



Estabilidad fenotípica de arveja (*Pisum sativum* L.) en la zona productora de Nariño, Colombia¹

Phenotypic stability of pea (*Pisum sativum* L.) in the production area of Nariño, Colombia

Máryory Maricela Cadena-Guerrero², Dionicio Bayardo Yepes-Chamorro², Juan Vicente Romero²

¹ Recepción: 30 de mayo, 2020. Aceptación: 10 de marzo, 2021. Este trabajo formó parte de un proyecto de investigación ejecutado por la Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), con recursos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR).

² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Obonuco, Pasto, Colombia. mmcadena@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-0610-2185>); byepes@agrosavia.co (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-3683-240X>); jvromero@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-4857-608X>).

Resumen

Introducción. La arveja (*Pisum sativum* L.) es una leguminosa de gran importancia para la economía campesina de la zona altoandina del departamento de Nariño, Colombia. La mayor parte de la producción de arveja en este departamento, se comercializa en vaina en fresco; sin embargo, es necesario fortalecer el mercado local de grano seco, para eso, se requiere de variedades adaptadas a las condiciones regionales. **Objetivo.** Evaluar quince genotipos de arveja por la estabilidad fenotípica del rendimiento en grano seco, en la zona productora de Nariño. **Materiales y métodos.** Entre el 2013 y 2014, se evaluaron quince genotipos de arveja en tres ambientes de Nariño. Los experimentos se establecieron con un diseño de bloques completos al azar y cuatro repeticiones. Para el análisis de estabilidad de rendimiento en grano seco se utilizó el modelo GGE biplot. **Resultados.** En el análisis de varianza, a través de los tres ambientes, se presentaron efectos significativos ($p < 0,05$) de ambientes (A), genotipos (G) e interacción de GA, para rendimiento en grano seco y número de granos por vaina. El promedio de rendimiento para todos los ambientes, estuvo entre 747,5 y 1357,3 kg ha⁻¹ y los granos por vaina entre 4,4 y 5,4. Los genotipos ARUDN-3562 y VOUDN-7350 sobresalieron por ser estables y por sus altos rendimientos (kg ha⁻¹) con 1357,3 y 1144,1, respectivamente, que superaron a la media general (1057,9) y estadísticamente similares a los testigos Alcalá (1227,8), Obonuco Andina (1238,1) y Santa Isabel (1013,6). **Conclusión.** Los genotipos estudiados mostraron alta variabilidad en rendimiento y en estabilidad fenotípica, lo que permitirá ampliar la colección de trabajo para mejoramiento de arveja en Nariño. Se destacaron los genotipos ARUDN-3562 y VOUDN-7350, con los cuales se podría avanzar en forma individual o ser usados como parentales.

Palabras clave: legumbres de grano, interacción genotipo ambiente, variación genética, componentes de rendimiento.

Abstract

Introduction. The pea (*Pisum sativum* L.) is a legume crop of great importance for the peasant economy in the high Andean zone of the department of Nariño, Colombia. Most of the pea production in this department is marketed



as fresh pods; however, it is necessary to strengthen the local dry bean market, which requires varieties adapted to regional conditions. **Objective.** To evaluate fifteen pea genotypes for phenotypic stability of dry grain yield, in the Nariño production zone. **Materials and methods.** Between 2013 and 2014, fifteen pea genotypes were evaluated in three Nariño environments. The experiments were established with a randomized complete block design and four replicates. The GGE biplot model was used for dry grain yield stability analysis. **Results.** In the analysis of variance across the three environments, there were significant effects ($p < 0.05$) of environments (A), genotypes (G), and GA interaction, for dry grain yield and number of grains per pod. The average yield for all environments was between 747.5 and 1357.3 kg ha⁻¹ and the grains per pod between 4.4 and 5.4. The genotypes ARUDN-3562 and VOUDN-7350 stood out for being stable and for their high yields (kg ha⁻¹) with 1357.3 and 1144.1, respectively, which exceeded the general average (1057.9) and were statistically similar to the controls Alcalá (1227.8), Obonuco Andina (1238.1), and Santa Isabel (1013.6). **Conclusion.** The genotypes studied showed high variability in yield and phenotypic stability, which will allow expanding the working collection for pea improvement in Nariño. The genotypes ARUDN-3562 and VOUDN-7350 stood out and could be used individually or as parental.

Keywords: grain legumes, genotype environment interaction, genetic variation, yield components.

Introducción

El cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) representa uno de los renglones productivos de gran importancia en Colombia, es considerado uno de los productos básicos de la economía campesina de pequeños y medianos productores de la zona alto andina, una excelente alternativa para generación de empleo y de ingresos (Peñaranda & Molina, 2011). En el año 2017, se cultivó en veinticuatro departamentos de Colombia, de los cuales Nariño, Cundinamarca y Boyacá fueron los principales productores con 12361, 5079 y 3992 hectáreas, respectivamente y producciones de 25 183, 8646 y 3909 toneladas (Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano, 2019; Torres-Martínez et al., 2020). En Colombia, la arveja se cultiva en climas fríos y medios, en alturas sobre el nivel del mar que van desde los 1800 a los 2800 m y con temperatura óptima de 13 a 18 °C (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2015).

La mayor parte de la producción de arveja en el departamento de Nariño, se comercializa en vaina en fresco. Sin embargo, es necesario fortalecer el mercado de arveja en grano seco, el cual gira entorno a las variedades regionales Piquinegra y Santa Isabel, de grano crema. Para lo anterior, se requiere de variedades adaptadas a las condiciones locales. Un primer paso para el desarrollo de estas es la evaluación de un grupo de cultivares o una población inicial de genotipos en distintos ambientes (Cruz et al., 2014).

Dado que las condiciones en cada localidad no son homogéneas y cada genotipo de arveja puede responder de manera diferente a los estímulos ambientales, es necesario realizar estudios de estabilidad fenotípica que permitan conocer el comportamiento diferencial de los genotipos al ser evaluados en distintos ambientes, lo que se conoce como interacción genotipo x ambiente (G x A) (Gordón-Mendoza et al., 2006; Vallejo-Cabrera & Estrada-Salazar, 2013).

Existen diversos modelos estadísticos que permiten el estudio de la interacción genotipo x ambiente (Araméndiz et al., 2007; Frutos-Bernal, 2011; Muñoz, 2012; Ligarreto et al., 2015; Lozano-Ramírez et al., 2015; Vargas-Escobar et al., 2016), entre estos, el modelo propuesto por Eberhart & Russell (1966), de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) (Zobel et al., 1988) y el GGE Biplot (Yan et al., 2000). Este último, es una herramienta que permite analizar a nivel gráfico los datos de pruebas multiambientales; es eficaz para el análisis de mega-ambientes, la evaluación de genotipos (con base en su estabilidad y rendimiento) y la evaluación de ambientes (Frutos-Bernal, 2011; Ledesma-Ramírez et al., 2012).

El objetivo de esta investigación fue evaluar quince genotipos de arveja, por la estabilidad fenotípica del rendimiento en grano seco, en la zona productora de Nariño.

Materiales y métodos

Localización

Los experimentos se establecieron en tres ambientes de la zona altoandina del departamento de Nariño, Colombia, caracterizados por la producción de arveja (*Pisum sativum* L.) con condiciones edafoclimáticas indicadas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ubicación y características geoclimáticas de ambientes donde se establecieron los experimentos para la evaluación de estabilidad fenotípica de arveja (*Pisum sativum* L.) en Nariño, Colombia. 2013-2014.

Table 1. Location and geoclimatic characteristics of environments where experiments were established for the evaluation of phenotypic stability of peas (*Pisum sativum* L.) in Nariño, Colombia. 2013-2014.

Ambiente	Localidad	Coordenadas	Altitud (msnm)	Temperatura (°C) ¹	Precipitación (mm) ¹
Ipiales	Vereda Yanalá	N 00°51'40,9" W 77°34'58,6"	2855	11,3	477,3
Pasto	C.I. Obonuco AGROSAVIA	N 01°11'47" W 77°18'10"	2762	13,1	303,8
Tangua	Vereda El Cebadal	N 01°07'11" W 77°20'40"	2830	12,6	249

¹Fuente/Source: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2017).

En todos los experimentos se realizó el mismo manejo agronómico. Para la preparación del suelo se hicieron dos pases de cincel vibratorio y dos rastrilladas. La siembra de los genotipos se realizó a distancias de 1,20 m entre surcos y 0,10 m entre plantas, una semilla por sitio. En todos los genotipos se alcanzó un porcentaje de emergencia superior al 90 %. La fertilización se realizó de forma manual, a los veinte días después de la siembra, con fertilizante 13-26-6, en dosis de 300 kg ha⁻¹. Se realizaron monitoreos constantes para verificar la presencia de plagas y enfermedades y realizar de manera oportuna el manejo fitosanitario, que en su mayoría fue con el uso de productos de síntesis química. Durante todo el ciclo de cultivo, se realizaron cuatro labores de desyerba manual.

Materiales evaluados

Los quince genotipos de arveja evaluados hacen parte de la colección de trabajo del centro de investigación Obonuco, de la Corporación Colombiana de Investigación agropecuaria (AGROSAVIA) (Cuadro 2), algunos de ellos procedentes de colecciones internacionales, de colectas locales y otros derivados de cruzamientos realizados en el Programa Cooperativo de Investigación Agrícola para la Subregión Andina (PROCIANDINO).

Cuadro 2. Genotipos de arveja (*Pisum sativum* L.) evaluados en tres ambientes de Nariño, Colombia. 2013-2014.

Table 2. Pea (*Pisum sativum* L.) genotypes evaluated in three environments of Nariño, Colombia. 2013-2014.

Nº de genotipo	Codificación	Nombre o genealogía	Color grano
2	ILS 6522	Ecuador 056	crema
3	VOUDN-7311(2006B)	[(Santa Isabel x Tolima 3)/(Santa Isabel x Australia 26)] x [(Santa Isabel x Alemania 23)/(Santa Isabel x New Wisconsin)] F2 MK	verde
5	VOUDN-7145 (2005A)	(Santa Isabel x WSU 23) MA	crema
6	ARUDN-3562	ILS 3562 (Orcado)	verde
8	ILS 6527	Ecuador 091	crema
9	ARUDN-3557	ILS 3557 (FRANCIA 11)	crema
13	ILS 6498	Santa Isabel CIO	crema
14	Santa Isabel	Testigo regional	crema
22	VOUDN-7330 (2006B)	[(Santa Isabel x ICA Tominé)/(Santa Isabel x Australia 26)] x [(Santa Isabel x San Isidro)/(Santa Isabel x WSU 23)] F2-MA	verde
24	VOUDN-7336-2 (2006B)	[(Santa Isabel x ICA Tominé)/(Santa Isabel x Australia 26)] x [(Santa Isabel x San Isidro)/(Santa Isabel x WSU 23)] F2-MG	verde
27	VOUDN-3613	ILS 3613 (Boyacá 5)	verde
28	Alcalá	Originada a partir de varios cruzamientos en los que intervinieron: Santa Isabel, Australia 26, Alemania 23, New Season y San Isidro (Variedad testigo)	crema
32	VOUDN-7350 (2006B)	[(Santa Isabel x Tolima 3)/(Santa Isabel x Australia 26)] x [(Santa Isabel x Alemania 23)/(Santa Isabel x New Wisconsin)] x [(Santa Isabel x ICA Tominé)/(Santa Isabel x Australia 26)] x [(Santa Isabel x San Isidro)/(Santa Isabel x WSU 23)] F2-MD	verde
35	Obonuco Andina	Línea 48 x E.E.U.U (Variedad testigo)	verde
37	ILS 6524	Ecuador 062	verde

Diseño experimental

En cada ambiente, los experimentos se establecieron bajo un diseño de bloques completos al azar con quince tratamientos (genotipos) y cuatro repeticiones. Cada unidad experimental tuvo un área de 13,2 m², para un total de 800 m² por experimento.

VARIABLES EVALUADAS

Se determinó el rendimiento de grano seco (kg ha⁻¹) entre los 140 a 150 días después de la siembra, cuando los genotipos alcanzaron su madurez de cosecha. Se realizó la recolección manual de grano seco y pesaje de la producción. También se midió el número de granos por vaina (gpv), en una muestra de cuarenta vainas por unidad experimental.

Análisis estadístico de los resultados

Para cada variable se realizó una prueba de normalidad de Shapiro – Wilk y de homogeneidad de varianzas de Barlett, luego se realizaron análisis de varianza por ambiente y combinado. El modelo usado fue el expresado en la ecuación 1:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + A_j + GA_{ij} \quad (1)$$

Donde Y_{ij} es el rendimiento promedio del genotipo i en el ambiente j ; μ es la media general; G_i es el efecto principal del genotipo i ; A_j es el efecto principal del ambiente j ; y GA_{ij} es el efecto de la interacción entre el genotipo i y el ambiente j .

Para el análisis de estabilidad fenotípica se utilizó el modelo GGE Biplot (Yan et al., 2000; Yan & Kang, 2003), que resalta la relevancia de la capacidad adaptativa de los genotipos, dado que este no separa los efectos del genotipo G de la interacción GA (G y GE en inglés), asociándolos en dos términos multiplicativos, como indica la ecuación 2:

$$Y_{ij} - \bar{Y}_j = \lambda_1 e_{i1} \boldsymbol{\eta}_{j1} + \lambda_2 e_{i2} \boldsymbol{\eta}_{j2} + e_{ij} \quad (2)$$

Donde Y_{ij} es el rendimiento promedio del genotipo i en el ambiente j ; \bar{Y}_j es el rendimiento promedio de todos los genotipos en el ambiente j ; $\lambda_1 e_{i1} \boldsymbol{\eta}_{j1}$ es el primer componente principal (PC1); $\lambda_2 e_{i2} \boldsymbol{\eta}_{j2}$ es el segundo componente principal (PC2); λ_1 y λ_2 son los valores singulares (autovalores) asociados al primer y segundo componente principal, respectivamente; e_{i1} y e_{i2} son las valoraciones (autovectores) del CP1 y CP2 para el genotipo i ; $\boldsymbol{\eta}_{j1}$ y $\boldsymbol{\eta}_{j2}$ son las valoraciones del CP1 y CP2 para el ambiente j ; e_{ij} es el error residual del modelo asociado con el genotipo i en el ambiente j .

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa R (R Core Team, 2020) y los análisis y figuras GGE biplot con ayuda del paquete “metan” (Olivoto & Lúcio, 2020) de este mismo programa.

Resultados

Análisis de varianza

Rendimiento en grano seco

En el análisis de varianza por ambiente se encontró efectos significativos de genotipos en el ambiente de Ipiales ($p < 0,05$) y altamente significativos en Pasto ($p < 0,01$).

En el análisis de varianza a través de los tres ambientes, se presentaron efectos significativos ($p < 0,05$) de ambientes, genotipos y de la interacción $G \times A$ para la variable rendimiento en grano seco. La significancia encontrada para la interacción $G \times A$, indica la respuesta diferencial de los genotipos a las variaciones ambientales en los tres ambientes.

En los ambientes Ipiales y Pasto, donde hubo diferencias significativas entre genotipos, el rendimiento promedio de genotipos estuvo entre 747,5 y 1357,3 kg ha⁻¹ en grano seco (Cuadro 3).

En Ipiales, los genotipos con los rendimientos más altos tuvieron promedios entre 816 y 1652 kg ha⁻¹, con diferencias significativas sobre los genotipos ARUDN-3557 y VOUDN-3613, que presentaron los rendimientos

Cuadro 3. Promedios generales de rendimiento de arveja (*Pisum sativum* L.) en grano seco (kg ha⁻¹) de genotipos, ambientes y genotipos, en cada ambiente de evaluación en Nariño, Colombia. 2013-2014.

Table 3. General averages of pea (*Pisum sativum* L.) yield in dry grain (kg ha⁻¹) of genotypes, environments and genotypes, in each evaluation environment in Nariño, Colombia. 2013-2014.

Genotipos	Ambientes			Promedio genotipos
	Ipiales	Pasto	Tangua	
ILS 6522	1099 ab	862 c	800 a	920,6 bc
VOUDN-7311	932 ab	872 c	689 a	830,9 bc
VOUDN-7145	1652 a	1075 abc	859 a	1195,2 ab
ARUDN-3562	1444 ab	1526 a	1102 a	1357,3 a
ILS 6527	1433 ab	961 bc	1043 a	1145,6 abc
ARUDN-3557	683 b	837 c	722 a	747,5 c
ILS 6498	1036 ab	1303 abc	1037 a	1125,4 abc
Santa Isabel	1092 ab	1104 abc	845 a	1013,6 abc
VOUDN-7330	1567 ab	895 c	845 a	1102,3 abc
VOUDN-7336-2	816 ab	946 bc	897 a	886,4 bc
VOUDN-3613	680 b	1251 abc	846 a	925,8 bc
Alcalá	1393 ab	1473 ab	818 a	1227,8 ab
VOUDN-7350	1243 ab	1208 abc	981 a	1144,1 abc
Obonuco Andina	1341 ab	1448 ab	926 a	1238,1 ab
ILS 6524	1197 ab	1089 abc	738 a	1008,1 abc
Promedio ambientes	1173,9 A	1123,3 A	876,5 B	1057,9
Coefficiente de variación (%)	34,0	20,8	28,7	28,8

Medias seguidas por letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ($p < 0,05$), según prueba de Tukey / Means followed by equal letters in the same column are not significantly different ($p < 0.05$), according to Tukey test.

más bajos (683 y 680, respectivamente). Las variedades regionales: Santa Isabel, Alcalá y Obonuco Andina, también estuvieron en el grupo de genotipos con los rendimientos más altos de esta localidad (Cuadro 3).

En el ambiente Pasto, el rendimiento promedio fue de 1123,3 kg ha⁻¹. Genotipos con rendimientos por debajo de los 900 kg ha⁻¹ (VOUDN-7330, VOUDN-7311, ILS 6522 y ARUDN-3557) fueron estadísticamente inferiores a los genotipos ARUDN-3562, Alcalá y Obonuco Andina (1526, 1473 y 1448 kg ha⁻¹, respectivamente), que obtuvieron los promedios más altos. La variedad regional Santa Isabel, al igual que la Alcalá y Obonuco Andina, también se encontró dentro del grupo de genotipos con mejores rendimientos.

El genotipo con el mayor rendimiento a través de los tres ambientes fue el ARUDN-3562 (1357,3 kg ha⁻¹), el cual no difirió estadísticamente de los genotipos con rendimientos entre 1008,1 y 1238,1 kg ha⁻¹ (Obonuco Andina, Alcalá, VOUDN-7145, ILS 6527, VOUDN-7350, ILS 6498, VOUDN-7330, Santa Isabel e ILS 6524), pero si fue estadísticamente superior a los genotipos con rendimientos entre 747,5 y 925,8 kg ha⁻¹ (ARUDN-3557, VOUDN-7311, VOUDN-7336-2, ILS 6522 y VOUDN-3613), que presentaron los promedios más bajos. En cuanto a ambientes, los rendimientos en grano seco más altos se encontraron en Ipiales y Pasto (1173,9 y 1123,3 kg ha⁻¹ respectivamente), los cuales fueron estadísticamente superiores al encontrado en Tangua (876,5 kg ha⁻¹) (Cuadro 3).

Número de granos por vaina (gpv)

El ambiente de Ipiales presentó valores entre 3,9 y 5,2 gpv, pero no hubo diferencias significativas entre genotipos. En los ambientes Pasto y Tangua se observaron diferencias estadísticas ($p < 0,05$); en Pasto los genotipos

VOUDN-7145, ARUDN-3562, VOUDN-7330, VOUDN-3613, VOUDN-7350 y Obonuco Andina, presentaron los promedios superiores (>5,0), mientras que en Tangua fueron los genotipos ILS 6498 y Alcalá (>6,9). En el análisis combinado, el rango de granos por vaina entre genotipos fue de 4,4 a 5,4, sin mostrar diferencias significativas. En cuanto a ambientes, en Pasto e Ipiales los promedios no difirieron estadísticamente, pero sí en el ambiente Tangua, que alcanzó el mayor promedio para esta variable con 5,4 gpv (Cuadro 4).

Cuadro 4. Promedios de número de granos por vaina por genotipo de arveja (*Pisum sativum* L.) en tres ambientes de evaluación en Nariño, Colombia. 2013-2014.

Table 4. Averages of number of grains per pod by pea (*Pisum sativum* L.) genotype and evaluation environments in Nariño, Colombia. 2013-2014.

Genotipos	Ambientes			Promedio genotipos
	Ipiales	Pasto	Tangua	
ILS 6522	4,7 a	4,4 ab	5,0 ab	4,7 a
VOUDN-7311	4,4 a	4,1 ab	4,6 b	4,4 a
VOUDN-7145	4,0 a	5,1 a	4,6 b	4,6 a
ARUDN-3562	4,7 a	5,1 a	6,1 ab	5,3 a
ILS 6527	4,4 a	4,5 ab	5,2 ab	4,7 a
ARUDN-3557	4,0 a	4,5 ab	5,0 ab	4,4 a
ILS 6498	4,0 a	3,5 b	7,1 a	4,9 a
Santa Isabel	4,6 a	4,8 ab	5,3 ab	4,9 a
VOUDN-7330	4,7 a	5,1 a	4,2 b	4,7 a
VOUDN-7336-2	3,9 a	4,5 ab	5,7 ab	4,7 a
VOUDN-3613	5,2 a	5,5 a	4,4 b	4,9 a
Alcalá	4,3 a	4,5 ab	6,9 a	5,2 a
VOUDN-7350	5,1 a	5,0 a	5,8 ab	5,3 a
Obonuco Andina	4,8 a	5,0 a	6,3 ab	5,4 a
ILS 6524	4,9 a	4,2 ab	4,3 b	4,4 a
Promedio ambientes	4,5 B	4,6 B	5,4 A	4,8
Coefficiente de variación (%)	18,3	13,6	24,1	19,8

Medias seguidas por letras iguales en la misma columna no son significativamente diferentes ($p < 0,05$), según prueba de Tukey / Means followed by equal letters in the same column are not significantly different ($p < 0,05$), according to Tukey test.

Análisis de estabilidad fenotípica – biplot GGE

El modelo GGE biplot para rendimiento de grano seco, en el cual se basan las Figuras 1 a 4, se generó en dos dimensiones, que corresponden a los dos primeros componentes principales. El primer componente (PC1) explicó el 65,05 % de la varianza total y el segundo (PC2) el 29,37 %. En total, los dos primeros componentes principales explicaron el 94,42 % de los efectos combinados de genotipos y de la interacción genotipo x ambiente. Los ambientes se ubicaron en dos sectores del biplot, Ipiales en el cuadrante superior derecho, Pasto y Tangua en el cuadrante inferior derecho; mientras que los genotipos se distribuyeron en los cuatro cuadrantes de la Figura 1.

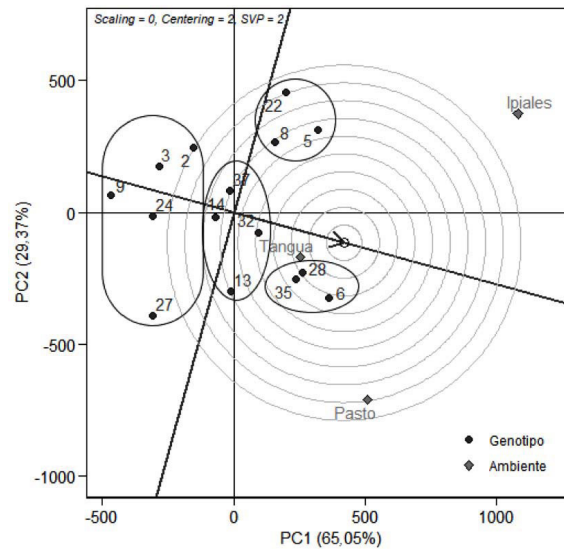


Figura 1. Modelo GGE – biplot para la comparación de quince genotipos de arveja (*Pisum sativum* L.) respecto al genotipo ideal. Nariño, Colombia. 2013-2014.

2- ILS 6522; 3- VOUDN-7311(2006B); 5- VOUDN-7145 (2005A); 6-ARUDN-3562; 8-ILS 6527; 9- ARUDN-3557; 13- ILS 6498; 14- Santa Isabel; 22- VOUDN-7330 (2006B); 24-VOUDN-7336-2 (2006B); 27- VOUDN-3613; 28- Alcalá; 32- VOUDN-7350 (2006B); 35- Obonuco Andina; 37- ILS 6524.

Figure 1. GGE - biplot model for the comparison of fifteen pea (*Pisum sativum* L.) genotypes regarding the ideal genotype. Nariño, Colombia. 2013-2014.

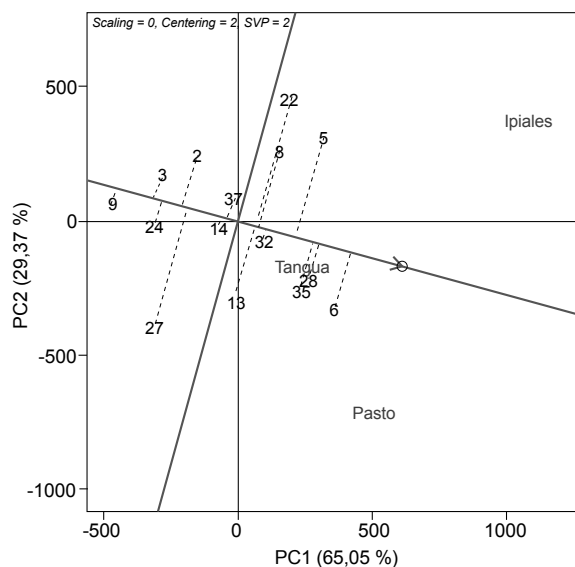


Figura 2. Modelo GGE-biplot basado en el rendimiento medio de grano seco y estabilidad de quince genotipos de arveja (*Pisum sativum* L.) evaluados en tres ambientes. Nariño, Colombia. 2013-2014.

2- ILS 6522; 3- VOUDN-7311(2006B); 5- VOUDN-7145 (2005A); 6-ARUDN-3562; 8-ILS 6527; 9- ARUDN-3557; 13- ILS 6498; 14- Santa Isabel; 22- VOUDN-7330 (2006B); 24-VOUDN-7336-2 (2006B); 27- VOUDN-3613; 28- Alcalá; 32- VOUDN-7350 (2006B); 35- Obonuco Andina; 37- ILS 6524.

Figure 2. BGE-biplot model based on the average dry grain yield and stability of fifteen pea (*Pisum sativum* L.) genotypes evaluated in three environments. Nariño, Colombia. 2013-2014.

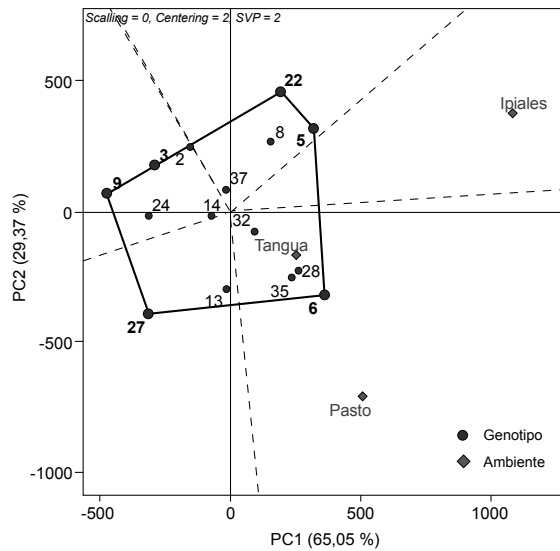


Figura 3. Mega-ambientes establecidos según el Biplot GGE para rendimiento en grano seco de quince genotipos de arveja (*Pisum sativum* L.) evaluados en tres ambientes de Nariño, Colombia. 2013 – 2014

2- ILS 6522; 3- VOUDN-7311(2006B); 5- VOUDN-7145 (2005A); 6-ARUDN-3562; 8-ILS 6527; 9- ARUDN-3557; 13- ILS 6498; 14- Santa Isabel; 22- VOUDN-7330 (2006B); 24-VOUDN-7336-2 (2006B); 27- VOUDN-3613; 28- Alcalá; 32- VOUDN-7350 (2006B); 35- Obonuco Andina; 37- ILS 6524.

Figure 3. Mega-environments set according to the GGE Biplot for dry grain yield of fifteen pea (*Pisum sativum* L.) genotypes evaluated in three environments of Nariño, Colombia. 2013 – 2014.

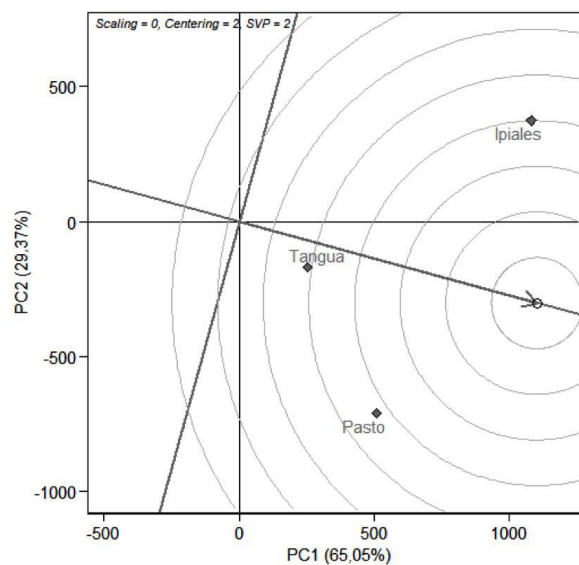


Figura 4. Modelo GGE biplot para comparación de ambientes de evaluación de genotipos de arveja (*Pisum sativum* L.), con respecto al ambiente de prueba ideal. Nariño, Colombia. 2013-2014.

2- ILS 6522; 3- VOUDN-7311(2006B); 5- VOUDN-7145 (2005A); 6-ARUDN-3562; 8-ILS 6527; 9- ARUDN-3557; 13- ILS 6498; 14- Santa Isabel; 22- VOUDN-7330 (2006B); 24-VOUDN-7336-2 (2006B); 27- VOUDN-3613; 28- Alcalá; 32- VOUDN-7350 (2006B); 35- Obonuco Andina; 37- ILS 6524.

Figure 4. GGE biplot model for comparing environments of evaluation of pea (*Pisum sativum* L.) genotypes, regarding the ideal test environment. Nariño, Colombia. 2013-2014.

Para el análisis, en las Figuras 1, 2 y 4 se utilizó una recta auxiliar que pasa por el origen del biplot y la media de las coordenadas de los ambientes, denominada eje de abscisas del ambiente promedio (EAA). En la Figura 1, el punto sobre el EAA, proyectado desde el genotipo con mejor rendimiento, representa a un genotipo teórico deseable, por presentar alta estabilidad y el mayor rendimiento. En la Figura 2, la distancia entre los genotipos y el EAA indican el grado de estabilidad respecto al ambiente medio. En la Figura 4, el punto proyectado desde el ambiente con el mayor rendimiento sobre el EAA, representa un ambiente de prueba ideal.

Con base en el genotipo teórico deseable y los círculos concéntricos alrededor de este, se puede observar la formación de cuatro grupos. El primero, con los genotipos ARUDN-3562, Alcalá y Obonuco Andina, más cercanos al punto de referencia (Figura 1), los cuales se caracterizaron por estar dentro del grupo con los mayores rendimientos. Alcalá y Obonuco Andina correspondieron a variedades comerciales utilizadas en el departamento de Nariño, las cuales presentaron mayor estabilidad que el genotipo ARUDN-3562, por su cercanía con el EAA (Figura 2). El segundo grupo conformado por los genotipos ILS 6498, Santa Isabel (variedad comercial), VOUDN-7350 e ILS 6524, presentaron rendimientos intermedios, entre 1008 y 1125 kg ha⁻¹ (Cuadro 3), mayor distancia al punto de referencia que el primer grupo (Figura 1) y mayor estabilidad (Figura 2), con excepción del genotipo ILS 6498. El tercero, con los genotipos VOUDN-7145, ILS 6527 y VOUDN-7330, se caracterizó por estar alejado del punto de referencia (Figura 1), con buenos rendimientos (>1100 kg ha⁻¹), pero con baja estabilidad en comparación con los demás grupos (Figura 2). El cuarto, compuesto por los genotipos ILS 6522, VOUDN-7311, ARUDN-3557, VOUDN-7336-2 y VOUDN-3613, fue el más distante del punto de referencia (Figura 1), con los menores rendimientos (< a 925 kg ha⁻¹), pero con diferentes grados de estabilidad, con VOUDN-7336-2 como el más estable, seguido por ARUDN-3557, VOUDN-7311, ILS 6522 y el genotipo VOUDN-3613 con la más baja estabilidad (Figura 2).

En la Figura 3 se puede apreciar la formación de un polígono con los genotipos que se encuentran más alejados del origen de coordenadas, correspondientes a los genotipos vértice ARUDN-3557, VOUDN-7311, VOUDN-7330, VOUDN-7145, ARUDN-3562 y VOUDN-3613. Estos genotipos son los que mostraron mayor sensibilidad a los estímulos ambientales.

El modelo GGE biplot (Figura 3) mostró que Pasto y Tangua conformaron un mega ambiente, por estar dentro del mismo sector definido por las líneas punteadas. Pasto fue el que más aportó a la interacción al estar más alejado del origen de coordenadas. Los genotipos que mostraron mejor comportamiento en este mega ambiente fueron ARUDN-3562, Alcalá, VOUDN-7350 y Obonuco Andina, pertenecientes al grupo 1 y 2. Según el análisis, los demás genotipos no se asociaron a ningún ambiente o mega ambiente específico.

Un ambiente de prueba ideal se define en la Figura 4, que corresponde a un punto sobre el EAA en la dirección positiva y con una distancia al origen del biplot que es la máxima de todas las distancias de los vectores ambiente y está representado por el centro de los círculos concéntricos. Este análisis permitió identificar a Ipiales y Pasto como los mejores ambientes para la selección de genotipos, dada su cercanía al ambiente de prueba ideal. Esto implica que en estas localidades fue más eficiente la discriminación de genotipos, lo cual se pudo evidenciar con los resultados del análisis de varianza y la comparación de medias (Cuadro 3).

Discusión

Durante el periodo de evaluación, las condiciones climáticas de las tres localidades fueron muy similares, no tuvieron gran variación con respecto a la media anual de los últimos diez años (Cuadro 1) y no se presentaron problemas fitosanitarios que afectaran los experimentos; en consecuencia, los rendimientos obtenidos por los testigos estuvieron dentro del rango reportado para estas variedades (Campuzano et al., 2003; Secretaría de Agricultura y

Desarrollo Rural & Universidad Sergio Arboleda, 2017); esto significa que los ambientes presentaron condiciones favorables para la producción de arveja y para la evaluación de los genotipos. Sin embargo, los genotipos alcanzaron los mayores rendimientos en Ipiales (477,3 mm) y Pasto (303,78 mm), es posible que en estos ambientes se presentó una mayor precipitación que en Tangua (249 mm), resultados que concuerdan con lo mencionado por González & Ligarreto (2006), quienes afirmaron que la precipitación es un factor climático determinante en la producción y desarrollo de la arveja, con grandes efectos sobre el rendimiento y sus componentes.

El modelo utilizado explicó más del 90 % de la variación existente en los genotipos estudiados, lo que permitió realizar un análisis adecuado y la correcta interpretación de la información obtenida en este estudio.

De los genotipos estudiados, el identificado con el número 6 en las Figuras 1 a 4, correspondió a ARUDN-3562, de origen holandés y de grano color crema. Este presentó rendimiento similar a los testigos y buena estabilidad, además de presentar el mayor número de granos por vaina dentro de los genotipos evaluados; por lo que se debe tener en cuenta como parental o línea promisoría en programas de mejoramiento genético.

Sobresalió el genotipo VOUDN-7350, que por su alta estabilidad y rendimiento fue similar al testigo Santa Isabel. Este testigo ha sido sembrado por más de 40 años en la zona productora de Nariño y, por sus características, ha sido utilizado como parental de líneas avanzadas y variedades (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2015). Al igual que Santa Isabel, el genotipo VOUDN-7350 podría ser considerado como parental, con la ventaja de producir granos de color verde e hilum blanco, rasgos de gran aceptación en el mercado nacional.

Hubo alta variabilidad dentro de los genotipos estudiados en cuanto a rendimiento y estabilidad; además, los genotipos evaluados no se asociaron a un ambiente en particular (Figura 1). Estas características son deseables en un grupo de genotipos que formen parte de una línea de mejoramiento (Cruz et al., 2014). Lo anterior constituye un primer paso para el desarrollo de nuevas variedades de arveja, adaptadas a las condiciones locales, que fortalezcan el mercado en grano seco como alternativa a la comercialización de vaina en fresco y el reingreso a zonas donde se redujo el área cultivada; esas nuevas variedades se constituirían en una alternativa a las variedades Piquinegra y Santa Isabel, sembradas en el departamento de Nariño.

Respecto a la capacidad de discriminación de los ambientes, Tangua y Pasto pertenecen a un mismo mega ambiente (Figura 3); sin embargo, en el ambiente de Tangua se presentaron los menores rendimientos y se ubicó más alejado del ambiente ideal (Figura 4). Por tanto, para próximas evaluaciones se podría usar el ambiente de Pasto, en primer lugar, por permitir una mejor discriminación de los genotipos y, en segundo lugar, por estar ubicado en la zona centro del departamento de Nariño, donde la accesibilidad es mayor. Ipiales también es un ambiente discriminante y al presentar condiciones diferentes a las de Pasto, se debe tener en cuenta en la evaluación de genotipos de esta especie.

Conclusiones

El modelo de estabilidad fenotípica, con base en el GGE Biplot, permitió hacer un análisis eficiente de la interacción genotipo por ambiente.

Se encontró alta variabilidad en rendimiento y estabilidad fenotípica, por esta razón, los genotipos estudiados se constituyen en germoplasma de interés para ser parte del programa de mejoramiento de arveja en el departamento, amplía la diversidad de la colección actual y la posibilidad de desarrollar nuevas variedades adaptadas a la región.

Se identificaron dos genotipos, ARUDN-3562 y VOUDN-7350, con los cuales se podría avanzar en forma individual o ser usados como parentales, por su estabilidad fenotípica y por superar la media de los genotipos evaluados, en cuanto a rendimiento.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al equipo técnico y administrativo de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), por su apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto “14 genotipos de arveja grano color crema y veinte de grano verde evaluados morfo agronómica y por tipo de uso, aceptados por el consumidor e incorporados para un programa de mejoramiento genético”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia.

Referencias

- Araméndiz, H., Espitia, M., Agámez, A., Cardona, C., & Robles, J. (2007). Estabilidad fenotípica de genotipos de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) en el caribe colombiano. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 10(2), 65–73. <https://doi.org/10.31910/rudca.v10.n2.2007.585>
- Campuzano, L., Yepes, B., Benavides, J., Bolaños, M., Arcila, B., López, C., & Cepeda, G. (2003). Obonuco Andina nueva variedad mejorada de arveja para la zona de economía campesina del sur de Nariño. *Revista Regional Novedades Técnicas*, 2003, 26–28. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/953/42731_46828.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cruz, C., Carneiro, P., & Regazzi, A. (2014). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético* (3ª Ed.). Editora UFV. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015, marzo). El cultivo de la arveja en Colombia. *Boletín Mensual Insumos y Factores Asociados a la Producción Agropecuaria*, 33, 1–12. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos31_-mar_2015.pdf
- Eberhart, S., & Russell, W. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crops Science*, 6(1), 36–40. <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>
- Frutos-Bernal, M. (2011). *Interacción genotipo - ambiente: GGE biplot y modelos AMMI* [Tesis de maestría, Universidad de Salamanca]. Repositorio documental GREDOS. <http://hdl.handle.net/10366/121900>
- González, F., & Ligarreto, G. (2006). Rendimiento de ocho genotipos promisorios de arveja arbustiva (*Pisum sativum* L.) bajo sistema de agricultura protegida. *Revista Fitotecnia Colombiana*, 6(2), 52–61.
- Gordón-Mendoza R., Camargo-Buitrago, I., Franco-Barrera, J., & González-Saavedra, A. (2006). Evaluación de la adaptabilidad y estabilidad de 14 híbridos de maíz, Azuero, Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 17(2), 189–199. <https://doi.org/10.15517/am.v17i2.5159>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Valores mensuales de temperatura y precipitación de Nariño, 1956–2017*. http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual/-/document_library_display/xYv1Pc4uxk1Y/view/71473013
- Ledesma-Ramírez, L., Solís-Moya, E., Suaste-Franco, M., Rodríguez-Caracheo, J., & De la Cruz-Gonzalez, M. (2012). Análisis GGE Biplot del rendimiento de trigo (*Triticum* spp.) con riego normal y restringido en el Bajío, México. *Agrociencia*, 46(2), 119–131. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n2/v46n2a3.pdf>
- Ligarreto, G. A., Castro, O. A., y Cháves, B. (2015). Estabilidad fenotípica de una colección de frijol andino (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo arbustivo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 109–118. <https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.459>

- Lozano-Ramírez, A., Santacruz-Varela, A., San-Vicente-García, F., Crossa, J., Burgueño, J. & Molina-Galán, J. D. (2015). Modelación de la interacción genotipo \times ambiente en rendimiento de híbridos de maíz blanco en ambientes múltiples. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 337–347. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n4/v38n4a1.pdf>
- Muñoz, M. A. (2012). *Interacción genotipo ambiente de 20 líneas de arveja arbustiva Pisum sativum L. para cinco municipios de la zona sur del departamento de Nariño* [Tesis de Maestría, Universidad de Nariño]. Sistema Institucional de Recursos Digitales de la Universidad de Nariño. <http://sired.udenar.edu.co/3335/>
- Olivoto, T., & Lúcio, D. (2020). Metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 783–789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>
- Peñaranda, G., & Molina, D. (2011). La producción de arveja (*Pisum sativum L.*) en la vereda Monteadentro, provincia de Pamplona, Norte de Santander. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, 11(1), 43–56. http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/FACE/article/view/334/322
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. <https://www.R-project.org/>
- Red de información y comunicación del sector Agropecuario Colombiano. (2019). *Comparativo de área, producción, rendimiento y participación departamental por cultivo*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3#>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Nariño, & Universidad Sergio Arboleda. (2017). *Consolidado Agropecuario de Nariño 2017*. SCRIBD. <https://es.scribd.com/document/479026166/CONSOLIDADO-AGROPECUARIO-NARINO-2017-3>
- Torres-Martínez, F. J., Rivadeneira-Miranda, C. N., & Castillo-Marín, A. J. (2020). Producción y comercialización de arveja en el departamento de Nariño-Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 129–140. <https://doi.org/10.15517/AM.V31I1.36776>
- Vallejo-Cabrera, F. A., & Estrada-Salazar, E. I. (2013). *Mejoramiento genético de plantas* (2ª Ed.). Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas-Escobar, E. A., Vargas-Sánchez, J. E., & Baena-García, D. (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. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n1.43417>
- Yan, W., Hunt, L., Sheng, Q., & Szlavniks, Z. (2000). Cultivar evaluation and mega environment investigation based on the GGE Biplot. *Crop Science*, 40(3), 597–605. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.403597x>
- Yan, W., & Kang, M. (2003). *GGE Biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists* (1st Ed.) CRC Press Taylor & Francis Group. <https://www.routledge.com/GGE-Biplot-Analysis-A-Graphical-Tool-for-Breeders-Geneticists-and-Agronomists/Yan-Kang/p/book/9780367454791>
- Zobel, R. W., Wright, M. J., & Gauch, H. G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agronomy Journal*, 80(3), 388–393. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>