

Adaptabilidad y estabilidad fenotípica para el rendimiento en vaina verde de 20 líneas de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) con gen afila*

Adaptability and phenotypic stability for the yield in green pod of 20 lines of voluble peas (*Pisum sativum* L.) with afila gene^{1*}

HERRERA-PORTILLA, DIANA-MILENA²; CHECA-CORAL, OSCAR-EDUARDO³; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, DANIEL-MARINO⁴

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 2 de Agosto 2021

Aprobado para publicación: 25 de Mayo 2022

* Título del proyecto de origen: "Investigación para el mejoramiento de la tecnología de la producción de arveja (*Pisum sativum* L.) en el departamento de Nariño". Financiación: Sistema General de Regalías. Culminación: 20 de diciembre de 2020.

- 1 Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Grupo de Investigación Cultivos Andinos (GRICAND). Magíster en Ciencias Agrícolas. Pasto, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-7992-7500>
- 2 Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Grupo de Investigación Cultivos Andinos (GRICAND). Doctor en Fitomejoramiento. Pasto, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-6929-7717>
- 3 Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Grupo de Investigación Cultivos Andinos (GRICAND). Magíster en Suelos. Pasto, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-9152-5897>

Correspondencia: ocheca@udenar.edu.co

Cómo citar este artículo

HERRERA-PORTILLA, DIANA-MILENA; CHECA-CORAL, OSCAR-EDUARDO; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, DANIEL-MARINO. Adaptabilidad y estabilidad fenotípica para el rendimiento en vaina verde de 20 líneas de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) con gen afila. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 21, n. 1, 2023, p.73-84. Doi:<https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1977>

RESUMEN

En Nariño, las variedades de arveja voluble, debido a su alta capacidad productiva, no logran mantenerse erguidas a pesar del uso de sistemas de tutorado, lo que genera acame y pérdidas en el rendimiento y la calidad del producto. Una opción viable para mitigar el problema es el uso de genotipos volubles con el gen *afila* que reemplaza hojas por zarcillos, favoreciendo el agarre de las plantas sobre las cuerdas que sirven de tutores. En busca de una solución a este problema, se evaluó la adaptabilidad y estabilidad fenotípica para el rendimiento en vaina verde de 20 líneas de arveja voluble con el gen *afila* y los testigos de hoja normal Obonuco Andina y Sindamanoy en cinco municipios del sur del departamento de Nariño. En cada localidad se aplicó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los datos obtenidos se analizaron utilizando los modelos de Eberhart y Russell y AMMI. En el modelo de Eberhart y Russell, los ambientes más favorables fueron Puerres y Gualmatán y el ambiente más desfavorable fue Potosí. Las líneas GR15, GR10 y la variedad Sindamanoy fueron seleccionadas como de alto rendimiento, adaptables y predecibles. El análisis de varianza para el modelo AMMI indicó un alto efecto ambiental resultante de ambientes contrastantes y baja diversidad entre las líneas con el gen *afila* evaluadas. El índice de selección (GSII) obtenido a partir del valor de estabilidad (ASV) y la clasificación por rendimiento, permitió la identificación y selección por orden de mérito de los genotipos Obonuco Andina, GR15, GR14, GR28, GR10, GR2, GR23, Sindamanoy y GR3 como los de mayor estabilidad y rendimiento. La coincidencia en la selección entre los modelos Eberhart y Russell y AMMI fue del 33,3%.

ABSTRACT

In Nariño, the climbing pea varieties, due to their high production capacity, are unable to stand upright despite the use of trellising systems, resulting in lodging and losses in yield and product quality. A viable option to mitigate the problem is the use of climbing genotypes with the *afila* gene that replaces leaves with tendrils, favoring the grip of the plants on the strings that serve as tutors. In search of a solution to this problem, the adaptability and phenotypic stability for green pod yield of 20 climbing pea lines with the *afila* gene and the normal-leaf controls Obonuco Andina and Sindamanoy were evaluated in five municipalities in the southern part of the department of Nariño. A randomized complete block design with four replications was used at each location. The data obtained were analyzed using the Eberhart and Russell and AMMI models. In the Eberhart and Russell model, the most favorable environments were Puerres and Gualmatán and the most unfavorable environment was Potosí. Lines GR15, GR10 and the Sindamanoy variety were selected as high yielding, adaptable and predictable. The analysis of variance for the AMMI model indicated a high environmental effect, resulting from contrasting environments and low diversity between the lines with the *afila* gene evaluated. The selection index (GSII) obtained from the stability value (ASV) and the classification by yield, allowed the identification and selection in order of merit of the genotypes Obonuco Andina, GR15, GR14, GR28, GR10, GR2, GR23, Sindamanoy and GR3 as those with the highest stability and yield. The coincidence in selection between the Eberhart and Russell and AMMI models was 33,3%.

PALABRAS CLAVE:

Zarcillos; Interacción genotipo ambiente; Guisante; Variedades; Selección; Diversidad; Productividad; Mejoramiento; Leguminosa; Biplot.

KEYWORDS:

Tendrils; Genotype environment interaction; Pea; Varieties; Selection; Diversity; Productivity; Improvement; Legume; Biplot.

INTRODUCCIÓN

En Colombia el cultivo de arveja es de gran importancia en las zonas con alturas entre los 2.400 y 2.900 msnm. El departamento de Nariño es el principal productor de arveja del país, con un promedio de 48.264 ton anuales, equivalentes al 55,2 % de la producción nacional (Checa *et al.*, 2017), siendo las variedades más comúnmente utilizadas Obonuco Andina, Obonuco San Isidro, Sureña y Sindamanoy, de hábito voluble y crecimiento indeterminado con alturas que superan los 2,5 m, por lo que requieren sistemas de tutorado fortalecidos para evitar el volcamiento o acame de las plantas.

La productividad general de la arveja se aborda principalmente mediante el mejoramiento de la arquitectura de la planta, seleccionando tipos de plantas que combinan la resistencia al acame, la altura de la planta y la resistencia a factores bióticos y abióticos (Parihar *et al.*, 2020), siendo el gen *afila* (*af*) y el gen de la altura de planta (*Le*) los que explican la mayor parte de la variación en el acame de las plantas de arveja (Smitchger and Weeden, 2019)

En arveja, el gen *afila* (*af*) en condición homocigota recesiva es el responsable del remplazo de las hojas normales por zarcillos (Checa *et al.*, 2020). La característica conferida por el gen *afila* (*af*), se ha introducido en variedades arbustivas para evitar el acame o volcamiento, al permitir que a través de los innumerables zarcillos las plantas se entrelacen y logren mantenerse erectas hasta la cosecha, cuanto mayor es el desarrollo del zarcillo, mayor es la resistencia al volcamiento además, la presencia del gen *afila* favorece la circulación de aire reduciendo la presión de enfermedades foliares (Rosero and Checa, 2021). En diferentes regiones del mundo se han reportado variedades mejoradas de arveja de hábito arbustivo y con gen *afila*, entre ellas, Solara, Alex, Choque, Amadeus, Brisca, Charleston, Astucen y Golijat (Checa *et al.*, 2021)

Diferentes métodos han sido usados para analizar la interacción genotipo ambiente (GE) y la estabilidad fenotípica para rendimiento (Rana *et al.*, 2021; Reckling *et al.*, 2021). Aunque los métodos multivariados proporcionan información valiosa sobre la interacción genotipo ambiente (GE), los métodos univariados son también alternativas útiles para complementar la eficiencia en el mejoramiento por selección (Mohammadi *et al.*, 2021); entre los principales métodos para evaluar la interacción genotipo ambiente se encuentran Eberhart and Russell (1966), AMMI (Zobel *et al.*, 1988) y el modelo mixto (Hendersson, 1975).

La estabilidad del rendimiento es especialmente importante en el cultivo de leguminosas como la arveja, por ser cultivos menos estables que otras especies vegetales (Watson *et al.*, 2017; Reckling *et al.*, 2020). En los últimos años la mayor variabilidad del clima se asocia a una menor estabilidad de los rendimientos en diferentes cultivos (Müller *et al.*, 2018; Najafi *et al.*, 2018), en consecuencia, la estabilidad del rendimiento ha ganado especial importancia en la investigación sobre los impactos del cambio climático (Tigchelaar *et al.*, 2018; Webber *et al.*, 2020).

El Grupo de Investigación en Cultivos Andinos (GRICAND), realizó la introgresión del gen *afila* desde variedades arbustivas a genotipos volubles, con el fin de obtener plantas de arveja con gen *afila* para mejorar la capacidad de agarre sobre los hilos que sirven de tutor, reduciendo el acame o volcamiento (Riascos and Checa, 2018). En el proceso se obtuvo un grupo de líneas de arveja volubles con gen *afila* y con componentes de rendimientos similares a las variedades comerciales de hojas normales. Para que estas líneas se constituyan en una nueva opción productiva es necesario establecer su capacidad de rendimiento y adaptación en las zonas productoras de Nariño. El objetivo de la presente investigación fue determinar la adaptabilidad y estabilidad fenotípica de 20 líneas de arveja voluble con gen *afila* en diferentes ambientes del sur del departamento de Nariño y comparar la selección realizada a través de los métodos de Eberhart y Russell y AMMI.

MÉTODO

Localización

Las actividades de campo se llevaron a cabo en cinco municipios del sur del departamento de Nariño, que corresponden a Gualmatán (N00.91001°-W077.56337°), Ipiales (N00.86249°- W077.57143°), Potosí (N00.82494°- W077.56630°), Puerres (N00.86422°- W077.49900°) y Pupiales (N00.86792°- W077.64050°) con alturas de 2961, 2706, 2875, 2616 y 2754 msnm respectivamente. La precipitación registrada durante el cultivo en cada localidad se observa en el cuadro 1, de acuerdo con los datos consolidados y reportados para la época del presente estudio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, 2019).

Cuadro 1. Datos de precipitación (mm) durante los meses del ciclo de cultivo de 22 genotipos de arveja (*Pisum sativum* L) evaluados en cinco localidades del departamento de Nariño.

Meses del cultivo						
Localidad	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Total
Potosí	170,2	49,9	88,6	116,5	28,8	454
Pupiales	179,9	82,8	107,9	104,2	43,2	518
Ipiales	137,8	43,4	57,2	70,9	18,8	328,1
Puerres	68,3	176,6	88,2	141,8	85,5	560,4
Gualmatán	162,8	111,6	118,3	70,5	49,6	512,8

Fuente: IDEAM (2019)

Material Genético

Se trabajó con 20 líneas (cuadro 2) de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) con gen afila, pertenecientes al programa de mejoramiento de arveja del Grupo de investigación de Cultivos Andinos GRICAND, de la Universidad de Nariño. Estas líneas fueron obtenidas por cruzamientos y usando el método de retrocruzamiento abreviado (Checa *et al.*, 2020), en donde los padres recurrentes fueron las variedades Sindamano y Obonuco San Isidro y Obonuco Andina y los padres donantes del gen afila fueron las accesiones Dove, ILS3568 e ILS3575.

Cuadro 2. Identificación de las 20 líneas con gen afila y dos testigos comerciales de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) evaluadas en este estudio.

Identificación genotipos	Genealogía	Identificación genotipos	Genealogía
GR 1	SX3575RC1F5L18	GR 17	SIXDRC1F5L29
GR 2	SX3575F51	GR 18	SIXDRC1F5L83
GR 3	SX3575F3RC1F5L3	GR 20	AXDF5L11
GR 4	SX3575RC1F5L11	GR 21	OBONUCO ANDINA
GR 7	AXDRC2F5L5	GR 22	SINDAMANOY
GR 9	SIXDRC1F5L48	GR 23	SIXDRC1F5L83 SIP1
GR 10	SX3575RC1F5L1	GR 24	SX3575RC1F5L18SIP1
GR 11	SX3568RC2F5L21	GR 25	SX3575RC1F5L3SIP3
GR 14	SX3568RC2F5L31	GR 27	AXDRC2F5L5SIP2
GR 15	SX3575F5L6	GR 28	SX3568RC2F5L31SIP1
GR 16	SIXDRC1F5L51	GR 29	SxDRC1F5L45SIP1

Diseño experimental

En cada localidad se estableció un ensayo con un diseño de bloques completo al azar con 22 tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos correspondieron a las 20 líneas de arveja voluble con gen afila y a dos testigos comerciales de hojas no afila identificados como Andina y Sindamanoy. La unidad experimental estuvo constituida por dos surcos de cuatro m de largo, con distancias entre surcos de 1,2 m y distancia entre sitios de 0,10 m depositando una semilla por sitio. La parcela útil correspondió a un área de 4,56 m² resultantes de descartar las plantas extremas de los surcos de cada unidad experimental. El periodo de evaluación fue durante el primer semestre de los años 2016 y 2017. La variable evaluada fue el rendimiento en vaina verde llevado a tha⁻¹

Análisis estadístico

La adaptabilidad y estabilidad se analizó usando el modelo univariado de Eberhart & Russell (1966) (ecuación 1) y el modelo multivariado AMMI (Crossa *et al.*, 1990) (ecuación 2) utilizando el programa GENES (Cruz, 2001).

El modelo de Eberhart y Russell:

$$Y_{ij} = U_i + B_i l_j + a_{ij} + \sum_{ij} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde: Y_i = promedio del genotipo i en el ambiente j ; U_i = Promedio del genotipo i en todos los ambientes; B_i = Coeficiente de regresión, mide la respuesta del genotipo i al variar los ambientes; l_j = Índice ambiental del ambiente j -ésimo que se calcula como desviación del promedio de los genotipos en un ambiente dado a partir del promedio general; a_{ij} = Desviación de la regresión; \sum_{ij} = Error experimental promedio. De acuerdo con este modelo, un genotipo es estable si el coeficiente de regresión es igual a uno (y predecible cuando las desviaciones de la regresión son iguales a cero).

Modelo AMMI

$$Y_{ge} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum_{k=1}^n \lambda_n \delta_{gn} \delta_{en} + \rho_{ge} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde Y_{ge} es el rendimiento del genotipo g en el ambiente e ; μ es la media general; α_g es la desviación del genotipo de la media; β_e es la desviación del entorno; λ_n es el valor singular del componente principal (PC) n y en consecuencia, λ_n^2 es su valor propio; δ_{gn} es el valor del vector propio para el genotipo g y el componente n ; δ_{en} es el valor del vector propio para el entorno e y el componente n , con ambos vectores propios escalados como vectores unitarios y ρ_{ge} es el residual. El valor de estabilidad AMMI (ASV) se utilizó para comparar la estabilidad de los genotipos (Bocianowski *et al.*, 2019; Purchase *et al.*, 2013), según la ecuación 3:

$$ASV = \sqrt{[(SSIPCA1/SSIPCA2) IPCA_1]^2 + IPCA_2^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde SSIPCA1 y SSIPCA2 son las sumas de cuadrados del primer y segundo eje del componente principal de la interacción respectivamente; $IPCA_1$ e $IPCA_2$ es el valor genotípico de cada genotipo en el modelo AMMI; ASV es la distancia desde cero en dos dimensiones en el diagrama de dispersión de los valores de $IPCA_1$ frente a las puntuaciones de $IPCA_2$.

El índice de selección de genotipos (GSI) se calculó para cada genotipo con la ecuación 4:

$$GSI_i = RY_i + RASV_i \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde GS_i es el índice de selección para el i -ésimo genotipo; RY_i es el orden de clasificación de rendimiento medio para el i -ésimo genotipo; $RASV_i$ es el orden de clasificación del valor de estabilidad AMMI para el i -ésimo genotipo, entendiendo que el valor que más se aproxima cero es más estable.

RESULTADOS

Adaptabilidad y Estabilidad

En el presente estudio la evaluación de la interacción genotipo por ambiente de 20 líneas y dos testigos comerciales permitió determinar que existe una interacción significativa localidad por genotipo (Cuadro 3) sugiere un comportamiento diferencial en el rendimiento de los genotipos a través de las cinco localidades. Lo anterior está relacionado con la naturaleza de la variable rendimiento que es de herencia cuantitativa. De acuerdo con Bocianowski *et al.* (2019), el rendimiento en arveja (*Pisum sativum* L.) está determinado por múltiples genes que causan cambios en la expresión de los genotipos en función de la oferta ambiental de cada zona.

Cuadro 3. Parámetros de adaptabilidad y estabilidad de Eberhart y Russell, en la evaluación de rendimiento en vaina verde de 20 líneas de arveja con gen afila (*P. sativum* L.) y dos testigos en cinco municipios del sur de Nariño Colombia.

Localidad	Gualmatán	Ipiales	Potosí	Puerres	Pupiales
Media (t ha ⁻¹)	15,38	12,09	4,49	16,08	12,78
Índice Ambiental	3,21	-0,79	-7,67	3,92	0,61
Genotipo	Rendimiento t ha ⁻¹		$\beta = 1$		S ² d
GR15	12,96 abcde		1,00 ns		0,09 ns
GR10	12,38 abcde		1,12 ns		-0,50 ns
Sindamanoy	12,34 abcde		1,00 ns		1,18 ns
GR2	13,68 abc		1,34**		-0,72 ns
GR28	13,87 ab		0,81*		-0,45 ns
GR23	12,26 abcde		0,74**		0,01 ns
Andina	14,22 a		1,14 ns		1,62*
GR3	12,66 abcde		1,00 ns		3,44**
GR14	13,13 abcd		1,22 *		1,84*
GR29	12,28 abcde		0,81*		1,32*
GR7	12,06 bcde		0,98 ns		2,73**
GR27	11,97 bcde		1,13 ns		0,98 ns
GR1	11,72 cde		1,07 ns		6,94**
GR11	11,52 de		0,86 ns		-0,39 ns
GR4	11,45 de		1,14 ns		0,61 ns
GR25	11,43 de		0,76*		5,02**
GR18	11,36 de		0,71**		0,08 ns
GR9	11,35 de		0,87 ns		1,75*
GR17	11,35 de		1,09 ns		2,60**
GR20	11,31 de		1,07 ns		2,30**
GR24	11,23 de		1,08 ns		4,36**
GR16	11,1 e		1,07 ns		-0,64 ns
Media	12,16				

* = Diferencias significativas ($p < 0,05$); ** = diferencias altamente significativas ($p < 0,01$); ns = diferencias no significa

Comparador Tukey para rendimiento (0,05) = 2,0165

En el análisis de adaptabilidad y estabilidad usando el modelo de Eberhart y Russell (1966), los ambientes favorables fueron Puerres y Gualmatán con promedios de rendimiento de 15,38 y 16,09 t ha⁻¹ alcanzando los índices ambientales más altos, mientras que Potosí con 4,49 t ha⁻¹ fue el ambiente menos favorable (Cuadro 3), atribuido a las bajas precipitaciones presentadas en las épocas de floración y llenado de vaina, con un total acumulado de 454 mm (Cuadro 1) que está por debajo de los requerimientos reales del cultivo de arveja que son de 489,1 mm (Saha, 2011), siendo esta una condición aleatoria inesperada. Adicionalmente, en Potosí la condición característica de suelos con textura franco-arenosa, limitaron la capacidad de retención de humedad, afectando aún más la disponibilidad de agua para el cultivo. Las localidades de Ipiales y Pupiales (12,09 y 12,78 t ha⁻¹) obtuvieron índices ambientales intermedios. Es importante resaltar que en Ipiales la precipitación fue muy baja (328 mm) sin embargo, su deficiencia fue compensada con la aplicación de riego por aspersión.

Los genotipos GR15, GR10, GR2, GR28, GR23, GR3, GR14, GR29 y los testigos Sindamanoy y Andina con promedios de rendimiento en vaina verde comprendidos entre 12,26 y 14,22 t ha⁻¹ superaron la media general (12,16 t ha⁻¹) sin presentar diferencias significativas entre ellos (Cuadro 3). Dentro de este grupo, los parámetros de adaptabilidad y estabilidad muestran que las líneas GR15, GR10 y la variedad Sindamanoy, presentaron un $\beta = 1$ y una $S^2d=0$ que, de acuerdo con Vencovsky y BARRIGA (1992), corresponden a genotipos adaptables y con un comportamiento predecible, convirtiéndose así en la mejor opción para los ambientes estudiados (Cuadro 3).

Dentro del mismo grupo de alto rendimiento, la línea GR2 (13,68 t ha⁻¹) presentó un $\beta > 1$ y $S^2d=0$, que sugiere mejor adaptación a los ambientes favorables como Puerres y Gualmatán con un comportamiento predecible, mientras que GR28 y GR23 (13,87 y 12,26 t ha⁻¹) obtuvieron un $\beta < 1$ y $S^2d=0$ que indica mejor desempeño en ambientes desfavorables como Potosí y comportamiento predecible. Los genotipos Andina, GR3, GR14 y GR29 a pesar de su alto rendimiento fueron no predecibles, por lo cual limitan sus posibilidades de recomendación para las localidades estudiadas.

Análisis de estabilidad AMMI

En el análisis de varianza la suma de cuadrados para el efecto ambiental tuvo el más alto efecto sobre el rendimiento obtenido en las líneas evaluadas, representando un 70,80 % de la suma de cuadrados total. La variación entre genotipos explicó un 3,36 % de la variación total y la interacción genotipo ambiente (GE) un 7,66 % (Cuadro 4). La alta proporción en la variación explicada por el ambiente sugiere que existieron ambientes altamente contrastantes, lo cual se relaciona con las variaciones en la oferta ambiental de las cinco localidades en donde se hizo la evaluación, entre ellas las diferencias en la precipitación pluvial.

Es común que cuando hay ambientes que marcan grandes diferencias, la suma de cuadrados explicada por el ambiente sea alta. Resultados similares fueron reportados por Bocianowsky *et al.* (2019), en la evaluación de genotipos de arveja en Polonia, con 89,19, 1,65 y 8,33 % para los efectos ambientales, genotipo e interacción GE, respectivamente. En promedio, el 40 % de las líneas con gen afila igualaron al testigo Andina y el 100 % no mostró diferencias con Sindamanoy (Cuadro 5). En la presente investigación, la baja variación observada para genotipos sugiere poca diversidad, lo cual es de esperar si se tiene en cuenta que hay un alto grado de parentesco entre varias de las líneas con el gen afila evaluadas, que fueron obtenidas por retrocruzamientos buscando recuperar las características de Obonuco Andina y Sindamanoy. La genealogía (Cuadro 2) muestra que siete líneas tienen un retrocruzamiento hacia la variedad Sindamanoy y tres líneas dos retrocruzamientos hacia la misma variedad: de igual forma cinco líneas tienen un retrocruzamiento hacia Obonuco San Isidro y dos líneas presentan dos retrocruzamientos hacia Obonuco Andina.

El modelo AMMI mostró que el primer componente principal (IPCA1) explicó el 39,8 % de la variación y el segundo (IPC2) el 25,21 % de la misma, de tal manera que el IPCA1 y el IPCA2 explicaron en conjunto el 65,01 % de la variación presente en la interacción GX (Cuadro 4). Entre los ambientes probados, la menor contribución a la interacción en el primer componente principal fue la de Gualmatán (IPCAe1= -1,275) y el mayor aporte

lo hizo el ambiente de Puerres (IPCAe1= 2,255), mientras que en el segundo componente principal el menor aporte lo hizo Gualmatán (IPCAe2= -1,067) y el mayor la localidad de Potosí (IPCAe2= 1,816) (Cuadro 5).

Cuadro 4. Análisis de varianza AMMI para rendimiento en vaina verde en la evaluación de 20 líneas de arveja voluble con gen afila y dos testigos comerciales en 5 municipios del departamento de Nariño.

Fuente de variación	GI	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Variación explicada %
Modelo	112	9112,85	81,36**	86,31
Repeticiones	3	473,75	157,92**	4,49
Ambientes	4	7475,47	1868,87**	70,80
Genotipos	21	354,92	16,90*	3,36
GE	84	808,72	9,63**	7,66
Error	327	1445,91	4,42	13,69
Total	439	10558,76		100
Términos AMMI				
Amb*Gen	84	808,72	9,63**	100
IPCA1	24	321,82	13,41**	39,80
IPCA2	22	203,86	9,27**	25,21
IPCA3	20	172,26	8,61**	21,30
Residual	18	110,75	6,15	13,70
Error	327	1445,91	4,42	13,69
R²=0,86		C.V.%= 17,29	Rendimiento promedio= 12,16 t ha⁻¹	

GI= Grados de libertad; GE= interacción genotipo ambiente; IPCA1= Componente principal1; IPCA2= Componente principal 2; IPCA3= Componente principal 3; R²= Coeficiente de determinación; CV %=Coeficiente de variación; *=Diferencias significativas (P<0.05); *=Diferencias altamente significativas (P<0.01).

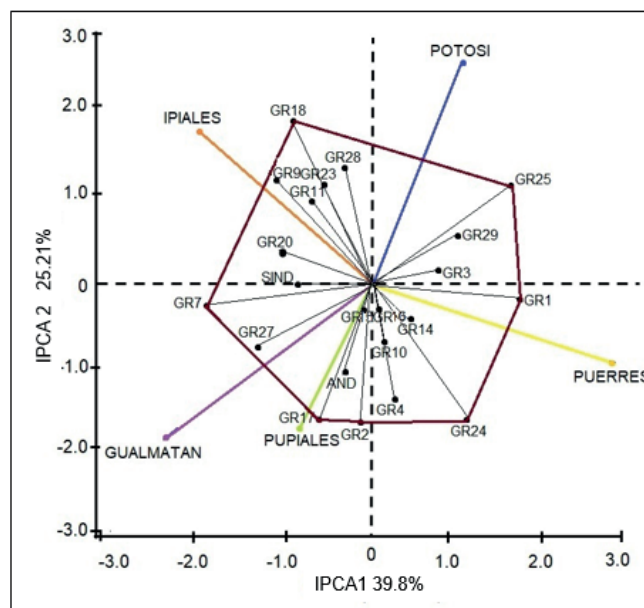


Figura 1. Gráfica AMMI Biplot para rendimiento en vaina verde (t ha⁻¹) de 20 líneas de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) y dos testigos evaluados en cinco ambientes del sur del Departamento de Nariño.

La gráfica de Biplot del modelo AMMI muestra la distribución de los genotipos y los ambientes evaluados en los componentes principales de interacción 1 y 2 (Figura 1). Es importante tener presente que los vectores ambientales con la misma dirección de los vectores de los genotipos corresponden a los ambientes más favorables para dichos genotipos.

Cuadro 5. Promedios de rendimiento en verde (t ha⁻¹) para genotipos y ambientes, valores genotípicos del análisis de componentes principales, valores de estabilidad AMMI (ASV) e índice de selección de genotipos (GSI), para las líneas de arveja con gen afila evaluadas.

Línea	Gualmatán	Ipiales	Potosí	Puerres	Pupiales	Media	IPCA ₁	IPCA ₂	Estabilidad (ASV)	GSI
Andina	19,97	12,89	6	18,12	14,1	14,22 a	-0,19802	-0,59122	0,669	6
GR15	17,41	12,1	5,63	16,59	13,09	12,96 abcde	-0,08879	-0,10958	0,178	7
GR14	16,7	14,2	4,03	19,07	11,66	13,13 abcd	0,28103	-0,17112	0,476	8
GR28	17,07	14,04	7,72	16,84	13,66	13,87 ab	-0,11426	0,64599	0,671	8
GR10	15,38	12,24	3,69	16,87	13,73	12,38 abcde	0,06856	-0,40215	0,416	10
GR2	17,9	13,91	3,36	18,9	14,31	13,68 abc	-0,06781	-0,92201	0,928	14
GR23	14,62	12,22	6,23	14,3	13,93	12,26 abcde	-0,2787	0,603	0,746	18
Sind	17,32	12,74	4,67	15,09	11,9	12,34 abcde	-0,56343	0,08485	0,893	18
GR3	12,95	13,45	4,57	18,1	14,21	12,66 abcde	0,59917	0,16131	0,960	19
GR11	14,91	11,85	4,83	14,16	11,84	11,52 de	-0,31387	0,46265	0,678	21
GR16	14,08	11,42	2,79	15,42	11,8	11,1 e	0,02364	-0,1242	0,130	23
GR4	14,74	10,15	2,7	15,89	13,75	11,45 de	0,12881	-0,76024	0,787	24
GR27	15,85	13,18	2,59	14,82	13,39	11,97 bcde	-0,71644	-0,34339	1,182	27
GR29	13,66	10,98	6,5	17,19	13,06	12,28 abcde	0,82149	0,44736	1,372	28
GR17	16,06	9,29	3,07	14,45	13,86	11,35 de	-0,2779	-0,84636	0,953	30
GR7	16,06	13,06	3,74	13,43	14,03	12,06 bcde	-1,02037	-0,04002	1,611	31
GR18	14,35	12,26	5,64	13,23	11,31	11,36 de	-0,43826	0,99099	1,209	33
GR20	15,03	13,74	2,57	14,41	10,82	11,31 de	-0,66445	0,26389	1,082	34
GR1	13,87	9,98	4,75	19,57	10,42	11,72 cde	1,51692	-0,05637	2,395	35
GR9	14,13	13,57	3,96	13,44	11,64	11,35 de	-0,68577	0,71565	1,298	36
GR25	12,28	10,31	6,45	17,69	10,4	11,43 de	1,35698	0,86493	2,310	37
GR24	13,93	8,29	3,32	16,31	14,31	11,23 de	0,63147	-0,87396	1,326	39
IPCAe1	-1,275	-1,262	0,700	2,255	-0,418					
IPCAe2	-1,067	1,034	1,816	-0,774	-1,013					
Media	15,38	12,09	4,49	16,08	12,78	12,16				

De acuerdo con la gráfica de biplot obtenida, los genotipos con mayor respuesta a los estímulos ambientales fueron: GR25, GR1, GR24, GR17, GR7 y GR18. La proyección ortogonal de los genotipos sobre los vectores de las localidades, indica que la línea GR25 presentó interacción favorable en las condiciones de baja precipitación presentadas en Potosí; GR1 y GR24 en la localidad de Puerres; GR7 en Gualmatán y GR18 en Ipiales (Figura 1, Cuadro 4); estas líneas lograron superar el promedio en la respectiva localidad donde se tuvo la interacción favorable.

Por otra parte, valores de estabilidad de AMMI (ASV) cercanos a cero indica mayor estabilidad del genotipo a través de las localidades. La línea GR16 mostró la mayor estabilidad (ASV = 0,130), sin embargo, su rendimiento estuvo por debajo de la media general. Nueve genotipos correspondientes a siete líneas con gen afila y los testigos Andina y Sindamanoy alcanzaron rendimientos superiores a la media general y mayor estabilidad al presentar los valores ASV más bajos (entre 0,178 y 0,96) (Cuadro 5). Luego de aplicar el índice de selección GSI, se determinó el siguiente orden de mérito para los nueve genotipos mencionados: Andina, GR15, GR14, GR28, GR10, GR2, GR23, Sindamanoy y GR3 (Cuadro 5). En la gráfica biplot estos genotipos se encuentran cercanos al punto de origen confirmando su estabilidad, condición que unida al rendimiento, les da la posibilidad de ser seleccionados para los ambientes estudiados. Es probable que el resultado obtenido con el modelo AMMI sea

más confiable teniendo en cuenta que el mismo separa los efectos principales y captura una gran proporción de la suma de cuadrados de la interacción. La mayor confiabilidad del modelo AMMI, ha permitido su amplio uso en el mejoramiento genético en cultivos de importancia económica como maíz (Bocianowski *et al.*, 2018), cebada (Maniruzzaman *et al.*, 2019) algodón (Riaz *et al.*, 2019), trigo (Sardouei *et al.*, 2019), papa (Tirado *et al.*, 2020), arroz (Huang *et al.*, 2021), arveja (CHianowski *et al.*, 2019).

Al comparar la identidad de los genotipos seleccionados en el modelo AMMI, por su rendimiento y mayor estabilidad (Andina, GR15, GR14, GR28, GR10, GR2, GR23, Sindamanoy y GR3) respecto a los seleccionados en el modelo Eberhart y Russell (GR3, GR15, GR10 Andina y Sindamanoy), por rendimiento y adaptabilidad, se observa una coincidencia del 65,5 %. Cuando en el método de Eberhart y Russell se tienen en cuenta además del parámetro de adaptabilidad ($\beta=1$), las desviaciones de la regresión ($S^2d =0$) para definir la predecibilidad, entonces los genotipos seleccionados por cumplir las dos condiciones y superar la media general son las líneas con gen afilea GR10 y GR15 y la variedad Sindamanoy. En este caso la coincidencia con la selección que se realiza en el método AMMI se reduce al 33,3 %.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un alto efecto ambiental resultante de ambientes contrastantes entre las localidades estudiadas, sin embargo, el aporte de los genotipos a la variación observada reveló baja diversidad entre las líneas afilea evaluadas. El índice de selección aplicado en el modelo AMMI permitió identificar a las líneas de arveja con gen afilea, GR15, GR14, GR28, GR10, GR2, GR23 y GR3 y a las variedades Andina y Sindamanoy como genotipos estables y de alto rendimiento, El modelo Eberhart y Russell identificó a las líneas GR10 y GR15 y a la variedad Sindamanoy como de alto rendimiento, adaptables y predecibles, con una coincidencia respecto al modelo AMMI del 33;33 %.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo Cultivos Andinos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño, por su apoyo en el establecimiento de los ensayos de campo; al Centro Internacional de Producción Limpia, Sena Lope Seccional Nariño, por permitir el desarrollo de esta investigación en sus instalaciones.

REFERENCIAS

- BOCIANOWSKI, JAN; SZULC, PIORT; NOWOSAD, KAMILA. Soil tillage methods by years interaction for dry matter of plant yield of maize (*Zea mays* L.) using additive main effects and multiplicative interaction model. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 17, n. 12, 2018.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62085-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62085-4)
- BOCIANOWSKI, JAN; KSIĘŻAK, JERZY; NOWOSAD, KAMILA. Genotype by environment interaction for seeds yield in pea (*Pisum sativum* L.) using additive main effects and multiplicative interaction model. *Euphytica*, v. 191, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s10681-019-2515-1>
- CHECA-CORAL, OSCAR-EDUARDO; BASTIDAS-ACOSTA, JHULIANA-ESTEFANY; NARVÁEZ-TAIMAL, OLGA-CRISTINA. Evaluación agronómica y económica de arveja arbustiva (*Pisum sativum* L.) en diferentes épocas de siembra y sistemas de tutorado. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, v. 20, n. 2, 2017
<https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.380>

- CHECA-CORAL, OSCAR-EDUARDO; RODRIGUEZ, MARINO; WU, XINGBO; BLAIR, MATTHEW-WOHLGEMUTH. Introgression of the *Afla* Gene into Climbing Garden Pea (*Pisum sativum* L.). *Agronomy*, v. 10, n. 10, 2020, e1537.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10101537>
- CHECA-CORAL, OSCAR-EDUARDO; RODRIGUEZ-RODRIGUEZ, DANIEL-MARINO; RUÍZ-ERASO, MARCO-HUGO; MURIEL-FIGUEROA, JESUS-EDUARDO. La arveja Investigación y tecnología en el sur de Colombia. 1 ed. San Juan de Pasto (Colombia): Editorial Universidad de Nariño, 2021, 217 p, ISBN 978-628-7509-07-8
- CROSSA, J.; GAUCH, H.; ZOBEL, R. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international cultivar trials. *Crop Science*, v. 30, n. 3, 1990.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030003x>
- CRUZ, C,D, Programa Genes: Versao Windows, aplicativo computacional en genética y estadística. Viosa (Brasil), v.1, 2001, 648 p.
- EBERHART, S.; RUSSELL, W. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, v. 6, n. 1, 1966.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X00600010011x>
- HUANG, XING; JANG, SU; KIM, BACKKI; PIAO, ZHONGZE; REDONA, EDILBERTO; KOH, HEE-JONG. Evaluating Genotype × Environment Interactions of Yield Traits and Adaptability in Rice Cultivars Grown under Temperate, Subtropical and Tropical Environments *Agriculture*, v.11, n. 6, 2021.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11060558>
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA (IDEAM). Departamento Administrativo de Estadística. 2019.
www.ideam.gov.co [consultado enero 1 de 2019].
- MANIRUZZAMAN, M.Z.; ISLAM, M.; BEGUM, F.; KHAN, MAA; AMIRUZZAMAN, M.; HOSSAIN, AKBAR. “Evaluation of yield stability of seven barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes in multiple environments using GGE biplot and AMMI model”. *Open Agriculture*, v. 4, n. 1, 2019.
<https://doi.org/10.1515/opag-2019-0027>
- MOHAMMADI, REZA; SADEGHZADEH, BEHZAD; POURSIABIDI, MOHAMMAD-MEHDI; AHMADI, MALAK-MASOUD. Integrating univariate and multivariate statistical models to investigate genotype × environment interaction in durum wheat. *Annals of Applied Biology*, v. 178, n. 3, 2021, p. 450– 465.
<https://doi.org/10.1111/aab.12648>
- NAJAFI, EHSAN; DEVINENI, NARESH; KHANBILVARDI, REZA M.; KOGAN, FELIX. Understanding the changes in global crop yields through changes in climate and technology. *Earth’s Future*, v. 6, n. 3, 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017EF000690>
- PARIHAR, A.K.; DIXIT, G.; BOHRA, A.; GUPTA, D. SEN; SINGH-ANIL, K.; KUMAR, NITIN-KUMAR; SINGH, D.; SINGH, N. Genetic Advancement in Dry Pea (*Pisum sativum* L.): Retrospect and Prospect. In *Accelerated Plant Breeding*; Gosal, S.S., Wani, S.H., Eds.; Springer Nature: Cham, Switzerland, v.3, 2020.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-47306-8_10
- PURCHASE, J.; HATTING, HESTA; VAN-DEVENTER, CS. Genotype environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South África. Stability analysis of yield performance. *South African Journal of Plant and Soil*, v. 17, n. 3, 2013.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2000.10634878>
- RANA, CHANCHAL; SHARMA, AKHILESH; SHARMA, K.; MITTAL, PANKAJ; SINHA, BHRIGU; SHARMA, VINOD; CHANDEL, ANAMIKA; THAKUR, HAMENT; KAILA, VINEETA; SHARMA, PRAVEEN; RANA, VIJAY. Stability analysis of garden pea (*Pisum sativum* L.) genotypes under North Western Himalayas using joint regression analysis and GGE biplots. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 68, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10722-020-01040-0>
- RECKLING, MORITZ; BERGKVIST, GÖRAN; WATSON, CHRISTINE; STODDARD, FREDERICK; BACHINGER, JOHANN. Re-designing organic grain legume cropping systems using systems agronomy. *European Journal of Agronomy*, v. 112, 2020, e125951.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125951>

- RECKLING, MORITZ; AHRENDTS, HELLA; CHEN, TSU-WEI; EUGSTER, WERNER; HADASCH, STEFFEN; KNAPP, SAMUEL; LAIDIG, FRIEDRICH; LINSTÄDTER, ANJA; MACHOLDT, JANNA; PIEPHO, HANS-PETER; SCHIFFERS, KATJA; DÖRING, THOMAS. Methods of yield stability analysis in long-term field experiments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 41, n. 27, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s13593-021-00681-4>
- RIASCOS-DELGADO, MARCELA; CHECA-CORAL, OSCAR E. Evaluación y selección de líneas de arveja con gen afila bajo dos densidades de población. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, v. 21, n. 2, 2018.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.984>
- RIAZ, MUHAMMAD; FAROOQ, JEHAZEB; AHMED, SAGHIR; AMIN, MUHAMMAD; CHATTHA, WAQAS; AYOUB, MARIA; KAINTH, RIAZ-AHMEN. Stability analysis of different cotton genotypes under normal and water-deficit conditions. *Journal of Integrative Agriculture*, v. 18, n. 6, 2019.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62041-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62041-6)
- ROSERO-LOMBANA, V.; CHECA-CORAL, O. Morphological characterization and hierarchical classification of 40 bush pea genotypes (*Pisum sativum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, v. 15, n. 2, 2021, e12078.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i2.12078>
- SARDOUEI-NASAB, SOMAYEH; MOHAMMADI-NEJAD, GHASEM; NAKHODA, BABAK. Yield stability in bread wheat germplasm across drought stress and non stress conditions. *Agronomy Journal*, v. 111, n. 1, 2019.
<https://doi.org/10.2134/agronj2018.06.0381>
- SAHA, R. Prediction of water requirement of garden pea (*Pisum sativum*) under hilly agro-ecosystem of Meghalaya. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. v. 81, n.7, 2011, p. 633–636.
- SMITCHGER, JAMIN; WEEDEN, NORMAN. Quantitative Trait Loci controlling Lodging Resistance and other Important Agronomic Traits in Dry Field. Peas. *Crop Science*, v. 59, n.4, 2019.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2018.04.0260>
- TIGCHELAAR, MICHELLE; BATTISTI, DAVID; NAYLOR, ROSAMOND; RAY, DEEPAK. Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 115, n.26, 2018.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1718031115>
- TIRADO-LARA, ROBERTO; TIRADO-MALAYER, ROBERTO; MAYTA-HUATUCO, EGMA; AMOROS-BRIONES, WALTER. Identificación de clones de papa con pulpa pigmentada de alto rendimiento comercial y mejor calidad de fritura. Estabilidad y análisis multivariado de la interacción genotipo-ambiente. *Scientia Agropecuaria*, v. 11, n. 3, 2020.
<https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.04>
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077-99172020000300323&script=sci_arttext
- VENCOVSKY, ROLAND; BARRIGA, PATRICIO. Genética biométrica no fitomejoramiento. Sao Paulo (Brasil): Sociedade Brasileira de Genética, 1992, p. 496.
- WATSON, CHRISTINE; RECKLING, MORTIZ; PREISSEL, SARA; BACHINGER, JOHANN; BERGKVIST, GORAN; KUHLMAN, TOM; LINDSTRÖM, KRISTINA; NEMECEK, THOMAS; TOPP, CAIRISTIONA; VANHATALO, AILA; ZANDER, PETER; MURPHY-BOKERN, DONAL; STODDARD, FRED. Grain legume production and use in European agricultural systems. *Advances in Agronomy* v. 144, n. 1, 2017.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.003>
- WEBBER, HEIDI; LISCHIED, GUNNAR; SOMMER, MICHAEL; FINGER, ROBERT; NENDEL, CLAAS; GAISER, THOMAS; EWERT, FRANK. No perfect storm for crop yield failure in Germany. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 10, 2020, e104012.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba2a4>
- ZOBEL, RICHARD W.; WRIGHT, MADISON J.; GAUCH, HUGH. Statistical analysis of yield trial. *Agronomy Journal*. v. 80, n. 3, 1988.
<https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>