. El genotipo Canteño reveló un coeficiente de regresión menor que la unidad considerándose como de mejor respuesta en ambientes desfavorables y predecible. Las desviaciones de regresión ( $S^2_{di}$ ) en todos los casos fueron diferentes de cero, lo cual estaría indicando que en cuanto a la estabilidad son poco predecibles. Estos resultados son concordantes con los de Medina *et al.* (2020) quienes al usar el Modelo AMMI, encontraron que los genotipos INIA 601, UNC 47 y MMorado fueron consistentes.

**Cuadro 6.** Medias de rendimiento y estimados de los parámetros de adaptabilidad y estabilidad de 5 genotipos de maíz morado en dieciocho localidades de Cajamarca, Perú

| Genotipo        | Promedio (t.ha <sup>-1</sup> ) | $\mu = 3,37$ (t.ha <sup>-1</sup> ) | Eberhart y Russell |          |            | Lin y Binns |       |         |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|----------|------------|-------------|-------|---------|
|                 |                                |                                    | $b_i$              | t - test | $S^2_{di}$ | % Media     | Pi    | Ranking |
| <b>INIA 601</b> | 4,05 a                         | >                                  | 1,56 *             | 8,00     | 0,15       | 119,3       | 11,9  | 1       |
| <b>UNC 47</b>   | 4,03 a                         | >                                  | 1,01 ns            | 0,18     | 0,47       | 119,1       | 14,8  | 2       |
| <b>MMorado</b>  | 3,54 b                         | >                                  | 1,14 ns            | 1,75     | 0,19       | 104,1       | 27,2  | 3       |
| <b>INIA 615</b> | 3,17 c                         | <                                  | 1,10 ns            | 0,38     | 0,53*      | 93,5        | 52,5  | 4       |
| <b>Canteño</b>  | 2,17 d                         | <                                  | 0,23 *             | -9,62    | 0,23       | 64,0        | 149,0 | 5       |

\* = significativa a  $p < 0,05$ ; ns = no significativo;  $b_i$  = coeficiente de regresión;  $S^2_{di}$  = desviaciones de la regresión; test-t' para  $H_0: \beta_1 = 1,0$ ;  $P_i$  = índice de superioridad para rendimiento.

El estadístico Pi de Lin y Binns mostró a los genotipos INIA 601 (Pi=11,9) y UNC 47 (Pi=14,8) como los más estables (Cuadro 6). Los genotipos antes mencionados alcanzaron una media de rendimiento de 119 % con respecto a la media general; es decir, un rendimiento porcentual de 19 % por encima de la media general, lo cual indica que dichos genotipos son de amplia adaptación tanto en ambientes favorables como desfavorables. Se observa la posición del Pi en la escala de mérito 1 – 5, siendo INIA 601 y UNC 47 los que ocupan la posición 1 a 2 en la escala de mérito.

La estabilidad en este método estuvo asociada a mayor productividad de los genotipos; Carbonell *et al.* (2004) evaluando 18 cultivares de frijol en 23 ambientes; Acevedo *et al.* (2010) evaluando 15 cultivares de arroz en 5 ambientes; Silva *et al.* (2014) al examinar 18 cultivares de maíz en 7 localidades, identificaron a los cultivares estables aquellos que pertenecían al grupo de mayor producción.

Los dos modelos coincidieron en la selección de los genotipos INIA 601 y UNC 47 por su adaptabilidad general y estabilidad, así como por la mayor productividad. Estos resultados son concordantes con los de Vargas *et al.* (2016), quienes al utilizar los métodos AMMI, Eberhart y Russell (1966) y Lin y Binns (1988) en la evaluación de maíces de alta calidad proteica, obtuvieron a los cultivares QPM303, QPM 304 Y QPM 306 como los de mayor estabilidad. Así mismo con los reportes de Araméndiz *et al.* (2017), quienes al evaluar genotipos de frijol caupi con estos dos modelos, seleccionaron al cultivar L-042 por su mayor rendimiento y por el índice (Pi=0,003 y bi= 0,9) como cultivares de adaptación a ambientes favorables y desfavorables.

### CONCLUSIONES

El efecto de años y la interacción AxL fue superior al efecto del genotipo y localidades, lo cual puede tener su origen en la variabilidad de los genotipos.

Los modelos Eberhart y Russell y Lin y Binns coincidieron y permiten recomendar a los genotipos INIA 601 y UNC 47 por presentar mayor adaptación a ambientes favorables y desfavorables y alcanzar rendimientos superiores a las 4 t.ha<sup>-1</sup>.

Los rendimientos que superaron a la media general (3,37 t.ha<sup>-1</sup>) fueron los genotipos INIA 601, UNC-47 y MMorado con 4,05, 4,03 y 3,54 t.ha<sup>-1</sup>.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los agricultores de Ichocan-San Marcos y a la Estación Experimental Baños del Inca Cajamarca, por el apoyo en la presente investigación.

### LITERATURA CITADA

- Acevedo, M; Castrillo, W; Torres, O; Marín, C; Álvarez, R; Moreno, O; Torres, E. 2010. Estabilidad fenotípica de arroz de riego en Venezuela utilizando los modelos Lin-Binns y AMMI. *Agronomía Tropical* 60(2): 131-138.
- Alejos, G; Monasterio, P; Rea, R. 2006. Análisis de la interacción genotipo ambiente para el rendimiento de maíz en la región maicera del estado de Yaracuy, Venezuela. *Agronomía Tropical* 56(3):369-384.
- Aguilera, OM; Reza, V; Chew, MRG; Meza, JAV. 2011. Propiedades funcionales de las antocianinas. *Revista Biotecnología*. Universidad de Sonora. México. XIII(2): 16-22.
- Araméndiz, TH; Espitia, CM; Cardona, AC. 2017. Adaptabilidad y estabilidad fenotípica en cultivares de frijol caupí en el caribe húmedo colombiano. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. Especial No 2, p. 1-22.
- Betanzos, ME. 2001. Variedades de maíz resistentes, una opción para reducir la pudrición de mazorca en Chiapas, México. *Agricultura Técnica en México* 27:57-67.
- Caldis, DO. 1994. Genetic improvement of yield, crop genetic improvement and associated physiological changes in the potato. *Universidad de Salamanca*. 411 p.
- Carbonell, SAM; Garcia, F; Morais, LK. 2004. Common bean cultivars and lines Interactions with environments. *Scientia Agricola* 61(2):169-177.
- De León, C. 1984. Enfermedades del maíz. Una guía para su identificación en el campo. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Tercera Edición. El Batán, Texcoco, Edo. de México. 114 p.
- De León, C; Pandey, S. 1989. Improvement of resistance to ear and stalk rots and agronomic traits in tropical maize gene pools. *Crop Science* 29:12-17



- Eberhart, A; Russell, W. 1966. Stability parameters for comparing varieties, *Crop Science* 6(1): 36-44.
- Finlay, KW; Wilkinson, GN. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal Agriculture Research*. 14: 742-754.
- Francis, TR; Kannenberg, LW. 1978. Yield stability studies in short-season maize. 1. A descriptive method for grouping genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*. 58:1029-1034.
- García, PMA; Castillo, F; Ramírez, VP; Mendoza, CC; Kato, TA; Ramírez, AH; Preciado, ORE; Moreno, ME. 2012. Valoración de la diversidad genética y potencial agronómico de maíces nativos pigmentados de valles altos de México. *Avances de Investigación. Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad – Genética. Colegio de Postgraduado. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas* p. 24-27.
- Gauch, H y Zobel, R. 1988. Predictive postdictive success of statistical analyses of yield trials, *Theoretical and Applied Genetics*. 76:1-10.
- Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). 2019. Memoria Anual. Estación Experimental Baños del Inca. Cajamarca-Perú. 199 p.
- Kang, MS. 1988. A rank sum method for selecting high yielding and stable crop genotypes. *Cereal Research Communications* 16: 113-115.
- Lin, CS; Binns, MR. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Canadian Journal of Plant Science* 68:193-198.
- Lozano-Ramírez, Santacruz-Varela, A; San-Vicente-García, F; Crossa, J; Burqueño, J; Molina-Galán, JD. 2015. Modelación de la interacción genotipo x ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38: (4) 337-347.
- Medina, HA; Narro, LLA; Chávez, CA. 2020. Cultivo de maíz morado (*Zea mays* L.) en zona altoandina de Perú: Adaptación e identificación de cultivares de alto rendimiento y contenido de antocianina. *Scientia Agropecuaria* 11(3):291-299.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, Perú). 2017. El Agro en Cifras (en línea). Febrero. Lima, Perú. Consultado 12 ago. 2020. Disponible en <https://bit.ly/3lo5CEP>
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, Perú). 2019. “El Agro en Cifras”. (en línea). Febrero. Lima, Perú. Consultado 12 ago. 2020. Disponible en <https://bit.ly/3DnimSA>
- Nassar, R. and Huhn, M. 1987. Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics* 43: 45-53.
- Ochoa-Cadavid, I; Preciado-Ortíz, RE; Bayuelo-Jimenez, JS. 2019. Interacción genotipo x ambiente y estabilidad en rendimiento de variedades de maíz en condiciones contrastantes de fósforo. *Agrociencia* 53: 337-353.
- Ortega, A; De Leon, C. 1971. Plant Protection. In Carballo, A; Bork, D. (eds.). *Proceeding of the First Maize Workshop. CIMMYT. El Batán, Edo. de Mexico*. p. 95- 102.
- Palemón, AF; Gómez, MNO; Castillo, GF; Ramírez, V P; Molina, GJ; Miranda, CS. 2012. Estabilidad de cruza intervarietales de maíz (*Zea mays* L.) para la región semicálida de Guerrero. *Agrociencia* 46:133-145.
- Pandey, M; Verma, RK; Saraf, SA. 2010. Nutraceuticals: new era of medicine and health. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research* 3:11-15.
- Perkins, J; Jinks, J. 1968. Environmental and genotype environmental components of variability. IV no-linear interactions for multiple inbred lines. *Heredity* 23:525-535.
- Sevilla, PR; Rodríguez, CO. 2011. Mejoramiento Conservativo del Maíz en la Sierra del Perú. INIA, Perú. p. 2-59.
- Silva, DRJ; Pérez, CAA; Medina, MSA; Vilorio, DJE; García, MAD; Duarte, A; Tablante, Y; Pacheco, T. 2014. Estabilidad fenotípica de híbridos de maíz en Venezuela utilizando el índice de superioridad y la regresión lineal bisegmentada. *Agronomía Tropical* 64(1-2): 107-120.

- Tirado, SCS; Vásquez, AV; Narro, LLA. 2019. Estabilidad de rendimiento y adaptabilidad de híbridos de maíz tolerantes a suelos ácidos en base a las características del análisis GGE biplot. Avances en Ciencias e Ingenierías: ACI 11(17): 50-63.
- Vargas, EEN; Vargas, SJE; Baena, GD. 2016. Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas Agroecológicas de Colombia. Acta Agronómica 65(1):72-79.
- Vargas, M; Crossa, J. 2000. El análisis AMMI y la gráfica del biplot en SAS. Unidad de biometría y estadística, CIMMYT. México. 42 p.
- Vásquez, AV. 1988. Mejoramiento genético de la papa. Amaru editores, Lima, Perú, 208 p.
- Vásquez, AV. 2014. Diseños experimentales con SAS. Edita CONCYTEC FONDECYT Cajamarca, Perú, 704 p.
- Vásquez, AV; Cabrera, HHA; Jiménez, DLA; Colunche, A. 2019. Estabilidad del Rendimiento de Genotipos de Papa (*Solanum tuberosum* L.). Ecología Aplicada 18(1): 59-65.
- Vayda, M E. 1994. Environmental stress and its impact on potato yield, 1994. En: Potato Genetic. Wallingford, CAB International. p. 3-42.
- Zamora, N; Estévez, A; Sánchez, H; Salomón, JL; González, ME.; Cordero, M; Morales, A; Rodríguez, JM. 1997. Evaluación de nuevas variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.), en diferentes ambientes en la República de Cuba. Agrotecnia de Cuba 27, (2-3): 44-9.
- Zambrano, ZEE; Limongi, AJRF; Alarcon, CFD; Villavicencio, LJP; Caicedo, VMB; Eguez, MJF; Zambrano, ML. 2017. Interacción genotipo ambiente de híbridos de maíz bajo temporal en Manabí y los Ríos, Ecuador. Espamciencia 8(1): 7-14.
- Zobel, RW; Wright, MJ; Gauch, HG. 1988. Statistical of a yield trial, Agronomy Journal 80:388-36.