



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación de rasgos morfoagronómicos y del contenido nutricional del grano de arveja (*Pisum sativum* L.), en ambientes de clima frío del departamento de Cundinamarca

Franklin Giovanni Mayorga Cubillos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2016

Evaluación de rasgos morfoagronómicos y del contenido nutricional del grano de arveja (*Pisum sativum* L.), en ambientes de clima frío del departamento de Cundinamarca

Franklin Giovanni Mayorga Cubillos

Trabajo de Grado para optar al título de:

Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D. Gustavo Adolfo Ligarreto Moreno

Universidad Nacional Sede Bogotá

Codirector

Ph D. Matthew W. Blair

Tennessee State University

Línea de Investigación:

Genética y fitomejoramiento

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2016

DEDICATORIA

A mi madre (QEPD) y padre por ser capaces de invertir todo en un proyecto sin medir la rentabilidad que les aportaba su inversión. De tener confianza en mi cuando todos la habían perdido

A mi hermana por su comprensión, paciencia, tolerancia y apoyo incondicional

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein

Agradecimientos

El autor agradece a las siguientes personas e instituciones por su valioso apoyo y colaboración en la realización de este trabajo

A mi director, Dr. Gustavo Adolfo Ligarreto Moreno, por su valiosa orientación y enseñanza en este trabajo.

A mi codirector, Dr. Matthew W. Blair, por su dedicación, paciencia e invaluable cooperación en el área de trabajo y elaboración de este documento.

A la Universidad Nacional de Colombia, por admitirme en sus claustros de estudio, a sus profesores por orientarme y fortalecer mi formación académica.

Al profesor Jorge Arguelles por la asesoría en el área estadística, consejo y amistad.

A mi familia, guías de luz que me alumbraron y enseñaron el camino del porvenir. A ellos muchas gracias.

Y a todas las demás personas que difícilmente puedo enumerar pero que también contribuyeron a la terminación exitosa de este trabajo.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar rasgos relacionados con rendimiento, componentes de rendimiento, calidad comercial y calidad nutricional para determinar el efecto de la interacción genotipo por ambiente (IGA) sobre estos rasgos en líneas de arveja. Se evaluaron 13 líneas de arveja (*Pisum sativum* L) en cinco localidades de clima frío, del departamento de Cundinamarca; bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió de una parcela de dos surcos, cada uno de cinco metros de largo, por un metro de ancho y 0,20 m entre plantas. Para cada localidad, se realizó un análisis de varianza individual y combinado a través de todos ambientes para las 15 variables en estudio. Las variables que mostraron significancia estadística en el factor L*G (localidad x genotipo), en el análisis combinado, fueron analizadas para estabilidad fenotípica mediante el método de efectos principales aditivos y de interacción multiplicativa (AMMI).

Se observó una respuesta diferencial entre las líneas y localidades. La línea UN5175 fue la de floración más temprana en todos los sitios de evaluación. Adicionalmente, los promedios de las variables de rendimiento y sus componentes fueron superiores en la localidad Marengo; un ejemplo es el número de vainas por planta (VAPLA) y rendimiento en vaina verde por hectárea (RVV) con promedios de 29,85 y 10248,28, respectivamente. Las variables que presentaron significancia estadística para el factor L*G, fueron días a floración, número de ramas basales por planta, número de granos por vaina y peso de 100 granos secos.

Por otra parte, el rango entre localidades para contenido de hierro fue de 48,48 a 63,42 mg/kg y entre líneas de 45,11 a 62,19 mg/kg. Respecto a zinc, los rangos fueron de 50,04 a 65,81 mg/kg entre localidades y 45,51 a 71,52 mg/kg entre líneas. El análisis AMMI fue importante para la identificación de grupos de localidades de igual respuesta, localidades discriminantes respecto al potencial genético entre líneas; además, mediante el análisis AMMI se identificaron ambientes correlacionados negativa y positivamente con algunas líneas. Para las variables estudiadas los efectos de la localidad fueron más importantes para explicar la variación total observada en la interacción.

Palabras clave: Adaptación, estabilidad, interacción genotipo x ambiente, calidad comercial y nutricional.

Abstract

The aim of this study was to evaluate yield and their components and to understand the commercial and nutritional quality of pea (*Pisum sativum* L.) lines from UNAL – Colombia. In addition we aimed to determine the effect of genotype by environment interaction (GEI) for these traits in pea lines. The study included 13 pea lines evaluated in five cold weather locations, in the department of Cundinamarca. An experimental random block design with four replicates was used. Each experimental unit consisted of two 5 m-rows (1 m between rows and 0.20 m between plants). For each location, individual variance analysis and combined analysis through all environments for 15 variables was performed. Statistically significant variables in the combined analysis G*E interaction were studied for phenotypic stability by Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI) analysis.

A differential response for lines and locations was observed. Across all locations, line UN5175 was the earliest blooming. Additionally, the averages of yield and its components were higher in the location of Marengo. The number of pods per plant (VAPLA) and green pod yield per hectare (RVV) was 29.851 and 10,248.28 kg respectively. Days to flowering, number of basal branches per plant, number of grains per pod and weight of 100 dry beans showed statistical significance for the E*G interaction.

The range for seed iron concentration was 48,48 to 63.42 mg/kg between locations and was 45,11 to 62,19 mg/kg among lines. For zinc, ranges were 50,04 to 65.81 mg/kg between locations and 45,51 to 71,52 mg/kg among lines. Finally, groups of locations with equal response were identified by AMMI analysis; those locations would allow for stable selection of lines and detection of their genetic potential. Likewise, either negative or positive correlation between environments and lines were recognized by AMMI analysis. Thus, total variation observed in the interaction was explained by effects of genotypes, locations and G*E interactions across the variables studied.

Key words: Adaptation, stability, genotype by environment interaction, genotype x environment, commercial and nutritional quality.

Contenido

	Pag.
Resumen	V
Abstract	VI
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	X
Introducción	1
Objetivos	4
<i>Objetivo General</i>	4
<i>Objetivos Especificos</i>	4
Capítulo 1: Efecto de la interacción genotipo ambiente (IGA) para el rendimiento y sus componentes en líneas avanzadas de arveja	5
1.1 <i>Estado del arte</i>	5
1.1.1 Generalidades de la Arveja (<i>Pisum sativum</i> L.)	5
1.1.2 Mejora genética y variedades	7
1.1.3 Interacción Genotipo por Ambiente (GxA).....	9
1.1.4 Influencia del genotipo y del ambiente sobre el desarrollo de la arveja	11
1.1.5 Método de efectos principales aditivos y de interacción multiplicativa (AMMI); para evaluar estabilidad y adaptabilidad fenotípica.....	12
1.2 <i>Materiales y métodos</i>	15
1.2.1 Material vegetal	15
1.2.2 Localización.....	16
1.2.3 Manejo Agronómico.....	17
1.2.4 Diseño Experimental	18
1.2.5 Análisis estadístico de los resultados	18
1.2.6 Variables y métodos de evaluación	20
1.3 <i>Resultados y discusión</i>	21
1.3.1 Precocidad a días a floración	21
1.3.2 Arquitectura de la planta y componentes de rendimiento.....	26
1.3.3 Rendimiento	34

Capítulo 2: Efecto de la interacción genotipo ambiente (IGA) sobre factores de calidad comercial y nutricional en líneas avanzadas de arveja.....	41
2. <i>Estado del arte</i>	41
2.1.1 variables de calidad comercial en arveja.....	41
2.1.2 Usos y ventajas nutricionales del grano de arveja.....	42
2.1.3 Biofortificación con Hierro y Zinc	43
2.1.4 Hierro y zinc en el suelo y su toma por las raíces.....	46
2.1.5 Hierro y Zinc en los tejidos de la planta.....	47
2.2 <i>Materiales y métodos</i>	49
2.2.1 Material vegetal.....	49
2.2.2 Localización y manejo agronómico	50
2.2.3 Diseño Experimental	50
2.2.4 Análisis estadístico de los resultados.....	50
2.2.5 Variables registradas	51
2.3 <i>Resultados y discusión</i>	52
2.3.1 Variables de calidad comercial.....	52
2.3.2 Variables de calidad nutricional.....	65
3. Conclusiones y recomendaciones	76
3.1 <i>Conclusiones</i>	76
3.2 <i>Recomendaciones</i>	77
A. Anexo: Análisis de varianza individual y combinado para las localidades de evaluación; cuadrados medios para la variable días a floración, variables asociadas a la arquitectura de la planta, componentes de rendimiento y rendimiento.....	79
B. Anexo: Análisis de varianza individual y combinado para las localidades de evaluación; cuadrados medios para la variable relacionadas con calidad comercial y calidad nutricional	82
Bibliografía	85

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1. Días a floración después de la siembra (dds) para 13 líneas de arveja evaluadas en cuatro localidades del departamento de Cundinamarca.	22
Figura 1-2. Biplot AMMI para Días a floración en 13 genotipos de Arveja evaluados en cuatro ambientes de Cundinamarca.	26
Figura 1-3. Biplot AMMI para ramas basales por planta en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco ambientes de Cundinamarca.	33
Figura 1-4. Prueba de Dunnet para la variable rendimiento en grano seco. Testigo variedad Alejandrita- UN5171	40
Figura 2-1. Biplot AMMI para granos por vaina en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.	61
Figura 2-2. Biplot AMMI para porcentaje de grano verde por vaina en 13 genotipos de Arveja evaluados en cinco ambientes de Cundinamarca.	63
Figura 2-3. Biplot AMMI para peso de 100 granos secos en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.	64
Figura 2-4. Prueba de Dunnet para el contenido de hierro. Testigo variedad Alejandrita-UN5171.	68
Figura 2-5. Prueba de Dunnet para el contenido de zinc. Testigo variedad Alejandrita-UN5171.	70
Figura 2-6 Biplot AMMI para contenidos de Hierro (mg/Kg) en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.	72
Figura 2-7. Biplot AMMI para contenidos de Zinc (mg/Kg) en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.	74

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Tiempo en días después de la siembra que tardan en ocurrir algunos eventos fenológicos del cultivo de arveja var. Paqinegra.....	6
Tabla 1-2. Datos de rendimiento y sus componentes de algunas variedades nacionales.	8
Tabla 1-3. Descripción de las 13 líneas avanzadas de arveja seleccionadas para este estudio.	15
Tabla 1-4. Localización geográfica y fechas de siembra de los ensayos experimentales.	16
Tabla 1-5. Descripción de las principales características climáticas y edáficas de los sitios de evaluación.....	17
Tabla 1-6. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cuatro localidades del departamento de Cundinamarca, para la variable días a floración.....	24
Tabla 1-7. Promedios para altura de planta (cm), de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca	27
Tabla 1-8. Promedios para numero de ramas basales por planta, de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca.....	28
Tabla 1-9. Promedios para nudos por planta, de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca	29
Tabla 1-10. Promedio para vainas por planta; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca	30
Tabla 1-11. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca, para las variables relacionadas con arquitectura de la planta y componentes de rendimiento.	32
Tabla 1-12. Promedio para rendimiento en vaina verde por hectarea; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 4 ambientes en el departamento de Cundinamarca ..	36
Tabla 1-13. Promedio para rendimiento de grano verde por hectarea; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 4 ambientes en el departamento de Cundinamarca ..	37

Tabla 1-14. Promedio para rendimiento de grano seco por hectarea; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 4 ambientes en el departamento de Cundinamarca . 38

Tabla 2-1. Composición nutritiva de la Arveja (*Pisum sativum* L.) 42

Tabla 2-2. Variabilidad del contenido de Fe y Zn del tubérculo o rizoma de Yuca, ñame y en las semillas de trigo, frijol, maíz y arroz. 44

Tabla 2-3. Agua, Fe, Zn, ácido ascórbico (AA) y ácido fitico en las partes comestibles de algunas plantas cultivadas. 47

Tabla 2-4. Descripción de las 13 líneas avanzadas de arveja seleccionadas para este estudio. 49

Tabla 2-5. Promedios para granos por vaina; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca..... 53

Tabla 2-6. Promedios para longitud de la vaina; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca..... 54

Tabla 2-7. Promedios para el peso de 100 granos verdes; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca..... 55

Tabla 2-8. Promedios para el peso de 100 granos secos; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 5 ambientes en el departamento de Cundinamarca..... 56

Tabla 2-9. Promedios para porcentaje de grano verde por vaina; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 4 ambientes en el departamento de Cundinamarca 57

Tabla 2-10. Promedios para el peso de vainas verdes con grano por planta; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de Arveja en 4 ambientes en el departamento de Cundinamarca..... 58

Tabla 2-11. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cuatro y cinco localidades del departamento de cundinamarca, para las variables de componentes de rendimiento. 60

Tabla 2-12. Promedios para contenidos de hierro (mg/kg); de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca. 66

Tabla 2-13. Promedios para contenidos de Zinc (mg/kg); de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca. 68

Tabla 2-14. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca, para los contenidos de hierro y zinc en grano seco. 71

Introducción

Las fabáceas (Fabaceae) o leguminosas (Leguminosae) son una familia del orden de las fabales que reúne árboles, arbustos y hierbas perennes o anuales, fácilmente reconocibles por su fruto tipo legumbre y sus hojas compuestas y estipuladas (Olvera *et al.*, 2012). Es una familia de distribución cosmopolita con aproximadamente 730 géneros y unas 19.400 especies, lo que la convierte en la tercera familia con mayor riqueza de especies después de las compuestas (Asteraceae) y las orquídeas (Orchidaceae) (Olvera *et al.*, 2012). Las leguminosas de grano son principalmente cultivadas por sus semillas, con finalidades tanto en la alimentación humana como en la animal, debido a su alto contenido en proteína y otros micronutrientes como el hierro y zinc (Amarakoon *et al.*, 2012)

La arveja (*Pisum sativum* L.), se cultiva en casi todo el mundo, estando más adaptada a climas templados, frío y húmedo, siendo China el primer productor de arveja verde, seguida de India y Estados Unidos; para arveja seca Canadá y Rusia son los mayores productores y exportadores (Olvera *et al.*, 2012). A nivel nacional la arveja es considerada como uno de los productos básicos de la economía campesina de pequeños y medianos productores; es producida en 11 departamentos siendo para el año 2015 Nariño, Cundinamarca y Boyacá los departamentos de mayor área cultivada con 8369, 6000 y 5480 hectareas respectivamente; con una producción total de 80640 toneladas y un rendimiento promedio por hectárea de 3,8 ton/ha (Fenalce 2015).

La malnutrición causada por la deficiencia de micronutrientes especialmente hierro, zinc y magnesio es un problema de salud pública de gran importancia en la población humana afectando a más de un tercio de la población, principalmente en países en vías de desarrollo (Frossard *et al.*, 2000.; HarvestPlus, 2015; Welch y Graham, 2005; WHO, 2011). La deficiencia de estos minerales está asociada con un bajo desarrollo cognitivo, retrasos en el crecimiento, respuestas negativas en el sistema inmune, entre otras (Latham, 1997). Actualmente a nivel mundial y en gran parte con apoyo del Grupo Consultivo Internacional para la investigación en agricultura (CGIAR) se han venido realizando esfuerzos para combatir este nivel de desnutrición en estos micronutrientes, aumentando la densidad especialmente de hierro y zinc en partes comestibles de las plantas a través de mejoramiento convencional o biotecnología (HarvestPlus, 2015).

En estudios anteriores se ha demostrado que, dentro de los cultivares de una misma especie existe una alta variabilidad en el contenido de estos dos micronutrientes en las partes comestibles o de interés para el consumidor (Bouis, 1996; Welch y Graham, 1999;

Welch, 2001; Welch y Graham, 2005; Nestel *et al.*, 2006;). Investigaciones en arroz han encontrado que la mayoría de la variación en el contenido de hierro (Fe) en el grano es debido a sus componentes genéticos y que los efectos ambientales tienen sólo un pequeño impacto. Por el contrario, Beebe *et al.* (2000), encontraron que el impacto de las diferentes condiciones ambientales en el contenido de hierro y zinc en el grano es fuerte y no se puede separar fácilmente de los componentes genéticos.

El problema de desnutrición conocido como “hambre oculta” aunque es una gran limitante en la calidad de vida en poblaciones de escasos recursos, a su vez brinda oportunidades de investigación para incrementar esfuerzos en la mejora de la calidad nutricional en alimentos de mayor economía y más accesibles para este tipo de población (Graham *et al.*, 2001). Asimismo, la tendencia es aumentar posibilidades de este producto en los mercados, su uso eficiente en la industria de alimentos con nuevos materiales de altos contenidos y alta biodisponibilidad de los micronutrientes, como también en futuros programas de mejoramiento para generar y certificar variedades de alto rendimiento que contribuyan a suplir en algún porcentaje las necesidades nutricionales en la población nacional (Graham *et al.*, 2001; Bouis, 2003; White y Broadley, 2005).

La arveja (*Pisum sativum* L.), se proyecta con un gran potencial en estudios de biofortificación, debido a que sus semillas representan una fuente excelente en proteína cruda (25%), almidón (35 a 45%), fibra dietética, compuestos bioactivos como vitaminas y antioxidantes (Cañas *et al.*, 2011; Delgado, 2014) y recientemente altos contenidos de hierro, zinc y magnesio (Wang *et al.*, 2003; Amarakoon *et al.*, 2012), además a nivel nacional esta leguminosa aporta el 8,9% y 22,5% de proteína de la porción comestible, en grano verde y seco respectivamente (Pacheco *et al.*, 2011). Debido a lo anterior su consumo puede contribuir de manera benéfica a la reducción de cáncer (Lamartiniere, 2000; Wang *et al.*, 2003), bajar colesterol, disminuir la osteoporosis, bajar la acumulación de lípidos corporales y a combatir la anemia, entre muchos más efectos benéficos (Messina, 1999).

A nivel nacional en el cultivo de la arveja (*Pisum sativum* L.) existen muy pocos trabajos de evaluación de parámetros morfoagronómicos y no existen resultados de investigación enfocados hacia el conocimiento de los contenidos de minerales benéficos para la salud humana, en los granos de genotipos específicos; al igual se conoce poco de la variación de estos contenidos entre diferentes materiales y del comportamiento de estos caracteres de tipo cuantitativo en cada genotipo a través de diferentes ambientes y el efecto de la interacción genotipo x ambiente (IGA) (Beebe *et al.*, 2000; Frossard *et al.*, 2000). Sumado a esto, en Colombia 11.410.000 de colombianos (57.5% de los empleados), reciben un salario mínimo, siendo el 78 % de estos habitantes trabajadores de la zona rural; por lo tanto el acceso de esta parte de la población a alimentos de carácter animal con altos contenidos en proteína y micronutrientes es limitado (Ministerio del Trabajo, 2015).

Sin embargo y a pesar de ser líneas avanzadas de mejoramiento las incluidas en este estudio, se debe tener en cuenta que la arveja también se caracteriza por su acentuada interacción genotipo por ambiente (IGA), en variables de rendimientos y en sus componentes. La interacción genotipo por ambiente (IGA) representa una de las

principales dificultades encontradas en los procesos de selección; lo que puede ocasionar que los mejores genotipos en una localidad no sean los mejores en otras localidades dificultando el proceso de recomendación de cultivares para una amplia gama de ambientes; siendo necesario la selección de genotipos para un ecosistema o sistema de producción específico (Pérez *et al.*, 2005; Barriga, 1980). La evaluación y selección de cultivares con alto rendimiento y estabilidad es muy importante en los programas de mejoramiento genético, para indicar los materiales superiores a ser recomendados para su cultivo a nivel comercial (Carneiro, 1998).

Con base en lo anterior, en el presente estudio se escogieron 13 líneas provenientes del Programa de mejoramiento de Leguminosas de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, seleccionadas por ser los materiales más representativos respecto a altos rendimientos y rasgos morfoagronómicos benéficos como de porte bajo, vainas por planta, granos por vaina y número de entrenudos en ciclos avanzados de selección. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre rasgos morfoagronómicos de interés, rendimiento y contenido de minerales útiles en la salud humana para así identificar cultivares con perfiles superiores útiles en futuros programas de mejoramiento genético de la especie. .

Objetivos

Objetivo General

Evaluar rasgos morfo-agronómicos y factores nutricionales de contenidos de hierro y zinc en nuevos genotipos mejorados de arveja enfocado hacia la obtención de materiales biofortificados en Colombia.

Objetivos Especificos

- Determinar si los rasgos de rendimiento, componentes de rendimiento y precocidad son caracteres afectados por el ambiente y si existe interacción genotipo por ambiente
- Evaluar para contenido de micronutrientes y rasgos morfoagronomicos de calidad comercial el comportamiento de genotipos élites de arveja en cinco localidades de la zona fría del departamento de Cundinamarca.

Capítulo 1: Efecto de la interacción genotipo ambiente (IGA) para el rendimiento y sus componentes en líneas avanzadas de arveja

1.1 Estado del arte

1.1.1 Generalidades de la Arveja (*Pisum sativum* L.)

- **Origen y distribución**

La arveja (*Pisum sativum* L.) es uno de los cultivos más antiguos de la humanidad. Existen evidencias del consumo de arvejas silvestres unos 10.000 años antes de Cristo que fueron descubiertas por arqueólogos que exploraban la “Cueva Espiritu” en la frontera entre Burma y Tailandia, en una excavación arqueológica en Jarmo, al noreste de Irak (FENALCE, 2010). Las especies cultivadas aparecieron después del trigo y la cebada, por lo que se supone que ya se cultivaban hacia el 7.800 a. C; fue introducida en Europa desde Asia por los romanos y griegos, ya como cultivo, hacia el año 500 a.C y se expandió por todo Asia y el resto de Europa, popularizándose las recetas que incluían arveja (Olvera *et al.*, 2012). Las primeras identificaciones datan de 1.500, donde los botánicos encuentran especies de diferentes colores y texturas de grano. En América fue introducida por los españoles y ha sido cultivada durante cientos de años (Krall *et al.*, 2006). A partir de ese momento, empezó a usarse también el grano fresco.

Clasificación taxonómica de Arveja *Pisum sativum* L. Según (Nolasco, 2004)

Rango	Nombre científico
Reino	Plantae
División	Fanerogámas
Sub-división	Angiospermas
Clase	Dicotiledoneas
Orden	Rosales
Familia	Leguminosas
Género	<i>Pisum</i>
Especie	<i>Pisum sativum</i> L.
Nombres vulgares	Arveja, guisante, chicharo
Número cromosómico	2n (14)

Nombres vulgares en español: arveja, alverja, guisante. **Nombre vulgar en otros idiomas:** green pea (inglés), Erbse (alemán), pois (francés), pisello (italiano) (González, 2001.).

▪ Fenología y desarrollo del cultivo

En condiciones de temperatura y humedad adecuadas más o menos en dos días la semilla de arveja empieza su proceso de germinación (Londoño y Naranjo, 1996). Después de la emergencia de una pequeña planta, se empiezan a desarrollar el primer par de hojas verdaderas y simultáneamente se desprenden las falsas hojas o cotiledones. Esta emergencia ocurre de 10 a 15 días después de la siembra (Villareal, 2006; Flores, 2008).

Posteriormente, se forman los nudos vegetativos y el tallo principal comienza a ramificarse a partir del segundo nudo, el crecimiento del tallo continúa y van apareciendo las hojas, folíolos y zarcillos, simultáneamente las ramas laterales van creciendo pero de menor tamaño. dependiendo de la variedad; esto se da entre las tres y seis semanas después de la siembra (Londoño y Naranjo, 1996). Seguido a esto continúa la etapa de floración que inicia entre los 25 a 30 días después de la siembra, en variedades precoces y entre 40 y 45 días en materiales más tardíos (Villareal, 2006). Por otro lado, el proceso de fecundación dura de dos a tres días, siendo las horas más efectivas las de máxima intensidad solar (Flores, 2008). Después de la fecundación, los pétalos se desprenden, dejando una vaina pequeña y por otra parte los filamentos de los estambres rodean inicialmente a la vaina, pero prontamente se secan y caen; este hecho comienza a los 125 días de la siembra y tiene una duración de 25 días aproximadamente (Londoño y Naranjo, 1996; Vaca, 2013; Villareal, 2006).

Después de un tiempo de crecimiento lento, los granos entran a una fase de rápido crecimiento y por ende un abultamiento de las vainas; este se va haciendo cada vez mayor, producto del crecimiento progresivo de los granos. La cavidad de las vainas se llena prácticamente en forma completa cuando los granos alcanzan el estado de madurez para consumo en verde. Lo anterior se logra con un contenido promedio de humedad en los granos de 72 a 74% y el tamaño promedio de los granos al obtener este estado de madurez es dependiente de los cultivares (Londoño y Naranjo, 1996; Vaca, 2013; Villareal, 2006).

Tabla 1-1. Tiempo en días después de la siembra que tardan en ocurrir algunos eventos fenológicos del cultivo de arveja var. Paqinegra

Fase fenológica	Londoño y Naranjo (1996) (Días)	Vaca (2011) (Días)
Emergencia		8-10
Aparición de hojas con zarcillos	11-14	10-15
Inicio de floración	40-42	40-45
Formación de vainas	59-61	55-65
Inicio de la cosecha	91-94	90-100

▪ **Importancia, producción a nivel Mundial**

La producción mundial de arveja verde en el 2014 fue de 8,4 millones de toneladas, con China como el primer productor, seguida de India y Estados Unidos. Colombia figuró de 25 entre los 95 países productores de arveja fresca. Los principales importadores de arveja verde son: Bélgica, Estados Unidos, Holanda, Japón, Reino Unido y Malasia (Fenalce 2015).

Respecto a la arveja seca el mercado presenta características diferentes. La producción mundial de arveja seca, según la FAO, fue de 9.828.000 de toneladas en el 2014. Como principales productores están Canadá, Rusia, China, India y Francia. Canadá produce el 36% de la arveja seca. El mayor rendimiento se obtiene en Francia con 4.7 toneladas. En éste mismo año se comercializaron 3.705.8170 toneladas. Este mercado es dominado por Canadá, que maneja casi el 50% de las transacciones. Los principales importadores son: España como el primer comprador mundial de arveja seca (724.4000 ton), seguido por India, Bélgica y Holanda. Colombia aparece como el país número 12 con la importación de arveja seca (40.000 toneladas) (Fenalce 2015).

▪ **Importancia, producción y mercado a nivel Nacional**

Después del frijol la arveja a nivel nacional es la leguminosa más importante por el tamaño de área cultivada y por sus altos contenidos de proteína, constituyéndose en un alimento básico de la canasta familiar (Peñaranda y Molina, 2011). El área sembrada para el 2015 duplicó los valores del año 2004 al igual los rendimientos de kilogramos por hectárea, siendo la variedad Santa Isabel la de siembra más representativa con rendimientos que fluctúan entre 900 y 1.200 kg·ha⁻¹ (Peñaranda y Molina, 2011; Fenalce 2015).

A nivel nacional este cultivo se produce en 11 de los 32 departamentos del territorio nacional, siendo más representativos los departamentos de clima frío y medio, localizados en el altiplano Cundíboyacense y en los departamentos de Nariño, Tolima, Huila y Santander, entre los 2200 y 3000 msnm (Peñaranda y Molina, 2011);. Según estudios de producción se ha encontrado que tan solo con un kilo de semilla sembrada se pueden recoger 125 kilos de arveja fresca en vaina; aunque hay que tener en cuenta que los valores de rendimiento fluctúan de manera relevante entre zonas (Peñaranda y Molina, 2011). El departamento con más área sembrada en esta leguminosa para el 2015 fue Nariño (8369 ha) seguido por Cundinamarca (6000 ha) y Boyaca (5480 ha), por último, la producción para el año 2015 fue de 80640 toneladas con un rendimiento promedio por hectárea de 3,2 toneladas. (Fenalce 2015).

1.1.2 Mejora genética y variedades

La diversidad de variedades de arveja es muy amplia, con un gran número de cultivares que se han seleccionado por parte del fitomejorador, enfocándose en diversos objetivos productivos, principalmente para rendimiento y sus componentes, y para calidad del producto fresco o de la materia prima para la agroindustria. Algunas características que permiten clasificar los materiales existentes son:

- **Altura de planta:** existen cultivares de plantas bajas, determinadas o enanas (0,5 a 0,7 m de altura), intermedias o semideterminadas (0,7 a 1,0 m), y altas, indeterminadas o guiadoras (más de 1,0 m, pudiendo llegar hasta 3 m) (Pacheco *et al.*, 2011).
- **Tipo de follaje:** a partir de 1969 se introducen genes que modifican el follaje habitual de la arveja, distinguiéndose en la actualidad: planta tipo convencional (hojas con las características normales ya descritas), planta convencional de follaje reducido (folíolos y estípulas de tamaño reducido), planta áfila (sin folíolos debido al gen recesivo *af*, reemplazados por zarcillos y estípulas grandes), planta tipo "leafless" (sin folíolos y con estípulas como hilos debido a genes recesivos *af* y *st*), y otros tipos con otros genes recesivos modificantes (González 2001).
- **Tipo de vaina y de grano:** las vainas pueden ser romas o puntudas y contener granos lisos (ricos en almidón) o granos arrugados (dulces), los que pueden ser de tamaño muy pequeño o "petit pois", pequeño, normal o grande, según su diámetro (Peñaranda y Molina 2011; Galindo 2006).
- **Precocidad de la planta:** una forma habitual de medirla es el número del primer nudo reproductivo, y se distinguen cultivares precoces (nudo 8 o anterior), intermedios (entre nudo 9 y 13) y tardíos (nudo 14 o superiores). También es usual medir la precocidad en días-grado de siembra a cosecha (Galindo 2006).

Aunque existen otras formas de agrupar los cultivares, las características anteriores dan una idea clara de la diversidad posible de encontrar en la especie. A nivel nacional las variedades existentes presentan características de acuerdo al suelo y al mejoramiento genético que se ha desarrollado en cada región, un ejemplo de ella son las citadas en la tabla 1-2. El material con más área sembrada en el país es el Santa Isabel debido a su buena aceptación en el mercado, pero al igual presenta grandes desventajas fitosanitarias generadas por diferentes patógenos (Pacheco *et al.*, 2011).

Tabla 1-2. Datos de rendimiento y sus componentes de algunas variedades nacionales.

Variedad	RA	DAF	DCGV	DCGS	GV	RGV	RG+V	RGS	RES
San Isidro	2400-2800	58-61	112-118	140-170	4-8	1749,3	3510,1	1120	Ascochyta Antacnosis
Andina	2600-2900	65	128	155	4-7	3436,1	6607,9	1848,7	Ascochyta Antacnosis
ICA-Tomine	2000-2800	65	120	160	5-7	N.D	6000-7000	1000-1200	Ascochyta Antracnosis Fusarium

Tabla 1-2. (Continuación)

Santa Isabel	2400-2700	75	120	170	6-8	N.D	4000-5000	900-1100	Ascochyta Antracnosis Fusarium
Guatecana	2300-2700	70	110-130	170	4-6	N.D	3000-5000	800-1000	N.D
Sindamanoy	2300-2700	65	120-135	160	6-9	2182,7	4197	1414	N.D
Paquinegra	2300-2700	70	120	160	5-8	N.D	2000-4500	900-1100	N.D

RA: Rango de adaptación (msnm); **DAF:** Dias a floración; **DCGV:** días a cosecha de grano verde; **DCGS:** Dias a cosecha de granos secos; **GV:** Granos por vaina; **RGV:** Rendimiento Grano verde (kg/ha); **RG+V:** Rendimiento grano verde más vaina (kg/ha); **RGS:** Rendimiento grano seco (kg/ha); **RES:** Resistencia; **ND:** Dato no disponible..

1.1.3 Interacción Genotipo por Ambiente (GxA)

La expresión fenotípica de un individuo es determinado por la siguiente ecuación:

$$F=G + A + GxA$$

En donde:

F, es la expresión fenotípica del individuo

G, es el genotipo o constitución hereditaria completa (expresada y latente) de un organismo, comprendiendo el total de genes de los cromosomas y factores de herencia citoplasmática (Vallejo y Estrada, 2002).

A, representa el ambiente o conjunto de todas las condiciones externas que afectan el crecimiento y desarrollo de un organismo, incluye algunas características predecibles (radiación solar, tipo y fertilidad de suelo, fecha, densidad y método de siembra) y factores ambientales impredecibles (cantidad y distribución de lluvias; temperatura y humedad relativa; presiones repentinas de plagas y enfermedades) (Vallejo y Estrada, 2002).

Por ultimo como reacción al ambiente un genotipo es capaz de producir varios fenotipos como resultado de la interacción genotipo por ambiente (GXA). En otras palabras individuos con el mismo genotipo pueden mostrar distintos fenotipos dependiendo del ambiente (Puertas, 1992).

Las causas de esta interacción según Allard (1999) no resultan siempre de una asociación directa del fenotipo con los genes, más bien se habla de una sucesión de relaciones físico-químicas e interacciones iniciadas por ciertos genes, pero modificadas por un sistema de reacciones controladas o modificadas por otros genes, y por el ambiente externo hasta determinar el fenotipo final. Por otra parte, Chaves (2001) indica

que la IGA debe ser abordada como un fenómeno biológico en sus aplicaciones en el mejoramiento de plantas y no como un simple efecto estadístico.

La interacción GxA es significativa cuando una variación ambiental tiene distinto efecto sobre genotipos diferentes; por lo tanto, la interacción resulta de la respuesta diferencial de los genotipos a la variación ambiental o, a la inversa, cuando un genotipo que presenta una respuesta diferencial responde de distinta manera a las variaciones del ambiente (Fox *et al.*, 1997). La interacción GxA reduce la asociación entre los valores genotípicos y fenotípicos y obliga a los fitomejoradores a considerar la estabilidad o adaptabilidad de los materiales (Vallejo *et al.*, 2005).

Al encontrar una interacción GxA relevante, se deben enfocar esfuerzos para conocer las causas de esa interacción a fin de hacer una predicción precisa del comportamiento de un determinado genotipo bajo una variedad de ambientes. Entender las respuestas de un genotipo a factores individuales ayuda a una mejor interpretación y explotación de la GxA; Damba (2008). Yan y Kang (2002) indican que un factor ambiental representa un estrés cuando presenta un nivel fuera del óptimo; un ejemplo claro es, en condiciones de sequía ocurre que el agua está a un nivel sub-óptimo y pueden ser identificados genotipos que hagan un uso eficiente del agua; en condiciones de inundación hay un nivel súper-óptimo y en este caso la selección se dirigirá a la identificación de genotipos tolerantes a excesos de humedad. Lo anterior explica que, existen diferencias en la tasa de aumento de la respuesta genotípica a un nivel sub-óptimo lo cual refleja diferencias en la eficiencia y las diferencias en las tasas de decrecimiento de la respuesta genotípica a un nivel súper-óptimo refleja diferencias en tolerancia (Vallejo y Estrada, 2002).

En el estudio de la interacción GxA existen dos términos o conceptos que se hacen necesario tener claros, la estabilidad y la adaptabilidad. Estos dos términos son usados como sinónimos a dos conceptos diferentes

Quizás uno de los conceptos más precisos de estabilidad es el concluido por Laing (1978), definiéndola como la respuesta relativa de un genotipo a las variaciones del ambiente en una localidad específica. Este investigador distingue además entre estabilidad espacial, o sea la variación entre repeticiones cuando se cultiva en una misma localidad y estabilidad temporal que es la variación de una estación de cultivo a otra.

La adaptabilidad se refiere al comportamiento uniforme y predecible de un determinado genotipo a través de distintas localidades (Vallejo y Estrada, 2002). Simmonds (1979) define los siguientes conceptos para este término:

1. Adaptación específica de un genotipo, es la adaptación concreta del genotipo correspondiente a un ambiente limitado.
2. Adaptación genotípica general es la capacidad de un genotipo para producir en un rango de fenotipos compatibles con un rango de ambientes determinado.

3. Adaptación específica de una población, es la parte de la adaptación específica de una población heterogénea que es atribuible a la interacción entre los componentes más que a la adaptación de los componentes por sí mismos.
4. La adaptación general de una población es la capacidad de poblaciones heterogéneas para adaptarse a variedad de ambientes. concepto comprobado por Laing en 1978.

En procesos de selección en programas de mejoramiento en plantas, los rasgos de mayor importancia son de carácter métrico o cuantitativo; por lo tanto las consideraciones de la interacción son esenciales (Bernal, 2013). Dichos caracteres presentan distribución continua, poseen herencia poligénica y son muy influenciados por las variaciones del ambiente (Vallejo *et al.*, 2005). El conocimiento de la naturaleza y magnitud de la IGA contribuye significativamente a determinar el número de ambientes de evaluación en los que los genotipos deben ser evaluados con el objetivo de lograr la precisión necesaria para medir las diferencias entre genotipos. Adicionalmente, porque puede ayudar a determinar si es necesario el desarrollo de cultivares para todos los ambientes de interés o si se deberían desarrollar cultivares para ambientes específicos (Yates y Cochram, 1938; Chaves, 2001; Yan y Kang, 2003).

1.1.4 Influencia del genotipo y del ambiente sobre el desarrollo de la arveja

Aparte del genotipo, existen factores ambientales externos que controlan el crecimiento y desarrollo de las plantas, como fotoperiodo, temperatura disponibilidad de agua y nutrientes (Summerfield *et al.*, 1991). Durante el desarrollo reproductivo las condiciones térmicas influyen en gran parte en el rendimiento; la medida que nos interesa respecto a esta variable son los grados día acumulados entre un estado fenológico y otro (González, 2001). El valor de este índice acumulación de grados día entre el inicio y final de floración) en *Pisum sativum* han sido ampliamente estudiados y se han correlacionado positivamente con el rendimiento y sus componentes (González, 2001). Según Johnston *et al.* (1969); Hardman y Brun (1971);) y Turc (1988), una iluminación muy intensa reduce el aborto de semillas y por el contrario en una densidad de siembra muy alta (sombreado) aumenta la proporción de semillas que abortan.

Los tipos de estrés y el estado fenológico en el que se encuentra la planta determinan en gran parte el resultado de la cosecha. Un ejemplo claro es la presencia de un estrés hídrico en el momento en que se determina el número de granos por vaina, este provocará el aborto de las semillas que no hayan pasado el estado límite de aborto (Roche, 1996). También se ha observado la respuesta fenológica de la arveja al estrés hídrico (Ney *et al.*, 1994); observando que el estrés en momentos tempranos no modifica el desarrollo de la planta, solamente detiene la floración a lo largo del tallo. Los días entre floración y principio del estado límite de aborto y la duración de llenado del grano no variaron en ningún nudo (Hardman y Brun 1971). Si la condición de sequía afectaba al grano después del final del estado límite de aborto no se observaba ningún efecto sobre el rendimiento en grano, sin embargo, si el estrés se da antes, el rendimiento bajaba en

una proporción dependiente de la intensidad de dicho estrés; por lo tanto se sugiere que la planta responde a la sequía reduciendo el número de semillas (González 2001).

Respecto al rendimiento y sus componentes la arveja es muy sensible a altas temperaturas y al estrés hídrico en floración; según Fletcher *et al.* (1966) en Canadá y Australia por altas temperaturas en el periodo de floración se encontraron cosechas tardías con bajos rendimientos. Ridge y Pye (1985) evaluaron seis diferentes genotipos ante condiciones de temperatura extrema en la floración, concluyendo que esta variable determina hasta el 68% de la variación del rendimiento en grano. Respecto al estrés hídrico el componente del rendimiento más afectado es el número de vainas por unidad de superficie (Rodríguez- Maribona *et al.*, 1993). Otro factor importante es la cantidad de pisos florales en arveja, ya que no siempre es deseable tener una gran cantidad de ellos, puesto que esto la hace más susceptible a sequía o a enfermedades. Además la formación de un número elevado de pisos florales retarda la fecha de formación de vainas (estado límite de aborto), con lo cual es mayor el riesgo de estrés hídrico o elevadas temperaturas (Turc *et al.*, 1996). En el estudio del rendimiento de grano, altura de la planta, número de vainas por planta y número de ramificaciones por planta, realizado por Singh (1985) en 30 variedades de arveja, se observó un alto grado de variabilidad y de heredabilidad genética, en sentido amplio, de estos caracteres. Estos rasgos presentan una asociación positiva con el rendimiento de grano, indicando su eficacia en la selección de variedades más productivas.

1.1.5 Método de efectos principales aditivos y de interacción multiplicativa (AMMI); para evaluar estabilidad y adaptabilidad fenotípica

Yan y Kang (2002), sostienen que el efecto combinado del genotipo y de la interacción puede representar entre el 40 y 90% del rendimiento de grano en algunas gramíneas. Por ello, el fitomejorador debe recurrir a los ensayos en multiambientes (EMA) para evaluar el comportamiento relativo de los genotipos e identificar cultivares superiores para una región objetivo (Dehghani *et al.*, 2006). Cuando la IGA es significativa a través de cada ambiente se ve reducida la utilidad de los promedios de los genotipos sobre todos los ambientes para la identificación de genotipos superiores (Yan y Kang 2002). La detección de IGA en ensayos de campo y el deseo del fitomejorador de manejar estas interacciones de manera apropiada ha llevado al desarrollo de procedimientos que son llamados análisis de estabilidad. Los métodos disponibles proveen diferentes estrategias para una mejor interpretación y tomar las mejores alternativas en los procesos de selección y recomendación de cultivares (Yan y Kang, 2002).

Una de las metodologías más empleadas y adecuada para el análisis de ensayos multi-ambientales es el modelo de Efectos Principales Aditivos y Multiplicativos de la Interacción (AMMI), ya que captura una gran proporción de la suma de cuadrados de la interacción GA, separando en forma precisa los efectos principales de aquellos correspondientes a la interacción (Gauch, 1992). En este modelo, los efectos principales de genotipos y de ambientes son considerados términos lineales y se explican mediante un análisis de varianza convencional; el componente no aditivo, que corresponde a los residuales del

modelo, se atribuye a la interacción GxA y se analiza mediante la técnica de componentes principales (CP). A continuación se presenta el modelo (Crossa, *et al.* 1988):

$$y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^p \lambda_k Y_{ik} \alpha_{jk} + \varepsilon_{ij}$$

- y_{ij} = Es la respuesta media de un genotipo i en una ambiente j.
- μ = Es la media general de las observaciones (su estimación se hace por medio de $\mu = \bar{Y}_{..}$)
- g_i = Es el efecto del genotipo i (desvío respecto al promedio general del genotipo i, y se estima a través de $\hat{g}_i = \bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..}$)
- e_j = Es el efecto del ambiente j (desvío respecto al promedio general del ambiente j, se estima por medio de $\hat{e}_j = \bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..}$)
- λ_k = Es el valor propio del k-esimo componente, que explica la proporción de la variación debida a la interacción GxA
- γ_{ik} = Son los vectores propios unitarios genotípicos asociados a λ_k
- α_{jk} = Son los vectores propios unitarios ambientales asociados a λ_k
- ε_{ij} = Error del genotipo i en el ambiente j
- p = Número de ejes de componente principales considerados en el modelo AMMI.

La matriz de interacciones se obtiene a partir de la siguiente transformación de los residuales: $(\hat{g}\hat{e})_{ij} = Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..}$. A partir de esta matriz se calculan los términos de la interacción multiplicativa que sirven para calcular la matriz de varianzas y covarianzas que se requiere para el análisis de componentes principales. Para el cálculo de las coordenadas genotípicas y ambientales del ACP, se utilizan los parámetros multiplicativos. Se multiplica la raíz cuadrada del valor propio λ_k por su vector propio asociado, de manera que $\sqrt{\lambda_k} \gamma_{ik}$ representa las coordenadas genotípicas y $\sqrt{\lambda_k} \alpha_{jk}$ representa las coordenadas ambientales. Así, la estimación de la interacción del genotipo i con determinado ambiente j se obtiene con el producto $\lambda_k \gamma_{ik} \alpha_{jk}$ (Vargas y Crossa, 2000).

Para seleccionar el número de términos multiplicativos asociados a ejes en el modelo, se realiza la descomposición de la suma de cuadrados de la interacción de la ANOVA bifactorial en términos AMMI. Así, el número de ejes de componentes principales que son retenidos en el modelo, es determinado probando el cuadrado medio de cada eje con el estimador del residual, a través del estadístico F en la llamada prueba de Gollob. Si el estadístico F es significativo, se incluye el término multiplicativo asociado de lo contrario se elimina del análisis (Rao *et al.*, 2011).

Los resultados de AMMI pueden ser graficados con un biplot donde se representan los genotipos (filas) y los ambientes (columnas) en un subespacio de dimensión P, de forma que se pueden hacer agrupaciones de genotipos y ambientes. Cuando las coordenadas respecto al primer eje de componentes principales CP1 tienen el mismo signo poseen interacción positiva, y cuando tienen distinto signo poseen interacción negativa. Adicionalmente, los genotipos que se ubican cerca al origen serán los más estables, es

decir, los que menos interactúan con el ambiente. Por otra parte, aquellos genotipos que se alejan del origen serán los más inestables (Vargas y Crossa, 2000).

El modelo AMMI puede ayudar desde la identificación de genotipos de alta productividad y amplia adaptación hasta en la realización de llamado zoneamiento agronómico, con la selección de localidades claves (Gauch y Zobel, 1996); además, permite hacer un estudio más detallado tanto de las variedades como de las localidades y su interacción. Este modelo multivariado ha resultado ser de suma utilidad en la explicación de la suma de cuadrados de la interacción en estudios que involucran una amplia diversidad ambiental (Riggs, 1986; Zobel *et al.* 1988; Gauch, 1992; Nachit *et al.* 1992).

Dado que las respuestas genotípicas en los distintos ambientes son multivariadas, más que univariadas (Lin *et al.* 1986) serán las técnicas multivariantes las que permitirán describir e interpretar los efectos de la interacción genotipo-ambiente (Gauch, 1992). Cuando se evalúan un alto número de genotipos y ambientes (a nivel regional ó continental), las técnicas multivariantes y de ordenación pueden ser utilizadas para establecer la naturaleza de la interacción, al poner de manifiesto las asociaciones existentes entre genotipos ambientes y por la caracterización que realizan de los ambientes (Thomson y Cunningham, 1979). A continuación se citaran algunas ventajas del modelo AMMI:

- Se trata de un método potente de diagnóstico, ya que permite la posibilidad de estudiar submodelos representativos de los datos totales del ensayo.
- Aporta gran información sobre la naturaleza de la IGA, permitiendo clasificar tanto los genotipos como los ambientes según sus patrones de comportamiento.
- Se obtienen la misma precisión en la estimación del rendimiento que con otros tipos de análisis con un número de repeticiones 2 a 5 veces mayor.

En lo anterior se constata que ajustar un modelo AMMI y efectuar el análisis del biplot, son herramientas que tiene a la mano el fitomejorador para tomar decisiones en cuanto los materiales de mejoramiento que deben o no continuar en el programa y sobre si es necesario el desarrollo de variedades específicas para ambientes en tanto la interacción GxA es muy sobresaliente.

1.2 Materiales y métodos

1.2.1 Material vegetal

▪ Aplicación de índice de selección

A partir de datos de evaluaciones anteriores sobre plantas de porte bajo, inicialmente se aplicó un índice de selección a 24 líneas avanzadas de arveja (*Pisum sativum* L.) del programa de desarrollo de cultivares mejorados de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Los pasos a seguir fueron:

1. Determinación de los rasgos de importancia en el índice de selección.

Los rasgos que se tomaron en este índice de selección son los siguientes:

Rendimiento (R)
 Vainas por planta (VP).
 Granos por vaina (GV)
 Número de entrenudos (NE)

2. Determinación de la importancia relativa (I) de los caracteres con la asignación de un valor arbitrario a cada uno entre 1 y 99%.

Carácter	Importancia relativa
Rendimiento	40%
Vainas por planta	20%
Granos por vaina	20%
Número de entrenudos	20%

3. Cálculo del factor de importancia (FI) para cada carácter utilizando la fórmula: y corrección de cada dato por la desviación estándar

(FI)= valor dado en importancia relativa (I) para cada rasgo dividido en la media del rasgo

Para ponderar (P) los datos de cada línea en cada variable se utilizó la fórmula:

P: (valor de la línea – media del rasgo)/Desviación estandar

4. Creación el índice de selección (IS) a utilizar:

$$IS= (FI \text{ rendimiento (R)}) (P \text{ rendimiento (R)}) + (FI. VP) (P.VP)+ (FI. GV) (P.GV)+ (FI. GV) (P.GV)$$

Basados en los resultados del índice de selección se tomaron para este estudio las 13 líneas que presentaron mayor valor (Tabla 1-3)

Tabla 1-3. Descripción de las 13 líneas avanzadas de arveja seleccionadas para este estudio.

16 Evaluación de rasgos morfoagronómicos y del contenido nutricional del grano de arveja (*Pisum sativum* L.), en ambientes de clima frío de la región andina colombiana

Código UNAL	Tratamiento	Genealogía	Pedigree	IS Ponderado
UN5171	1(Testigo)	WSU31-1	Variedad Alejandrita	0,85
UN6651	2	LINEA1205	MA-M-M-MA-CM-M-M	1,86
UN7469	3	WSU31 x (SANTAISABEL x WSU31)	MD-MC-M-M-CM-M-M	1,27
UN7637	4	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1A-MA-M-M-CM-M-M	1,21
UN6650	5	LINEA1048	M-M-M-MA-CM-M-M	0,39
UN7429	6	SANTAISABEL x NEWERAWISCONSIN	MC(F2)-MA-M-MA-CM-M-M	0,32
UN7540	7	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1B-MC-M-M-CM-M-M	0,22
UN7544	8	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1C-MA-M-MA-CM-M-M	0,23
UN7536	9	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1A-MB-M-MA-CM-M-M	0,04
UN5564	10	LINEA1049	M-M-M-M-CM-M-M	-0,13
UN7539	11	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1B-MB-M-M-CM-M-M	-0,07
UN5175	12	BANQUET	1-M-M-MA-CM-M-M	-0,71
UN7555	13	SANTAISABEL x WSU31	M(F2)-MB-MA-M-MA-CM-M-M	-0,25

El testigo la variedad Alejandrita (UN5171) es un material de porte bajo (1,20m) con adaptación a la zonas frías de los altiplanos de Cundinamarca y Boyacá, con alturas superiores a los 2200 msnm; su rendimiento promedio en vaina verde es de 7546 kg ha⁻¹. Los materiales que presentaron índice de selección negativo para factores de rendimiento además fueron escogidos por otras variables de alto interés agronómico como lo es la resistencia a *Fusarium* sp. y a *Ascochyta* sp., el tipo de grano grande y el porte bajo de la planta, no obstante el valor del índice no fue tan bajo respecto a los materiales no seleccionados.

1.2.2 Localización

Los ensayos experimentales en diferentes sitios de evaluación, se llevaron a cabo entre los años 2013 y 2014, en tres localidades del departamento de Cundinamarca, Granada (GRA); Granja de la Universidad Nacional- Sede Bogotá, ubicada en el Municipio de Mosquera (Marengo- MAR) y el invernadero tres de la Facultad de Ciencias Agrarias, sede Bogotá. Para esta última localidad los ensayos se realizaron en tres épocas, segundo semestre del 2013 denominado UNAL1, primer semestre del 2014 denominado UNAL2 y segundo semestre del 2014 denominado UNAL3 (Tabla 1-4).

Tabla 1-4. Localización geográfica y fechas de siembra de los ensayos experimentales.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha de siembra	Fecha de cosecha
Granada	4°32' 42"N	74°18' 1"N	2711	9- Ene- 2014	10- Jun-2014
Marengo	4° 42" N	74° 12" W	2547	27-May-2014	01- Oct- 2014
UNAL1	4°38'06.8"N	74°05'22.2"W	2540	25-Jun-2013	31- Oct- 2013

Tabla 1-4 (Continuación)

UNAL2	4°38'06.8"N	74°05'22.2"W	2540	05-Dic-2013	4-Abril- 2014
UNAL3	4°38'06.8"N	74°05'22.2"W	2540	28-May- 2014	10- Sep- 2014

En la tabla 1-5 se presenta la información climática de las localidades la cual fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). De igual manera, se muestran las características físico-químicas y edáficas más relevantes de los sitios de evaluación. Estos resultados fueron obtenidos del análisis realizado antes de la siembra de los ensayos. Para ello, en cada localidad, se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 0-20 cm, se homogenizaron y se enviaron al Laboratorio de Suelos de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional, Sede Bogotá.

Tabla 1-5. Descripción de las principales características climáticas y edáficas de los sitios de evaluación

Localidad	Temp. Media (°C)	Prec (mm)	pH (1:1)	M.O (%)	K	Ca	Mg	P	Fe	Zn	Textura
					Meq/100g			Mg/Kg			
Granada	13 ° C	190	5,1	12,4	0,39	4,52	1,11	7,81	55,3	3,80	Franco Arenosa
Marengo	13,64 ° C	216	5,2	5,49	2,66	14,2	5,28	>166	430	61,0	Franco Arcilloso
UNAL1	14° C	300	5,0	4,10	0,89	8,16	1,25	>116	292	18,4	Franco Arcilloso
UNAL2	14,5° C	300	4,8	3,39	0,82	7,19	1,17	>116	274	12,1	Franco Arcilloso
UNAL3	14° C	300	5,4	4,20	0,98	10,6	1,75	>116	310	15,5	Franco Arcilloso

1.2.3 Manejo Agronómico

La preparación del sitio de los experimentos consistió en un pase de rotovator en la localidad Granada y motocultor en las localidades restantes, el cual garantizó la adecuación del suelo para una profundidad de siembra de más o menos dos cm por semilla y emergencia de las plantas. La fertilización se realizó al momento de la siembra con NPK 15-15-15 aplicado al surco directamente antes de la distribución de la semilla; adicionalmente, se aplicó un insecticida- nematicida de ingrediente activo 2,3-dihidro-2,2-dimetil-7- benzofuranil-metil carbamato para el control de insectos que pudieran afectar la semilla. El control de malezas se realizó a los 8 días después de la siembra en algunas localidades de forma manual (UNAL1, UNAL2, UNAL3) y con un herbicida selectivo para malezas de hoja ancha de ingrediente activo 3-(3,4-Diclorofenil)-1-metoxi-1metilurea, en las localidades de Granada y Marengo. Se utilizó un sistema de tutorado para cultivares de hábito trepador, asegurando el crecimiento de las plantas y facilitando el desarrollo, el desyerbe, las fumigaciones, la toma de datos y la cosecha.

1.2.4 Diseño Experimental

Los ensayos para cada localidad fueron establecidos siguiendo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La distancia de siembra fue de un metro entre surcos y 20 centímetros entre planta. La unidad experimental consistió de una parcela de dos surcos cada uno de cinco m de largo, para un total de 100 plantas/parcela; de la cual al momento de la toma de datos en verde y de la cosecha en seco, se seleccionaron cinco plantas centrales en competencia por espacio.

1.2.5 Análisis estadístico de los resultados

Los datos de las evaluaciones se registraron y codificaron en un archivo MS Excel. Esta información fue procesada con el programa estadístico SAS® (Statistical Analysis System, versión v 9.0). Se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con las pruebas de Shapiro – Wilk y Bartlett, respectivamente.

▪ Análisis de varianza

Con los datos obtenidos en cada localidad de evaluación se realizaron los respectivos análisis individuales y combinados de varianza para las diferentes variables agronómicas consideradas.

En el análisis individual el modelo que explica el comportamiento de cualquier genotipo en cada localidad es:

$$y_{ij} = \mu + g_i + b_j + e_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = comportamiento medio del genotipo “i” en la repetición “j”, para el carácter de interés.

μ = media general del experimento.

g_i = efecto del genotipo “i”.

b_j = efecto de la repetición “j”.

e_{ij} = error experimental.

A cada variable se le realizó una prueba de comparación de medias por localidad con Tukey. Para las variables de rendimiento se empleó una prueba de comparación de medias adicional con Dunnett tomando como testigo el material UN5171 (variedad Alejandrita).

Con relación al análisis combinado de varianza el modelo que explica el comportamiento de cualquier genotipo en los diferentes ambientes (localidades) de evaluación es:

$$Y_{ijk} = \mu + ak + (ri)k + gi + (ga)ik + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = comportamiento medio del genotipo “i” en la repetición “j” en el ambiente “k”.

μ = media general a través de todos los ambientes.

ak = efecto del ambiente “k” (r_j)

k = efecto de la repetición “j” dentro del ambiente “k”

gi = efecto del genotipo “i” (g_a)

ik = efecto de la interacción del genotipo “i” en el ambiente “j”.

ϵ_{ijk} = error experimental combinado.

Para los análisis individuales los efectos de bloques y genotipos fueron considerados fijos utilizando como denominador para la prueba de F de la fuente de variación genotipos el cuadrado medio del error experimental. En el caso de los análisis combinados los genotipos se consideraron fijos y los efectos de los ambientes aleatorios. En este caso para la prueba de F de la fuente de variación localidad se utilizó como denominador el cuadrado medio de la fuente de variación repeticiones/ambientes; para genotipos se utilizó como denominador el cuadrado medio de la interacción genotipo x localidad y para la fuente de variación de la interacción el error experimental combinado.

▪ **Análisis de estabilidad**

Para el análisis de estabilidad fenotípica se utilizó el modelo de Análisis de Componentes Principales Aditivos e Interacciones Multiplicativas AMMI, descrito por Vargas y Crossa (2000). Para desarrollar el algoritmo computacional del modelo descrito por los anteriores autores, se empleó el programa estadístico SAS® (Statistical Analysis System, versión v 9.0).

La metodología AMMI se realizó en dos etapas: 1) los efectos principales, en la parte aditiva (efectos de genotipos y ambientes), fueron ajustados por análisis de varianza (ANOVA), interacción (GxA) y 2) la interacción (parte multiplicativa del modelo) fue analizada pela análisis de Componentes Principales (ACP). El esquema de análisis de varianza se da según la formula ya descrita en el numeral 1.1.5.

El objetivo del análisis fue reunir gran parte de la interacción GxA en pocos ejes sintéticos; usando así grados de libertad, resultando en modelo reducido, que descarta un residuo adicional. Uno de los procedimientos más usuales para la definición de número de ejes para ser retenidos, consiste en determinar los grados de libertad asociados a cada miembro de familia de modelos AMMI (AMMI0, AMMI 1, ..., AMMI n). Se obtiene, entonces, el cuadrado medio (CM) correspondiente a cada modelo.

Los resultados de este análisis son presentados gráficamente en un *biplot*. Para los casos en que el modelo engloba apenas el primero eje de análisis de componentes principales de interacción ACPI (CPI1), fue constituido el *biplot* AMMI1, que utiliza el eje de las abscisas para representar los efectos principales (genotipo y ambiente) y las ordenadas para expresar los escores de genotipos y ambientes referentes a los CPI1. Para lo demás casos (modelos que engloban más de un eje de ACPI), fue utilizado el *biplot* AMMI2, que representa solamente efectos de interacción referentes a los dos primeros ejes de ACPI: CPI2 vs. CPI1.

En la gráfica *biplot* el coeficiente de correlación entre genotipos, ambientes o genotipos y ambientes está dado en forma aproximada por el coseno del ángulo formado entre los vectores; así si el ángulo entre los vectores es de 180° el coeficiente de correlación es -1; si el ángulo es de 0° el coeficiente es +1 y para 90° es 0. Lo anterior permite detectar adaptaciones específicas y separar genotipos y ambientes en los análisis de estabilidad que estén positiva o negativamente correlacionados (Pérez *et al.*, 2005).

1.2.6 Variables y métodos de evaluación

- **Días a la floración (DIAF):** Fueron tomados como el número de días contados desde la siembra hasta al menos el 50% de plantas con la primera flor abierta en la parcela.
- **Altura de planta (ALTPLA):** Se determinó en el momento de la floración, se tomaron cinco plantas al azar de cada parcela, midiendo la distancia desde la base de la planta hasta el último foliolo y sacando el promedio.
- **Número de ramas basales por planta (RABAS):** Se contaron las ramas basales, que se diferenciaban en la superficie del suelo, de cada una de las cinco plantas seleccionadas. El dato se expresó como promedio de ramas basales por planta.
- **Nudos por planta (NUPLA):** Se procedió a contar el número de nudos de la rama principal, de cada una de las plantas seleccionadas por parcela, desde la superficie del suelo hasta el último nudo, obteniendo el número promedio de nudos por planta

- **Vainas por planta (VAPLA):** Se registró el número promedio de vainas por planta para las cinco plantas seleccionadas al azar por parcela previamente marcadas, asumiendo como vainas verdaderas las que presentaran dos o más granos formados
- **Rendimiento en vaina verde por hectárea (RVV):** Este valor se calculó con base en el número de vainas verdes por planta, el peso del grano verde de 10 vainas y el peso de 10 vainas verdes. Posteriormente este valor se llevó a kilogramos y se multiplicó por una densidad de siembra de 50000 plantas ha⁻¹..
- **Rendimiento de grano verde por hectárea (RGV):** Este valor se calculó con base al número de vainas por planta y el peso del grano verde de 10 vainas. Extrapolando el valor obtenido a kilogramos y relacionándolo a 50000 plantas ha⁻¹
- **Rendimiento de grano seco por hectárea (RGS):** Con base al dato de rendimiento de grano seco por planta, este se relacionó con el área correspondiente a una hectárea y la cantidad de plantas que en esta área son sembradas a distancia comercial (50000). Se proyectó en kg ha⁻¹ para cada línea.

1.3 Resultados y discusión

Todas las variables evaluadas en este capítulo cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas ya mencionadas en materiales y métodos.

1.3.1 Precocidad a días a floración

Dentro de la fenología de los cultivos, los días a floración aporta datos de gran interés y fáciles de interpretar, respecto al estudio de la adaptación de distintos materiales en diferentes ambientes y su precocidad en la producción. En el Anexo A1 se presenta el análisis de varianza para la variable días a floración con los respectivos cuadrados medios, media y coeficiente de variación para las cuatro localidades donde se evaluó esta variable.

Para esta variable el factor genotipo presentó diferencias altamente significativas ($P < 0,01$) para las localidades de Granada y Marengo. Los coeficientes de variación (CV) presentaron rangos de 4,202% en Granada a 13,714% para UNAL1. El nivel de significancia para las dos localidades ya mencionadas indica diferencias en la expresión genética potencial del material de arveja evaluado, permitiendo discriminar genotipos de alta, baja e intermedia precocidad. Asimismo, se puede deducir que se presentaron valores bajos en los coeficientes de variación; lo cual indica un buen control del error y eficiencia de la metodología experimental utilizada.

Para las cuatro localidades de evaluación se encontró que el genotipo UN5175 fue el más precoz, con diferencias significativas ($P < 0,05$ o $P < 0,01$) respecto a las líneas más

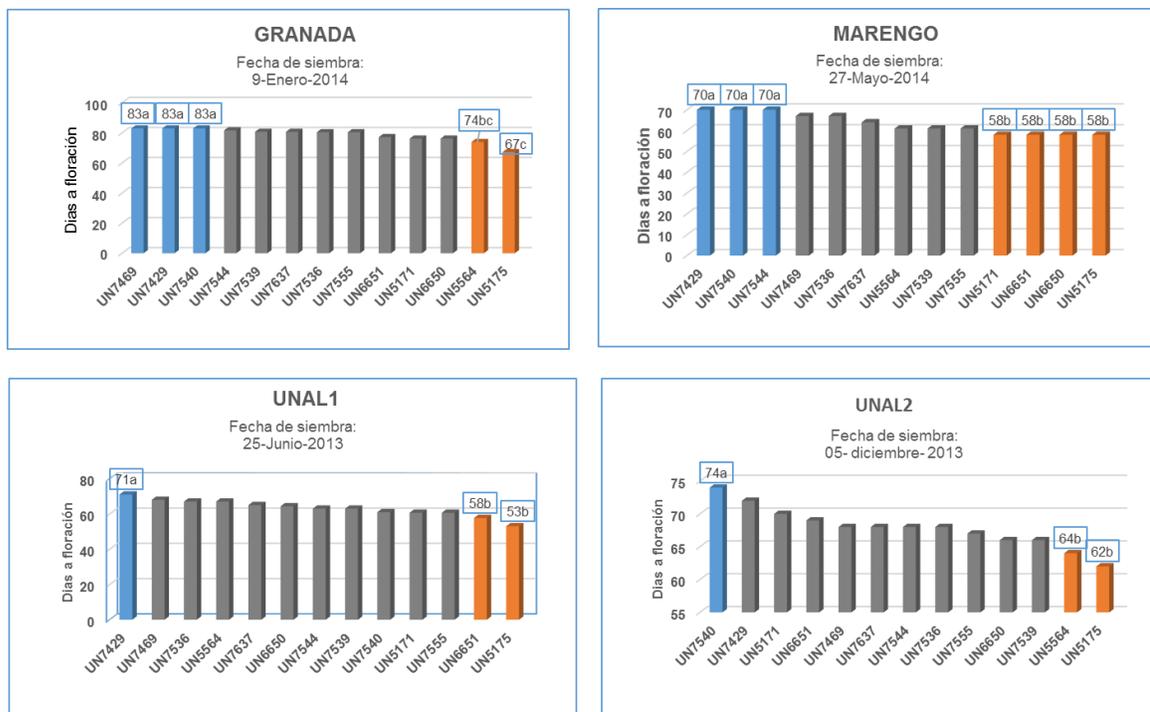
tardías según la prueba de comparación de medias Tukey; esta línea empezó este estado fenológico a los 67 días en Granada, 58 en Marengo, 53 en UNAL1 y 62 días después de la siembra en UNAL2 (Figura 1-1).

Otras líneas para destacar por su floración temprana y con diferencia estadística respecto a las más tardías según la prueba de comparación de medias ya mencionada fueron UN5564 para Granada con 74 dds; UN5171, UN6651 y UN6650 con 58 dds para la localidad Marengo; UN6651 para UNAL1 con 58 dds y UN5564 con 64 dds para UNAL2. Las líneas que presentaron floración tardía para la localidad Granada fueron UN7469, UN7429, UN7540 con 83 días después de la siembra (dds); UN7429, UN7540, UN7544 para Marengo con 70 dds; UN7429 para UNAL1 con 71 dds; UN7540 para UNAL2 con 74 dds (Figura 1-1).

Pacheco *et al.* (2011), en la evaluación de 42 materiales en proceso de mejoramiento bajo condiciones de invernadero en la Sabana de Bogotá, encontraron que las líneas más precoces estuvieron sobre los 54 días y las más tardías en los 67 días; rango donde se ubicaron nuestras líneas más precoces a excepción de UN5564 en la localidad Granada. En ensayos realizados por Sánchez y Quevedo (1982) y Garzón y Gasca (1990), se encontró como precoz la variedad Trend de uso industrial y carácter arbustivo con 46 días a floración y 51 días respectivamente.

Casanova *et al.* (2012) encontró para la línea UN5171 un periodo de floración entre los 61 a 65 días; aunque esta línea fue empleada en este estudio solamente se encontraron valores similares en las localidades Marengo y UNAL1, en las demás localidades el número de días a floración fue mayor. Siddique *et al.* (2002) obtuvieron que el periodo de floración tardó entre 13 a 27,2 días con variedades de porte pequeño; Patiño *et al.* 1997 encontró que la variedad de arveja Payload fue la de floración más temprana con 45 días, seguida de Marifon y Pronto con 47 y 50 días. Finalmente, González. y Ligarreto.(2006) bajo cubierta plástica en la Universidad Nacional encontró que los materiales WSU 31 y Banquet fueron los más precoces con 37 y 38 días, dichos materiales fueron evaluados en este estudio presentando valores superiores en días a floración.

Figura 1-1. Días a floración después de la siembra (dds) para 13 líneas de arveja evaluadas en cuatro localidades del departamento de Cundinamarca.



Las diferencias presentes en los días a floración encontradas entre variedades y localidades pueden obedecer a cambios en las condiciones edafológicas y climáticas bajo las cuales se realizó este estudio, este resultado coincide con el trabajo de Moreno (1987) en el cual se encontraron comportamientos diversos significativos estadísticamente entre materiales de arveja sembrados en diferentes localidades, y épocas. La densidad de siembra de cada estudio es algo que también puede influir puesto que plantas en competencia completa tienden a florecer más temprano (Casanova *et al.*, 2012; González y Ligarreto, 2006), cabe anotar que en este trabajo se utilizó una densidad más baja que en los anteriormente citados. Sin embargo, Dhillon y Chanal (1981), indican que la variabilidad expresada en los materiales se ve influenciada por la variabilidad genética, influyente por la acción aditiva de los genes.

En el Anexo A2 se presentan los resultados del análisis combinado de varianza a través de las localidades evaluadas en este estudio para la variable días a floración. Con base en este análisis se detectaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) y altamente significativas ($p < 0,01$) entre localidades, genotipos y el factor IGA.

Según Gauch y Zobel (1997) conforme sean más diversos los genotipos y los ambientes el porcentaje de los cuadrados medios debido a la IGA podrá ser incrementado. En este caso se puede inferir que la contribución de los ambientes a la IGA fue mayor ya que las líneas en evaluación vienen de ciclos de selección avanzados. La mayor contribución de las localidades al porcentaje de cuadrados medios de la interacción indica que las localidades son diversas. La significancia encontrada en el análisis combinado para la IGA, concuerda con los resultados de Gómez (2008) en la evaluación de los días a floración del material santa Isabel y WSU31 en las localidades de Madrid y Mosquera en el departamento de Cundinamarca.

Que el factor interacción genotipo por ambiente (L*G) sea significativo es un indicativo de la respuesta diferencial de las líneas que formaron parte de este trabajo, a las variaciones ambientales en las diferentes localidades. Esto sugiere la necesidad de un estudio más detallado de esta variable para analizar y cuantificar la naturaleza de dicha interacción y establecer las localidades que más contribuyen a dicho factor y cuales permiten una mejor discriminación, en cuanto a cada rasgo. Adicionalmente, determinar genotipos estables, de adaptación específica y la posibilidad de agrupar localidades que presenten un mismo patrón de respuesta.

El análisis de estabilidad AMMI permitió detectar diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) y altamente significativas ($P < 0,01$) entre genotipos, ambientes y la interacción genotipo por ambiente IGA para la variable días a floración (Tabla 1-6). Para este rasgo el efecto localidad explicó el 52,832% de la variación total, el efecto de la línea presentó un 14,795 % de participación en la variación total y el efecto de la interacción genotipo por localidad aunque presentó un porcentaje bajo de 6,539% fue estadísticamente significativa. Lo anterior indica que para esta variable el efecto localidad es más relevante que el comportamiento *per se* de cada material. Lo anterior confirma lo ya visto en el análisis combinado donde se encontró que el efecto de las localidades es el de mayor aporte a la varianza total de la interacción

Tabla 1-6. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cuatro localidades del departamento de Cundinamarca, para la variable días a floración.

DIAS A FLORACION			
FV	GL	DIAF	
		Días	
		CM	%
Modelo	54	209,304**	76,858
Bloque	3	27,709	0,565
Localidad	3	2589,762**	52,832
Genotipo	12	181,313**	14,795
GenxLoc	36	26,711*	6,539
Error	127	26,795	23,141
Total	181		100
	R ²		0.768
	CV		7.540
	Promedio		68.648
Términos AMMI			
Componente		CM	%
IPCA1	14	42,471**	51,804
IPCA2	12	31,201	32,620
IPCA3	10	17,877	15,575
IPCA4			
Residual			

El análisis de estabilidad para la variable días a floración confirmó lo reportado por algunos autores (Moreno, 1987; Patiño, 1997; Garzón y Gasca, 1990; Ligarreto, 2006; Pacheco *et al.*, 2011; González, y Casanova *et al.*, 2012) los cuales consideran que la precocidad es una de las características varietales que más muestra interacción con el ambiente, particularmente por los cambios de la temperatura durante el período vegetativo, las densidades de siembra y heterogeneidad de los suelos, todo esto acompañado de la variabilidad genética de los materiales, considerándose así como una de las variables de mayor efecto sobre el rendimiento y sus componentes.

La matriz GxA es utilizada por el modelo AMMI para la respectiva estimación de los componentes principales de interacción (IPCA). De acuerdo a este modelo se encontró que para esta variable con 36 grados de libertad; los dos primeros IPCA explicaron el 84,424% de la variancia de la interacción, siendo el primer componente altamente significativo. Según Pereira *et al.* (2009) los tres primeros componentes principales del análisis AMMI deben explicar más del 60 % para considerarlo suficiente y al menos 70 % como satisfactorio. Por lo tanto los valores explicados en este estudio deben ser considerados satisfactorios.

Snoad y Arthu (1974) mediante técnicas de regresión y análisis de variancia, empleadas en el análisis de estabilidad de seis variedades de arveja cultivadas en cuatro sitios en el este de Inglaterra no encontraron significancia en el factor genotipo por ambiente en la variable días a floración. Resultado posiblemente asociado a las diferentes condiciones climáticas de los dos ensayos. Por otra parte, los análisis de regresión pueden tener una alta correlación entre el índice ambiental empleado y el efecto de la interacción; dicho evento no ocurre en el análisis AMMI puesto que el factor interacción es analizado mediante un análisis de componentes principales el cual no presenta correlación con ninguno de los factores aditivos (Damba, 2001).

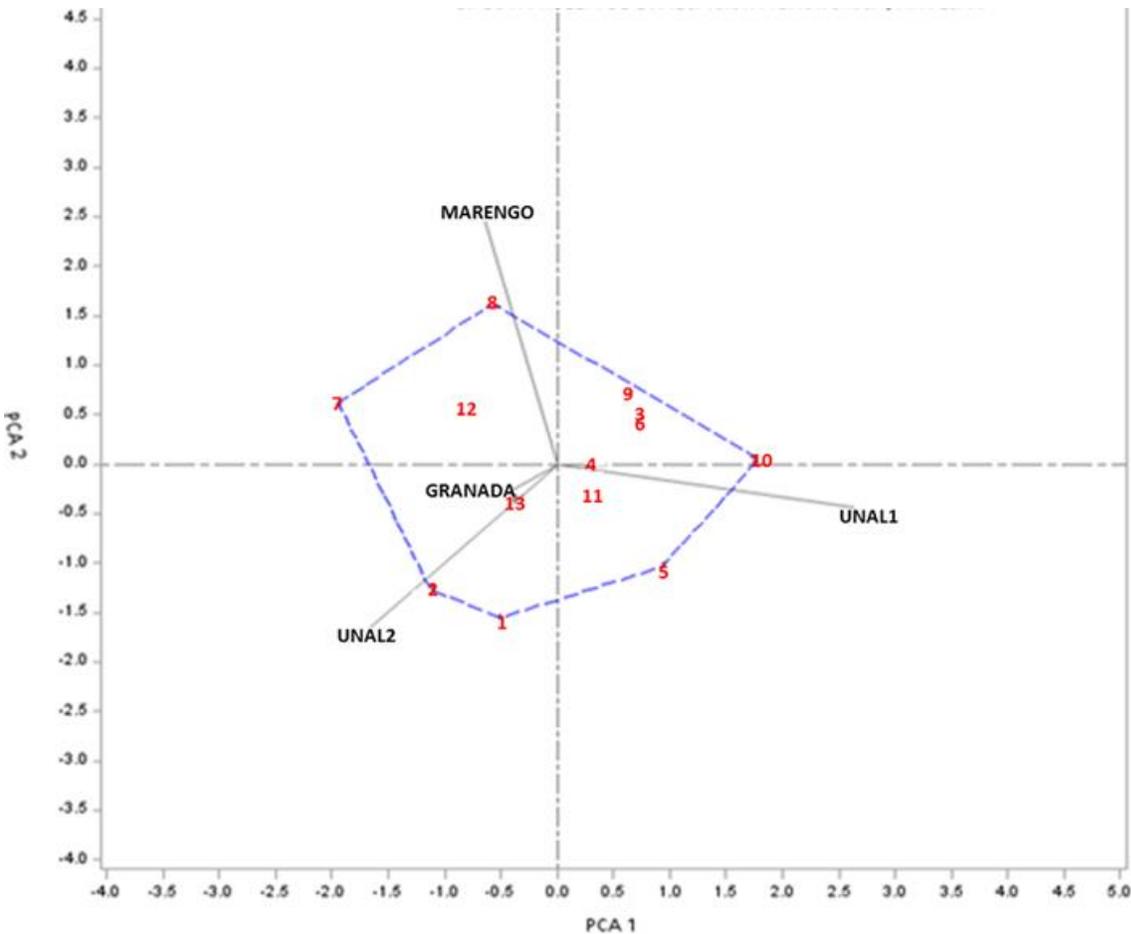
En la Figura 1-2 se muestra la representación gráfica de la contribución de los genotipos y localidades a la interacción considerando los dos primeros ejes de IPCA para los días a floración. Se encontró que la línea (4) UN7637, fue el material más cercano al punto de origen y por ende el más estable; seguido de los materiales (11) UN7539 y (13) UN7555, siendo estas tres líneas las que menos contribuyeron a la interacción. Estos materiales presentaron valores por encima del número promedio de días a floración (53.393 dds) por lo cual son considerados como tardíos. Los genotipos que formaron el polígono de variación o más inestables, fueron 1 (UN5171), 2 (UN6651), 5 (UN6650), 7 (UN7540), 8 (UN7544) y 10 (UN5564). Estas líneas mostraron valores superiores a la media general; lo que sugiere que responden en la medida en que el ambiente tiende a ser mejor.

Algunas líneas mostraron adaptación específica a un determinado ambiente como es el caso de las líneas 2 (UN665) para UNAL2, 8 (UN7544) para Marengo 10 (UN5564) para UNAL1 y 13 (UN7555) para Granada.

En el análisis de localidades respecto a la gráfica biplot, la localidad Granada se ubicó cerca al origen indicando ser más representativo de las condiciones ambientales medias y con baja contribución a la interacción. Las localidades Marengo, UNAL1 y UNAL2

presentaron mayor amplitud en sus vectores y por ende una mayor contribución a la interacción. De acuerdo a su proximidad y posición en los cuadrantes, las localidades Granada y UNAL2 conforman un mismo grupo de ambientes (mega ambiente).

Figura 1-2. Biplot AMMI para Días a floración en 13 genotipos de Arveja evaluados en cuatro ambientes de Cundinamarca.



1.3.2 Arquitectura de la planta y componentes de rendimiento

Con base en los análisis de varianza ANAVA realizados por localidad para las variables asociadas a la arquitectura de la planta y componentes de rendimiento mostraron que RABAS fue la única variable que no presentó significancia para el factor genotipo en la localidad de Granada (Anexo A1 x). RABAS y VAPLA presentaron la misma situación para Marengo. En las localidades UNAL1 y UNAL2 ninguna de las variables presentó valores significativos. UNAL3 fue la única localidad en donde todas las variables relacionadas con

arquitectura de la planta y componentes de rendimiento presentaron diferencias estadísticas significativas y altamente significativas. Patiño *et al.* (1997), ya había reportado diferencias estadísticas altamente significativas para la altura de la planta y el número de vainas por planta en arvejas de tipo arbustivo.

Se encontraron coeficientes de variación (CV) en su mayoría bajos e intermedios para las variables consideradas en esta categoría en las diferentes localidades de evaluación, sin embargo para la variable vainas por planta los CV fueron altos con rangos de 22,725% en la localidad UNAL3 a 51,026% en UNAL1, pero se cumplió el supuesto de normalidad. Valores similares (27,4%) para esta variable fueron reportados por Patiño *et al.* (1997) en la evaluación de nueve variedades de arveja tipo arbustivas para uso industrial. Este resultado se puede asociar con la influencia de las condiciones climáticas de cada zona sobre las líneas, las cuales pueden favorecer o afectar el dato de la variable, posiblemente generando la pérdida de flores por altas lluvias, bajo llenado por sequía, o mayor número de vainas por suelos fértiles y agua disponible.

Para las variables relacionadas con la arquitectura de la planta y componentes de rendimiento, la altura de la planta presentó la mayor variación entre líneas en la localidad UNAL1 con una desviación estándar de 14,582 y por el contrario el menor valor se presentó Granada con 5,457. El menor valor promedio para la variable se obtuvo en Granada con 52,892 cm variando de 40,25 cm (UN7469) a 66,65 cm (UN7544) y la mayor altura promedio en UNAL1 con 102,32 cm variando de 89,55 cm (UN7469) a 119,33 (UN5171); para un promedio general a través de todas las localidades de 79.265 cm. La línea UN7469 mostro el menor promedio a través de todas las localidades con 69,70 cm (Tabla 1-7).

Tabla 1-7. Promedios para altura de planta (cm), de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

LÍNEA	ALTURA DE LA PLANTA (ALTPLA)					PROMEDIO GENERAL
	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	
(1) UN5171	60,35 a	68,35 ba	119,33 a	97,53 a	92,31 ba	85,25 bac
(2) UN6651	42,00 bc	65,15 ba	107,89 a	86,00 a	89,06 ba	76,05 bdc
(3) UN7469	40,25 c	53,15 b	89,55 a	84,20 a	89,93 ba	69,70 d
(4) UN7637	60,70 a	74,10 a	112,44 a	86,73 a	99,81 ba	85,33 bac
(5) UN6650	42,70 bc	65,05 ba	94,55 a	78,13 a	96,31 ba	74,12 dc
(6) UN7429	52,20 bac	59,30 ba	92,00 a	78,46 a	83,25 ba	71,68 d
(7) UN7540	57,90 ba	65,05 ba	99,11 a	102,60 a	108,68 a	85,09bac
(8) UN7544	66,65 a	70,95 ba	107,89 a	101,46 a	100,25 ba	87,74 ba
(9) UN7536	55,65 bac	60,90 ba	108,44 a	94,40 a	100,06 ba	81,94 bdac
(10) UN5564	43,75 bc	60,15 ba	102,66 a	95,80 a	97,18 ba	77,76bdac
(11) UN7539	66,45 a	72,95 a	116,33 a	94,00 a	106,87 a	89,78^a
(12) UN5175	43,95 bc	55,70 ba	90,11 a	99,53 a	96,43 ba	75,18ebdc

Tabla 1-7: (Continuación)

(13) UN7555	54,45 bac	60,25 ba	89,89 a	78,60 a	77,43 b	70,77d
MAXIMO	66,65	74,10	119,33	102,60	108,68	89,78
MINIMO	40,25	53,15	89,55	78,13	77,43	69,70
PROMEDIO	52,892 b	63,927 b	102,32 a	90,574 a	95,202 a	79,26
DS	5,457	6,518	14,582	9,241	9,220	

Números resaltados en negrilla indican los valores máximos y mínimos para promedios de líneas a través de localidades, promedios de localidades y líneas dentro de localidades. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

El número de ramas basales por planta presentó un valor máximo promedio de 2,953 en la localidad Marengo variando de 2,25 (UN5564) a 3,65 (UN7429) y el menor valor promedio se dio en UNAL2 con 1,651 ramas basales por planta con valores en un rango de 1,20 para las líneas UN6651 y UN5175 a 2,53 para UN7544 (Tabla 1-8).

Tabla 1-8. Promedios para numero de ramas basales por planta, de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

RAMAS BASALES POR PLANTA (RABAS)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	1,00 a	3,05 ba	1,53 a	1,33 b	1,80 a	1,77 bdac
(2) UN6651	1,15 a	2,95 ba	1,33 a	1,20 b	1,55 a	1,67 bdc
(3) UN7469	1,15 a	3,20 ba	2,00 a	1,93 ba	2,45 a	2,16 a
(4) UN7637	1,00 a	2,60 ba	1,93 a	1,93 ba	2,45 a	1,98 bac
(5) UN6650	1,10 a	3,25 ba	1,40 a	1,53 ba	2,10 a	1,92 bdac
(6) UN7429	1,10 a	3,65 a	1,60 a	1,93 ba	2,15 a	2,12 a
(7) UN7540	1,10 a	3,00 ba	1,66 a	1,46 b	1,90 a	1,85 bdac
(8) UN7544	1,05 a	3,00 ba	1,73 a	2,53 a	1,95 a	2,04 ba
(9) UN7536	1,15 a	3,05 ba	1,86 a	1,66 ba	2,10 a	1,98 bac
(10) UN5564	1,05 a	2,25 b	1,53 a	1,33 b	1,60 a	1,56 d
(11) UN7539	1,05 a	2,65 ba	2,00 a	1,46 b	1,75 a	1,78 bdac
(12) UN5175	1,15 a	2,70 ba	1,40 a	1,20 b	1,40 a	1,60 dc
(13) UN7555	1,00 a	3,05 ba	1,73 a	1,93 ba	2,05 a	1,96 bdac
MAXIMO	1,15	3,65	2,00	2,53	2,45	2,15
MINIMO	1,00	2,25	1,33	1,20	1,40	1,55
PROMEDIO	1,08c	2,95 a	1,67 b	1,65 b	1,94 b	1,88
DS	0,10	0,40	0,22	0,28	0,35	

En los resultados encontrados para altura de la planta las localidades UNAL (1, 2 y 3) las cuales se establecieron bajo cubierta plástica, mostraron un mayor promedio de altura de planta tanto en la media por localidad como para cada línea. Lo anterior es similar a lo reportado por Pacheco *et al.* (2011), quienes bajo invernadero encontraron que las líneas de menor altura estuvieron en los 1,246 m. La explicación más acorde a estos resultados

se puede relacionar a lo expuesto por Charles-Edwards *et al.* (1986) y Gardner *et al.* (1990); citados por Sánchez *et al.* (2009) quienes indican que una menor incidencia de radiación fotosintéticamente activa (efecto de la cubierta plástica) sobre las plantas, puede ocasionar etiolación, la cual se manifiesta principalmente por un adelgazamiento y alargamiento del tallo.

En las localidades Marengo y Granada establecidas en campo abierto los promedios por localidad y para cada línea estuvieron dentro de los encontrados por Patiño *et al.* (1997) quienes indicaron datos de altura entre 45,2 y 65,6 cm en un trabajo realizado con materiales de porte bajo en condiciones de campo. Igualmente, los valores de este estudio se encuentran dentro del rango establecido por Fenalce (2006) para plantas arbustivas de 50 cm a 70 cm. Bourion *et al.* (2002) atribuyen la altura de la planta principalmente a efectos genéticos y no tanto a efectos ambientales.

Respecto al número de ramas basales por planta, Mera *et al.* (1989) afirman que bajo condiciones favorables y dependiendo de la variedad, las plantas de arveja pueden producir hasta cuatro ramificaciones basales; Pacheco *et al.* (2011) reportaron un valor de ramas basales de 2,51. Sin embargo, en este estudio se obtuvieron valores bajos; solamente la localidad Marengo obtuvo valores superiores (2,95), resultado que se ve reflejado en el análisis de las variables de rendimiento mas adelante, ya que a mayor número de ramas basales mayor es la opción de tener más vainas por planta lo que incide en un mayor rendimiento por planta Pacheco *et al.* (2011).

El promedio general a través de todas las localidades para el número de nudos por planta fue de 17,948, encontrándose el mayor valor en la localidad UNAL2 con 19,210 oscilando entre 17,06 para la línea UN6650 a 21,66 para UN7540. El menor número de nudos promedio por planta se dio en Granada con 15,673 variando de 13,60 (UN6650) a 17,70 (UN7637). La mayor desviación estándar se presentó en UNAL1 (1.485) en donde la línea UN5175 mostro el mínimo valor (16,33) y UN7637 presentó el mayor valor para la variable (21,33), el valor de desviación estándar más bajo se encontró en la localidad de Granada con 0,995 (Tabla 1-9).

Tabla 1-9. Promedios para nudos por planta, de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

NUDOS POR PLANTA (NUPLA)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	15,60 bdac	17,20 ba	19,22 a	19,53 ba	16,97 dc	17,52bdc
(2) UN6651	14,75 bdac	16,70 b	18,21 a	18,53 ba	16,30 d	16,73d
(3) UN7469	14,15 dc	17,40 ba	19,33 a	17,93 ba	18,40 bdac	17,31dc
(4) UN7637	17,70 a	19,80 a	21,33 a	20,26 ba	19,65 bac	19,63^a
(5) UN6650	13,60 d	16,75 b	17,88 a	17,06 b	18,80 bdac	16,74 d

Tabla 1-9: (Continuación)

(6) UN7429	17,05 bac	18,80 ba	19,88 a	19,60 ba	18,55 bdac	18,67bac
(7) UN7540	17,15 ba	19,20 ba	20,11 a	21,66 a	20,65 a	19,62 ^a
(8) UN7544	17,30 a	19,25 ba	19,55 a	19,93 ba	17,80	18,65bac
(9) UN7536	16,20 bdac	18,80 ba	19,88 a	20,06 ba	18,00 bdac	18,43ebac
(10) UN5564	14,30 bdc	17,48 ba	16,99 a	18,80 ba	17,35 bdc	16,88 d
(11) UN7539	16,30 bdac	19,30 ba	19,99 a	19,20 ba	20,50 ba	18,99bba
(12) UN5175	14,10 dc	16,40 b	16,33 a	19,40 ba	17,05 dc	16,52 d
(13) UN7555	15,55 bdac	17,90 ba	19,88 a	17,73 ba	17,47 bdc	17,58ebdc
MAXIMO	17,70	19,80	21,33	21,66	20,65	19,63
MINIMO	13,60	16,40	16,33	17,06	16,30	16,52
PROMEDIO	15,67 b	18,07 ba	19,125 a	19,21 a	18,26 a	17,94
DS	0,995	1,024	1,485	1,059	1,04	

El número observado de nudos por tallo para las localidades bajo cubierta plástica (UNAL1, UNAL1 y UNAL3) coincide con los resultados de otros investigadores en materiales de arveja bajo invernadero. Galindo (2006) encontró que la planta desarrolló de 22,2 a 24,5 nudos en el tallo principal. Pacheco *et al.* (2005) observaron que el nudo a primera flor estuvo entre los 12,8 a 19,0 nudos. Por otra parte y en ensayos a campo abierto Jeuffroy y Devienne (1995), observaron entre 5 y 10 nudos reproductivos en el tallo principal de la arveja. De forma similar, Roche y Jeuffroy (2000) encontraron que el número de nudos reproductivos en arveja estuvo entre 4,8 y 11,3 en 25 ensayos. Estos valores son inferiores a los encontrados en las líneas de estudio para las localidades en campo, rasgo benéfico; según Mazzani (1983) el número de nudos es uno de los componentes que más influye sobre el rendimiento (a más nudos mayor rendimiento).

En una de las variables más importantes dentro de los componentes del rendimiento como lo es el número de vainas por planta, se encontró una mayor variación entre las líneas en la localidad de Marengo con un valor superior en la desviación estándar (6,788) y el mayor promedio respecto a las demás localidades (29,851); para esta localidad los valores de las líneas oscilaron de 23,70 para la línea UN5175 a 36,25 para la línea UN7637. El valor de desviación estándar inferior para el número de vainas por planta se presentó en la localidad de Granada (2,59) al igual que el menor promedio (7,903), siendo el valor mínimo de vainas por planta de 4,30 en la línea UN7469 y un máximo de 12,20 en la línea UN7637. Con base en lo anterior se puede concluir que el ambiente de Granada fue el menos apto para la expresión de esta variable presentando el comportamiento más deficiente respecto a las demás localidades (Tabla 1-10).

Tabla 1-10. Promedio para vainas por planta; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

VAINAS POR PLANTA (VAPLA)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL

Tabla 1-10: (Continuación)

(1) UN5171	8,40 ba	29,90 a	18,38 a	11,73 a	12,65 ba	16,34 ba
(2) UN6651	5,10 ba	29,35 a	14,55 a	15,73 a	11,30 b	15,21ba
(3) UN7469	4,30 b	27,15 a	16,33 a	15,13 a	15,05 ba	15,57ba
(4) UN7637	12,20 a	36,25 a	13,77 a	22,60 a	16,30 ba	20,45a
(5) UN6650	7,70 ba	32,65 a	14,10 a	14,53 a	14,55 ba	16,59ba
(6) UN7429	7,70 ba	31,70 a	10,33 a	13,86 a	10,35 b	15,08ba
(7) UN7540	8,50 ba	31,55 a	8,77 a	13,90 a	21,00 a	17,34ba
(8) UN7544	11,00 ba	32,35 a	10,66 a	15,00 a	10,70 b	16,28ba
(9) UN7536	8,50 ba	26,60 a	7,99 a	13,80 a	15,05 ba	14,77ba
(10) UN5564	4,95 ba	28,42 a	12,33 a	17,60 a	12,55 b	15,19ba
(11) UN7539	10,60 b	31,20 a	8,77 a	14,73 a	10,00 b	15,42ba
(12) UN5175	5,85 ba	23,70 a	7,66 a	14,66 a	12,70 b	13,11b
(13) UN7555	9,65 ba	27,25 a	11,10 a	11,40 a	14,45 ba	15,16ba
MAXIMO	12,20	36,25	18,38	22,600	21,00	20,45
MINIMO	4,30	23,70	7,66	11,400	10,00	13,11
PROMEDIO	7,903 b	29,851 a	11,90 b	14,977 b	13,588 b	15,89
DS	2,407	6,788	4,82	3,34	2,59	

El bajo promedio de vainas por planta para las líneas en la localidad de Granada se atribuye a la pérdida de flores y bajo llenado de vainas debido a factores de clima como la baja precipitación durante el ciclo del cultivo ya anotada anteriormente. Por el contrario la localidad Marengo mostro el mayor valor en precipitación (216 mm durante el ciclo del cultivo) lo cual pudo haber ofrecido mejor condiciones para la mejor expresión de este rasgo en las trece líneas evaluadas.

Estos resultados fueron superiores a los obtenidos por Patiño *et al.* (1997); Garzón y Gasca, (1990) y Siddique *et al.* (2002) quienes encontraron valores máximos de vainas por planta en materiales arbustivos de 5,3; 4,5 y 6,8 respectivamente. Además, fueron superiores a los encontrados por Casanova *et al.* (2012); Pacheco *et al.* (2011) y González y Ligarreto (2006) con datos de 20,25; 18,24 y 14,50 vainas por planta, según el orden mencionado. A pesar de mostrar valores aproximados no superan los máximos mostrados en este estudio. En los trabajos anteriormente citados se emplearon mayores densidades respecto a este estudio, por lo tanto se puede inferir que el incremento del número de plantas por unidad de área puede producir una reducción del número de vainas por planta, lo cual es comprensible si se tiene en cuenta que a mayores densidades hay mayor competencia por luz y nutrientes afectando la expresión de este rasgo.

En el análisis combinado de varianza para las variables asociadas a la arquitectura de la planta se detectó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) y altamente significativas ($p < 0,01$) entre localidades y genotipos. Respecto al factor IGA solo la variable Número de ramas basales por planta presentó diferencias estadísticas significativas (Anexo A2)). En consecuencia el análisis AMMI solo se realizó para esta variable.

Según Marín (1986), el genotipo es relativamente constante si se compara con la variabilidad del ambiente; sin embargo la expresión fenotípica es ampliamente influenciada por los cambios ambientales y cualquier variable puede ser alterada por el mismo. De acuerdo con lo anterior en esta investigación los factores genéticos que controlan las variables relacionadas con la arquitectura de la planta y componentes de rendimiento, a excepción del número de ramas basales por planta, no fueron afectados en su expresión por el ambiente. La uniformidad genética encontrada para estas variables debe ser verificada con posteriores estudios en ambientes contrastantes. Debido al comportamiento diverso de las líneas en estudio a las variaciones ambientales en las diferentes localidades, observado en el análisis combinado para la IGA en la variable ramas basales por planta, da paso a un análisis más detallado de estabilidad

Estos resultados son similares a los encontrados por Snoad y Arthu (1997), quienes en la evaluación de seis variedades de arveja en cuatro sitios en el este de Inglaterra; indicaron alta significancia para el factor L*G en la variable número de ramas basales.

De esta manera, el análisis de estabilidad AMMI permitió detectar diferencias estadísticas significativas ($P < 0,01$) y altamente significativas ($P < 0,05$) entre genotipos, ambientes y la interacción genotipo por ambiente IGA para la variable ramas basales por planta (Tabla 1-11). Para esta variable el factor localidad explicó el 67,283 %, las líneas el 5,555% y el factor interacción el 7,129 % de la variación total observada. Al igual que lo encontrado por Chataika *et al.* (2010) y Goncalves *et al.* (2010) los porcentajes de los cuadrados medios de el factor localidad fueron mayores respecto a el efecto de la línea y la Interaccion; lo cual indica que la contribución de las localidades a la IGA fue mayor respecto a las líneas y una alta diversidad en las localidades.

Tabla 1-11. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca, para las variables relacionadas con arquitectura de la planta y componentes de rendimiento.

ARQUITECTURA DE LA PLANTA Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO			
FV	GL	RABAS	
		Días	
		CM	%
Modelo	67	1,739**	80,612
Bloque	3	0,4182	0,867
Localidad	4	24,320**	67,283
Genotipo	12	0,669**	5,555
GenxLoc	48	0,214*	7,129
Error	166	0,168	19,387
Total	233		100
	R²		0.806
	CV		21.834

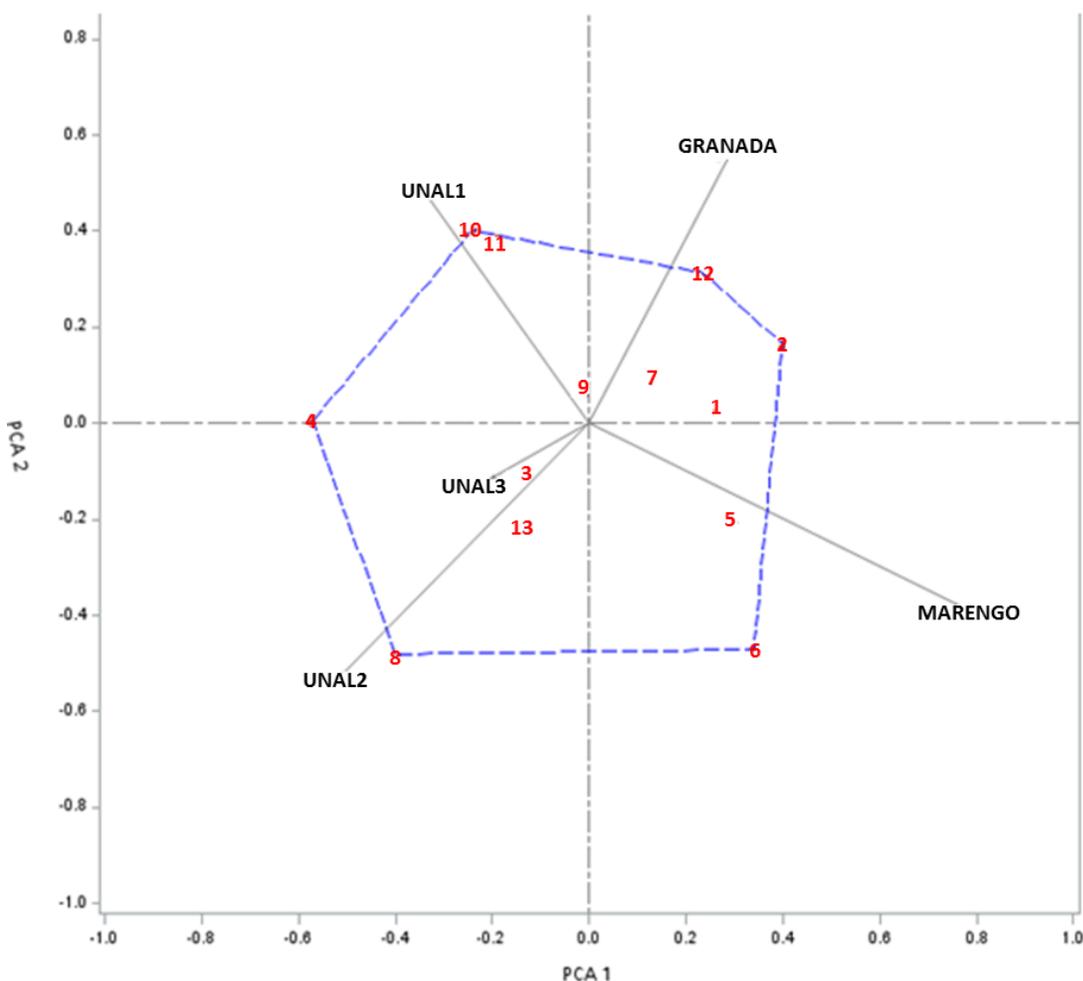
Tabla 1-11: (Continuación)

Componente	Promedio	Términos AMMI	
		CM	%
IPCA1	15	0,341*	44,5199
IPCA2	13	0,305*	34,4939
IPCA3	11	0,170	16,2535
IPCA4	9	0,358	4,7327
Residual			

El análisis multivariado de la IGA (AMMI) para ramas basales por planta indicó que 79,01% de la de la variación se explica con los dos primeros componentes principales (IPCA), y al incluir el tercero se explica el 95,26%, con 39° de libertad. El primer componente fue estadísticamente significativo con un 44,519% de la varianza de la interacción. Estos valores acumulan mas del 70% de la varianza por lo tanto se puede considerar como un valor satisfactorio según lo expuesto por Pereira *et al.* (2009).

En la Figura 1-3 se observa la representación gráfica de la contribución de las líneas y localidades a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para la variable número de ramas basales por planta. De acuerdo a lo ya explicado; para esta variable se encontró que la línea 9 (UN7536) se ubicó en posición cercana al origen de los ejes siendo por lo tanto la mas estable a través de los cinco ambientes de evaluación y también la de más baja contribución a la interacción con relación a las que se encuentran más alejadas, por lo que presentaron menor variación en el número de ramas basales, por interaccionar menos con los ambientes. Esta línea presentó un promedio de ramas basales mayor (1.988) respecto al promedio general (1.882).

Figura 1-3. Biplot AMMI para ramas basales por planta en 13 lineas de arveja evaluados en cinco ambientes de Cundinamarca.



Las líneas 2 (UN6651), 4 (UN7637), 6 (UN7429), 8 (UN7544), 10 (UN5564) y 12 (UN5175), están formando el polígono de variación, lo que indica una variación de su comportamiento a través de las localidades y tienden a ser las más inestables. Por lo tanto el polígono confirma que estas líneas presentaron el mayor efecto positivo o negativo del ambiente sobre la expresión del rasgo. Las líneas 4 (UN7637), 6 (UN7429) y 8 (UN7544) presentan valores promedio de ramas basales superiores a la media general (1.882); lo cual sugiere que responden en la medida en que el ambiente tiende a ser mejor, por el contrario las líneas 2 (UN6651) 10 (UN5564) y 12 (UN5175) mostraron promedios por debajo del promedio general, siendo la línea 10 la de más bajo promedio (1.566).

1.3.3 Rendimiento

En todos los procesos de evaluación y selección se debe tener en cuenta la variable rendimiento. Por lo tanto, en este estudio, este rasgo se cuantificó a través de tres variables: Rendimiento en vaina verde por hectárea (RVV), Rendimiento de grano verde por hectárea (RGV) y Rendimiento de grano seco por hectárea (RGS) (Anexo A1). En los resultados del análisis de varianza por localidad se encontró que para las localidades

Granada y UNAL3 todas las variables evaluadas presentaron diferencias estadísticas significativas y altamente significativas para el factor genotipo. En la localidad Marengo el rendimiento de grano verde con vaina por hectárea (RGV) fue la variable que presentó significancia estadística para genotipo. Además, en las localidades UNAL1 y UNAL2 ninguna de las variables de rendimiento presentaron significancia estadística, comportamiento que fue similar a lo reportado por Casanova *et al.* (2012), que no encontraron significancia entre los genotipos evaluados para rendimiento en vaina verde ni en rendimiento de grano seco.

Respecto a las variables de rendimiento, los coeficientes de variación (CV) presentaron rangos entre 29,156% (UNAL2) a 59,80% (UNAL1) para rendimiento en vaina verde por hectárea (RVV); 30,478% (Marengo) a 55,500 % (UNAL1) para rendimiento por hectárea de grano verde (RGV) y de 25,185% (UNAL3) a 54,635% (UNAL1) para rendimiento de grano seco por hectárea (RGS). Los rendimientos se ven altamente influenciados por las condiciones ambientales de las localidades de evaluación; al igual estos rasgos se encuentran altamente correlacionados con el tamaño, número, peso y estado de madurez de los granos de cada vaina y del número de vainas, factores que pueden explicar los altos valores de Cv (Garzón y Gasca, 1990).

En la localidad Granada se presentaron valores medios y bajos en todas las variables respecto a las demás localidades, hecho que se puede relacionar con la baja precipitación durante el ciclo del cultivo, la mayor altura de la localidad (2711 msnm) respecto a los invernaderos de la facultad de agronomía sede Bogotá (2540 msnm) lugar donde se han realizado las selecciones de estos materiales, el bajo contenido de macro y micronutrientes del sitio mostrado en el análisis de suelo (Tabla 1-5) y por último basados en que el cálculo de rendimiento se realizó tomando en cuenta el número de vainas por planta; la reiterada presencia de pájaros en esta localidad puede catalogarse como un factor importante y a su vez altamente limitante en los componentes del rendimiento y rendimiento González, y Ligarreto (2006).

Una de las variables más importantes para el agricultor como lo es el rendimiento de grano verde con vaina por hectárea mostró un promedio general a través de las cuatro localidades de evaluación de 5286,92 kg/ha. En Granada se presentó el menor promedio por localidad con 2645,93 kg/ha siendo las accesiones UN5564 la de menor rendimiento con 1202,20 kg/ha y UN7544 la de mayor valor con 4317,20 kg/ha. De igual manera, Granada junto con UNAL2 presentaron la menor variación entre materiales debido a los bajos valores de desviación estándar 507,740 y 511,525, respectivamente. La localidad Marengo expresó el mayor promedio con 10248,28 kg/ha y mayor valor de desviación estándar (1325,041) para esta variable, siendo la línea UN5175 la de menor promedio con 7946,00 Kg/ha y UN7544 la de mayor rendimiento con 14008,00 kg/ha (Tabla 1-12).

Tabla 1-12. Promedio para rendimiento en vaina verde por hectarea; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cuatro ambientes en el departamento de Cundinamarca.

RENDIMIENTO EN VAINA VERDE POR HECTAREA (RVV)					
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	2689,8ba	9858,0a	4490,6a	3411,4a	5278,2ba
(2) UN6651	1462,8ba	9786,0a	3184,6a	4007,2a	4754,0ba
(3) UN7469	1462,2ba	9580,0a	5240,6a	4899,4a	5328,0ba
(4) UN7637	3464,0ba	11176,0a	3062,0a	5201,6a	5953,6ba
(5) UN6650	1716,6ba	10854,0a	3184,6a	3883,4a	5106,2ba
(6) UN7429	3548,6ba	12782,0a	2895,2a	4848,6a	6325,2ba
(7) UN7540	3132,2ba	11812,0a	2662,2a	5098,4a	5932,6ba
(8) UN7544	4317,2^a	14008,0a	2994,8a	5798,0a	7119,8a
(9) UN7536	2748,4ba	8450,0a	2078,4a	3396,4a	4373,0ba
(10) UN5564	1202,2b	8872,0a	3002,0a	5095,2a	4613,6ba
(11) UN7539	3538,0ba	8128,0a	2085,0a	3849,0a	4604,8ba
(12) UN5175	1284,0b	7946,0a	1833,6a	4263,0a	3943,2b
(13) UN7555	3829,0ba	9974,0 a	3139,8 ^a	3644,8a	5397,8ba
MAXIMO	4317,2	14008,0	5240,6	5798,0	7119,8
MINIMO	1202,2	7946,0	1833,6	3396,4	3943,2
PROMEDIO	2645,9b	10248,2a	3065,2b	4415,2b	5286,9
DS	507,7	1325,0	728,4	511,5	

Citando estudios realizados en materiales de arveja de carácter arbustivo, que son los más idóneos para la comparación de rendimiento con este trabajo, Casanova *et al.* (2012) evaluando cuatro densidades de siembra encontraron rendimientos inferiores de 4725,56 y máximos de 5968,61; Sánchez y Quevedo (1988) en evaluaciones a seis variedades de arveja industrial de tipo arbustivo encontraron valores mínimos para la variedad Charger con 2237 y máximos para el material Plus con 7.833 kg ha¹.

A excepción de la localidad Granada y por problemas anteriormente mencionados, los resultados encontrados están dentro y por encima de los rangos obtenidos por los autores anteriormente mencionados, factor que puede ser asociado al avanzado ciclo de selección hacia rasgos de rendimiento de cada línea y a la baja densidad de siembra empleada en este estudio respecto a los citados. Martínez y Martínez (1997); y Díaz y Zapata (1990) indican que la arveja es una especie de baja habilidad competitiva por lo que las mayores pérdidas de rendimiento se encuentran en las más altas densidades.

En la evaluación del rendimiento de grano verde por hectárea (Tabla 1-13) en las cuatro localidades se encontró que Granada fue el ambiente de menor respuesta a favor del rendimiento con 1180,36 Kg/ha, encontrando líneas con 634,00 kg/ha (UN5564) hasta

líneas de 1681,20 Kg/ha (UN7637); esta localidad también presentó el mínimo valor de desviación estándar (205,923) y por ende menor variación entre líneas. El ambiente en el que mejor respondieron las líneas fue Marengo con un promedio de 6137,39 Kg/ha, donde la línea UN7539 presentó el menor valor con 5017,40 Kg/ha y el máximo valor de rendimiento para la línea UN7544 con 7036,60 Kg/ha, la diversidad de valores entre líneas para esta localidad también fue la mayor (Ds: 785.769). El promedio general para esta variable fue de 3036,43 Kg/ha.

Tabla 1-13. Promedio para rendimiento de grano verde por hectarea; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cuatro ambientes en el departamento de Cundinamarca.

RENDIMIENTO GRANO VERDE POR HECTAREA (RGV)					
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	1257,0a	6540,6 ^a	3166,0a	1887,4 ^a	3310,8 ^a
(2) UN6651	865,2a	6793,4 ^a	2411,0a	2095,0a	3153,80 ^a
(3) UN7469	665,0a	5582,0a	3427,2a	2765,4 ^a	3111,8 ^a
(4) UN7637	1681,2a	6686,4 ^a	2047,6a	2592,8 ^a	3385,0a
(5) UN6650	866,6a	6956,2 ^a	2152,8a	2108,2 ^a	3148,2 ^a
(6) UN7429	1348,4a	6555,4 ^a	1760,4a	2719,6 ^a	3218,2 ^a
(7) UN7540	1378,0a	6016,0a	1736,2a	2477,8 ^a	3015,60 ^a
(8) UN7544	1518,8a	7036,6^a	2015,8a	2861,6^a	3489,6^a
(9) UN7536	1310,0a	5249,4 ^a	1299,0a	1791,6^a	2536,4^a
(10) UN5564	634,0a	5945,0a	2117,8a	2725,8 ^a	2917,6 ^a
(11) UN7539	1434,4a	5017,4^a	1447,0a	1978,2 ^a	2577,4 ^a
(12) UN5175	722,0a	5387,8 ^a	1407,6a	2418,2 ^a	2565,4 ^a
(13) UN7555	1662,8a	6016,2 ^a	2034,4a	1931,4 ^a	3043,8 ^a
MAXIMO	1681,2	7036,6	3427,2	2861,6	3489,6
MINIMO	634,0	5017,4	1299,00	1791,6	2536,4
PROMEDIO	1180,3b	6137,3^a	2078,6b	2334,8b	3036,4
DS	205,9	785,7	458,4	282,9	

Al igual que para la variable rendimiento en vaina verde; el rendimiento de grano verde fue inferior en Granada y superior en Marengo tanto en el promedio por localidad como entre las líneas. La línea UN7544 presentó los mayores valores en las dos variables para esta última localidad reflejando una correlación positiva entre estos dos rasgos y reflejando el potencial ambiental que ofrece la localidad Marengo para la expresión del rendimiento en verde.

Según Gallego (2005) en frijol es frecuente que ocurra una correlación positiva entre rendimiento y días a floración, por lo tanto, genotipos que entran en senescencia de forma temprana presentan un tamaño pequeño del grano, de manera contraria los genotipos tardíos pueden presentar mayor tamaño de grano y rendimiento. El caso citado se refleja en la línea UN7544, siendo la localidad Marengo una de las más tardías y por lo tanto con mayor tiempo para llenar granos, por ende granos más grandes;

además, la exposición a niveles elevados de CO₂ prolongando el tiempo de fotosíntesis, factor que puede generar el mayor llenado de granos y número de vainas.

Para el rendimiento de grano seco por hectárea, el promedio general a través de las cinco localidades de evaluación fue de 1331,47 Kg/ha en donde Granada fue la localidad de valor mínimo con 553,38 Kg/ha con líneas de rendimiento desde 200,20 Kg/ha para UN5564 hasta 984,40 Kg/ha para UN7555. El mayor promedio del rendimiento de grano seco por hectárea lo mostró la localidad de Marengo con 2651,55 Kg/ha con un valor mínimo para la línea UN5175 (2038,60 Kg/ha) y un máximo para UN7637 (3613,60 Kg/ha). En estas dos localidades también se presentaron los valores mínimos de desviación estándar; Granada con 109,140 y valores máximos en Marengo con 353.773 (Tabla 1-14)).

Tabla 1-14. Promedio para rendimiento de grano seco por hectarea; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cuatro ambientes en el departamento de Cundinamarca.

RENDIMIENTO DE GRANO SECO POR HECTAREA (RGS)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	467,80 bac	2371,20 a	1315,60 a	756,80 a	1068,40 bc	1213,72 bc
(2) UN6651	371,80 bac	2901,00 a	1072,40 a	1065,20 a	930,20 c	1290,24 bac
(3) UN7469	268,80 c	2182,00 a	1184,80 a	1174,80 a	1376,40 bac	1243,72 bac
(4) UN7637	922,80 ba	3613,60 a	1042,40 a	1562,40 a	1581,00 bac	1793,54 a
(5) UN6650	378,60 bac	3004,20 a	1083,20 a	1029,00 a	1429,00 bac	1421,30 bac
(6) UN7429	671,80 bac	2787,00 a	911,20 a	989,40 a	969,40 c	1300,78 bac
(7) UN7540	667,60 bac	2705,60 a	744,40 a	1171,40 a	1841,80 ba	1477,80 bac
(8) UN7544	529,20 bac	2632,00 a	766,80 a	1238,60 a	929,60 c	1243,24 bac
(9) UN7536	653,60 bac	2302,40 a	715,60 a	1085,60 a	1396,20 bac	1267,34 bac
(10) UN5564	200,20 c	2250,80 a	837,60 a	1089,60 a	904,60 c	1066,88 c
(11) UN7539	777,20 bac	2702,20 a	617,20 a	1154,20 a	954,00 c	1280,42 bac
(12) UN5175	300,60 bc	2038,60 a	559,60 a	1034,20 a	1020,20 c	1012,20 c
(13) UN7555	984,40 a	2977,20 a	1155,60 a	1075,00 a	2006,00 a	1697,92 ba
MAXIMO	984,40	3613,60	1315,60	1562,40	2006,00	1793,54
MINIMO	200,20	2038,60	559,60	756,80	904,60	1012,20
PROMEDIO	553,38 c	2651,55 a	923,78 cb	1109,89 cb	1262,20 b	1331,47
DS	109,140	353,773	200,49	128,88	131,65	

Casanova *et al.* (2012) reportaron promedios entre 1435,3 y 1549,2 kg.ha⁻¹ para rendimiento de grano seco; Milan *et al.* (1997) encontraron promedios que oscilan entre 1400 a 1600kg.ha⁻¹ en zonas productoras de Bolivia y Perú, ambos estudios realizados en materiales de carácter arbustivo. Aunque la mayoría de valores por línea y promedios por localidad mostrados en este estudio se encuentran dentro de los reportados por los anteriores autores se resalta la localidad Marengo, ya que bajo el mismo manejo agronómico de los demás sitios superó los resultados mencionados. Por lo tanto, en esta

localidad las líneas expresaron mejor su potencial de rendimiento y la oferta ambiental fue la adecuada.

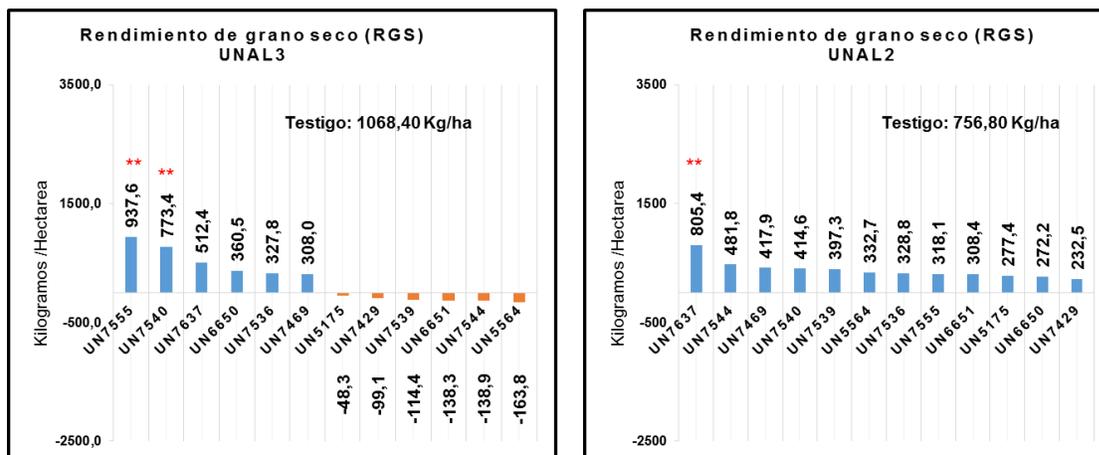
Según Mera (1989) el rendimiento para grano seco es un factor fuertemente influenciado por las condiciones ambientales de la temporada, situación a la que se puede asociar los resultados encontrados en este estudio. Otro factor de correlación positivo para los buenos rendimientos puede ser la baja densidad de siembra empleada en este estudio respecto a la utilizada en los trabajos anteriores. Casanova *et al.* (2012) concluyen que un alto incremento en la densidad de población por encima del óptimo afecta los componentes de rendimiento y finalmente el rendimiento en grano seco reduciendo la viabilidad económica del cultivo.

La prueba de comparación de medias Dunnett entre el testigo la variedad Alejandrita (UN5171) con respecto a las diferentes líneas, no identifico diferencias estadísticas significativas para la variable rendimiento en vaina verde (RVV), en ninguna de las localidades de evaluación. Sin embargo se encontró una diferencia positiva por encima de mil kilos por hectárea para las líneas UN7544 y UN755 en la localidad Granada. UN7544, UN7429, UN7540 y UN7637 mostraron diferencias superiores de 4150, 2925, 1955 y 1319 Kg/ha respectivamente en la localidad Marengo. En UNAL1 solamente la línea UN7469 mostro diferencia positiva respecto al testigo con 750 Kg/ha; por el contrario en UNAL2 todos los materiales fueron superiores al testigo a excepción de UN7536, siendo UN7544 con 2387 y UN7637 con 1790 kg/ha los de mayor diferencia.

Para el rendimiento de grano verde (RGV) en Granada las líneas de mayor diferencia positiva respecto al testigo fueron UN7637 (424,1) y UN7555 (405,8 Kg/ha); en Marengo UN7544 con 496 y UN6650 416,0 Kg/ha; para UNAL1 solamente la línea UN7469 mostro ganancia con 261,2 Kg/ha, por el contrario en la localidad UNAL2 todos las líneas a excepción de UN7536 mostraron diferencia positiva; donde UN7544 y UN7469 con 974,2 y 878,1 Kg/ha respectivamente fueron las de mayor valor.

El rendimiento de grano seco (RGS) para la localidad Granada mostro ganancias respecto al testigo para siete líneas siendo las de mayor valor UN7555 y UN7637 con 516,7 y 455 kg/ha respectivamente; en Marengo las líneas UN7637 (1242,4) y UN6650 (632,9 kg/ha) fueron las de mayor ganancia. En UNAL1 todas las líneas mostraron diferencia negativa respecto al testigo. La prueba de Dunnett para rendimiento de grano seco identifico diferencias significativas a nivel del 5% entre las líneas UN7637 para la localidad UNAL2 con una ganancia de 805,4 Kg/ha y UN7555 y UN7540 para la localidad UNAL3 con 937,6 y 773,4 Kg/ha respectivamente, frente a un testigo con promedios de 756,80 y 1068,40 kg/ha respecto al orden de localidades mencionado (Figura 1-4).

Figura 1-4. Prueba de Dunnet para la variable rendimiento en grano seco. Testigo variedad Alejandrita- UN5171 .



** Materiales que mostraron diferencias estadísticas significativas (0,05) respecto al testigo

Adicionalmente, el análisis de varianza combinado para las variables de rendimiento indicó diferencias estadísticas significativas y altamente significativas para los factores genotipo y localidad. Ninguna de las variables de rendimiento fue significativa para el factor IGA (Anexo A2).

Aunque varios autores (Duarte y Adams, 1963; Mera 1989 y Casanova *et al*, 2012;) determinan en sus trabajos que los rasgos de rendimiento están fuertemente influenciados por las condiciones ambientales y que existe efecto de IGA; para este caso no se expresó lo mismo en el análisis combinado de varianza. Según Aulicino *et al*. (2000) se deben tener localidades con características edafoclimáticas contrastantes las cuales son más útiles para discriminar claramente las líneas y la magnitud de la IGA. Por lo tanto, se podría concluir que las localidades en estudio no fueron lo suficientemente contrastantes para explotar el efecto de la interacción para estos rasgos.

Según Pandey y Vargas (1985) en selecciones avanzadas en especies autóгамas, en donde las poblaciones son de genotipo homocigótico, cada planta puede ser adaptada a un grupo de condiciones ambientales y estaría bien amortiguada, produciendo un fenotipo aceptable sobre condiciones ambientales variables. Con base en lo anterior, otro factor al que se le podría asociar este resultado es al avanzado ciclo de selección hacia rasgos de rendimiento de estos materiales, lo cual puede explicar la uniformidad observada en las cinco localidades y el efecto no significativo respecto al orden de mérito de cada línea para las localidades de evaluación (Vallejo y Estrada, 2002).

Capítulo 2: Efecto de la interacción genotipo ambiente (IGA) sobre factores de calidad comercial y nutricional en líneas avanzadas de arveja

2. Estado del arte

2.1.1 variables de calidad comercial en arveja

La arveja es la segunda leguminosa de grano más importante después del frijol. A diferencia de este, su producción se concentra en países desarrollados (76%), particularmente en áreas templadas de Europa y Oceanía siendo China también un productor importante. A nivel nacional esta leguminosa es de mucha importancia para nuestra alimentación; se consume abundantemente, especialmente es estado fresco (verde), en menor escala como grano seco (FENALCE, 2010).

El mercado nacional se basa en una oferta formada por un gran número de pequeños productores, cuyos volúmenes de venta individualmente no tiene ningún peso dentro del mercado. Esta atomización de los oferentes hace que la comercialización se haga en pequeños volúmenes y dispersa. Otras características de la oferta son que las ventas se hacen en forma masiva en la época de cosecha, y de igual manera no existen ningún tipo de norma de calidad del producto, características a tener en cuenta en trabajos de mejoramiento genético y procesos de selección en la especie (DANE 2015).

Las condiciones de calidad para la compra de arveja por pequeños comerciantes de zonas productoras o por los mayores comerciantes de centrales de abastos son las siguientes: vainas enteras en su totalidad, tamaño de la vaina, número de granos por vaina, plantas sanas, libres de daño visible por enfermedad, insectos o causas físicas, turgentes, crocantes al partir, libres de residuos de tierra o de materiales extraños, libres de humedad externa anormal y sin olores extraños (DANE, 2015)

2.1.2 Usos y ventajas nutricionales del grano de arveja

La arveja es considerada como una buena fuente de proteína, carbohidratos, fibra, minerales, y vitaminas. Su consumo puede ser tanto en fresco en donde el aporte energético esta alrededor de 74 kcal/100 g o en seco con 317 kcal/100 g. Este contenido es dado principalmente a la presencia de hidratos de carbono (56%) y proteínas (21,6%), ya que su contenido en grasa es poco significativo (2,3%). Respecto al aporte de hidratos de carbono, en su mayor parte está el almidón y una pequeña cantidad de sacarosa (Gómez, 2005).

Aunque la calidad nutricional de las proteínas depende de su digestibilidad y de la disponibilidad de sus aminoácidos, el contenido en arveja difiere si son frescas (6%) o secas (22%). Las arvejas secas aportan las mismas proteínas que el resto de las legumbres. No obstante, las proteínas presentes en la arveja, al igual que en otras legumbres, contienen un exceso de lisina y son pobres en metionina. Por lo anterior se aconseja combinarlos con otros alimentos (cereales ricos en metionina, pero les falta lisina) para obtener una proteína de mayor calidad. La fibra que contiene el grano de arveja es de dos tipos; soluble e insoluble. La fibra soluble ayuda a reducir niveles elevados de colesterol y azúcar en sangre, mientras que la fibra insoluble contribuye a regular el buen funcionamiento del intestino, evitando el estreñimiento. Además, la fibra en general, produce sensación de saciedad, con lo cual se nota menos "hambre", y es muy útil para un control y pérdida de peso. Las arvejas secas contienen abundante fibra en su piel, lo que le confiere su textura rígida y dura (Gómez, 2005).

Como la mayoría de las legumbres, la arveja es una buena fuente de vitaminas como tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina, piridoxina (B6), ácido fólico, vitamina K y vitamina C, y en pequeñas cantidades de alfa y beta-carotenos (precursores de la vitamina A), encontramos la alta concentración de vitamina B1. Arvejas congeladas contienen menos cantidad de vitaminas y minerales como consecuencia del procesado del alimento (Gómez, 2005).

P sativum L. es considerada como una buena fuente de minerales como hierro (28- 201 mg/Kg), fósforo (2980- 7710 mg/Kg), magnesio (780- 1710 mg/Kg), zinc (20- 63 mg/Kg) y potasio (7020-12990 mg/Kg), este ultimo contribuye a un 25 a 30 % del contenido total de la leguminosa. Unos 150 gramos de arvejas frescas cubren aproximadamente la cuarta parte de las necesidades diarias de hierro, la quinta de las de fósforo y la sexta de las de magnesio (Amarakoon *et al.*, 2012; Sandberg, 2002a; Wang y Daun, 2004) (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Composición nutritiva de la arveja (*Pisum sativum* L.)

Componentes	Grano verde	Grano seco
Agua	78 (%)	10,64 (%)
Proteínas	6,3 (g/100g)	24,6 (%)
Lípidos	0,4 (g/100g)	1 (%)

Tabla 2-1: (Continuación)

Hidratos de carbono	14,4 (g/100g)	62 (%)
Fibra (2 (g/100g)	ND
Cenizas	9 (g/100g)	ND
Vitamina A	640 (UI)	ND
Vitamina B o Tiamina	0,35 (mg/100g)	ND
Vitamina B2 o Riboflavina	0,14 (mg/100g)	ND
Niacina	2,9 (mg/100g)	ND
Vitamina C o Ac. Ascórbico	27(mg/100g)	ND
Calcio	26 (mg/100g)	0,084
Potasio	316 (mg/100g)	0,903
Sodio	20 (mg/100g)	0,104
Fosforo	116(mg/100g)	0,400
Hierro	1,9 (mg/100g)	0,006
Zinc	34 (mg/kg)	ND
Valor energético	84 (Cal)	3,57

Fuente: Vaca, 2011; Amarakoon *et al.*, 2012.

2.1.3 Biofortificación con Hierro y Zinc

El “Hambre oculta” o deficiencia de micronutrientes es un problema de salud pública a nivel mundial afectando a un tercio de la población principalmente de los países en vías de desarrollo (WHO, 2011; Hotz y Brown 2004). En América Latina las deficiencias tienden involucrar la calidad del nutriente en la dieta, por otra parte en África la falta de alimento es el problema más común. Dentro de las deficiencias nutricionales consideradas problemas de salud pública se encuentran las de micronutrientes como el hierro (Fe), zinc (Zn) y vitamina A (Hotz y Brown 2004). Actualmente una de las alternativas planteadas para combatir las deficiencias por micronutrientes es la biofortificación de cultivos básicos. Esta alternativa plantea el aumento en el contenido de nutrientes en los cultivos mediante técnicas de fitomejoramiento tradicional o biotecnológica (Bouis, 1996; Welch y Graham, 2000; Welch, 2001; Welch & Graham, 2002; Nestel *et al.*, 2006). La biofortificación de los alimentos de consumo habitual con el hierro (Fe) y zinc (Zn) podría ser una solución al problema de desnutrición a nivel global.

Por parte del Grupo Consultivo Internacional para la Investigación en Agricultura Internacional (CGIAR) se ha venido desarrollando un gran proyecto para aumentar la densidad de Fe y Zn en partes comestibles de las plantas a través de fitomejoramiento. Los resultados de este trabajo han demostrado que, dentro de los cultivares de una especie dada, existe una alta la variabilidad en el contenido de Zn y Fe en las partes comestibles de cultivos de alimentos básicos (Tabla 2-2)

Tabla 2-2. Variabilidad del contenido de Fe y Zn del tubérculo o rizoma de yuca, ñame y en las semillas de trigo, frijol, maíz y arroz.

	N	Fe (mg Kg ⁻¹ peso seco)	Zn (mg Kg ⁻¹ peso seco)
Yuca	162	3- 48	4-18
Especies de Ñame			
<i>Dioscorea alata</i>	23	9- 176	8- 25
<i>Dioscorea cayenensis/rotundata</i>	27	7- 103	7- 22
<i>Dioscorea dumetorum</i>	23	22- 187	9- 30
Trigo	170	25- 56	25- 64
Maíz	126	13- 160	11- 95
Frijol común	>1000	34- 89	21- 54
Arroz integral	1138	7- 23	17- 52
Arroz Blanco	286	4- 29	8- 95

N: Numero de cultivares evaluados en cada estudio; Fuente: IFPRI (International Food Policy Research Institute), citado por Frossard *et al.* (2000)

Las variedades modernas de trigo y arroz tienen una menor concentración de Fe y Zn en los granos, frente a las variedades tradicionales. Lo anterior puede ser dado a que los procesos de mejoramiento han sido dirigidos principalmente a aumentar el rendimiento, aumentando de resistencia a enfermedades etc, pero no a la mejora de la concentración de micronutrientes. Por lo tanto, para aumentar las concentraciones de minerales en granos, se deben incluir tempranamente en programas de mejoramiento, variedades tradicionales y padres silvestres los cuales tienen una mayor capacidad para acumular Fe y Zn.. Cakmak *et al.* 1999 citado por Frossard *et al.* (2000) demostro que los trigos tetraploides silvestres (*ssp dicoccoides*), y más particularmente en sus cromosomas 6A y 6B, son fuentes altamente prometedoras de los genes involucrados en la determinación de altos niveles de Fe y Zn, tales líneas podría utilizarse para aumentar el contenido de Fe y Zn en el grano de trigo hexaploide (*ssp aestivum*).

Por otra parte las semillas o granos con altos cotenidos de Fe y Zn no sólo serán de interés para la nutrición humana tambien pueden tener ventajas agronómicas importantes como la producción de plántulas más viables y vigorosas, especialmente en los suelos de baja fertilidad, los cuales cubren grandes superficies en países en desarrollo; que producen las plantas que son más resistentes a enfermedades y que permiten un mejor uso del contenido de agua en el suelo y en el subsuelo, que es una determinante ventaja en climas semiáridos. Además, una concentración alta de micronutrientes en granos y semillas es benefico agronómica y nutricionalmente y ahora es posible introducir tales rasgos en variedades de alto rendimiento. Sin embargo, antes de empezar un programa de mejoramiento, es esencial confirmar que el Fe y Zn de los materiales ricos en estos minerales están siendo suficientemente bien absorbidos y utilizado por los seres humanos Graham y Welch (1996).

▪ Hierro (Fe)

El cuerpo necesita de Fe para la síntesis del oxígeno, proteínas de transporte de la hemoglobina y mioglobina y para la formación de enzimas que contienen Fe que son particularmente importantes para la producción de energía, la defensa inmune y la función de la tiroides. El cuerpo generalmente pierde de 1 ± 1.5 mg de Fe por día. La baja absorción de hierro genera una baja acumulación del mineral y deficiente transporte del mismo a la médula ósea y por ende repercutiendo en bajos niveles de hemoglobina y anemia. La anemia por deficiencia de Fe afecta alrededor de mil millones de personas en todo el mundo y es más común en bebés, niños y mujeres de edad reproductiva en los países en desarrollo, en donde el 50% o más de estas poblaciones son anémicos. Deficiencias de este mineral en la infancia puede desarrollar problemas mentales, aumentar la mortalidad de la madre y el niño en el parto, disminuir el rendimiento laboral y disminuir la resistencia a infecciones (Frossard *et al.*, 2000).

La absorción de Fe de diferentes productos alimenticios varía considerablemente. Hay dos tipos de hierro en los alimentos; los que están presentes tanto en los alimentos vegetales y tejidos animales (no-haem) y los procedentes de la hemoglobina y mioglobina de los productos animales (haem). El segundo representa del 30 al 70 % de Fe total en la carne magra. El Fe no-haem es común en el jugo gástrico, la cantidad de Fe absorbida de cualquiera de los dos tipos depende en gran medida de la presencia de potenciadores e inhibidores sustancias en la comida y en el estado de Fe del consumidor. Muchas regiones pobres del mundo consumen poca tejido animal basando casi exclusivamente su dieta en Fe no-haem. La absorción del Fe no-haem varía ampliamente desde menos del 1 % a más del 90 %, pero es por lo general situada en la región de 1 a 20 %. Las principales sustancias inhibitoras son el ácido fítico de cereales y legumbres como la soya y polifenoles de bebidas como el té y el café. Los principales potenciadores de la absorción de Fe son el ácido ascórbico de las frutas y verduras y los péptidos de tejidos (Cook *et al.*, 1972; MacPhail *et al.*, 1985).

A pesar de su importancia también, el exceso de Fe podría ser un riesgo potencial para la salud. Un ejemplo claro es la su potente capacidad de generación de radicales libres. In vivo el Fe está unido fuertemente a las proteínas. Sin embargo, por su papel como generador de radicales libres, se ha implicado en el cáncer, enfermedades cardiovasculares y la artritis (Halliwell, 1987; Salonen *et al.*, 1992; Ascherio y Willett, 1996).

▪ Zinc (Zn)

La mayor cantidad de Zn en el cuerpo humano se encuentra en los huesos y músculos esqueléticos. El Zn actúa como estabilizador de las estructuras de membranas y componentes celulares. Su función bioquímica es hacer parte esencial de un gran número de enzimas, en particular las involucradas en la síntesis y degradación de hidratos de carbono, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. También juega un papel importante en la expresión génica. Estas funciones bioquímicas del Zn le dan un papel único en el crecimiento y desarrollo. Recientes estudios realizados en Chile, Vietnam y Guatemala reportaron un mayor crecimiento en los lactantes suplementados con -Zn y

una menor incidencia de diarrea e infecciones respiratorias (Prased, 1996; Sandstrom, 1997)

En los seres humanos la deficiencia de Zn reduce el crecimiento, madures sexual y las defensas del sistema inmunológico. La carne y los mariscos son buenas fuentes de Zn. El 70 % de Zn en la dieta de los estadounidenses es suministrado por productos de origen animal. Sin embargo, en muchas partes del mundo en desarrollo, la mayoría de Zn es proporcionado por cereales y semillas de leguminosas. Estos alimentos vegetales son altos en ácido fítico, que es un potente inhibidor de la absorción del Zn aspecto a tener en cuenta para el mejoramiento genético (Ninh *et al.*, 1996; Rivera *et al.*, 1998).

2.1.4 Hierro y zinc en el suelo y su toma por las raíces

Los minerales en la solución del suelo pueden estar en una forma de quelatos y iónica libre la cual es totalmente disponible para la planta. Las propiedades mas importantes que regulan la disponibilidad de estos minerales en el suelo son: el pH, condiciones redox, capacidad de intercambio catiónico, la actividad de los microorganismos, la estructura del suelo y el contenido de agua. Un ejemplo claro se da en un intervalo pH 5,5 a 7,0, en donde el aumento de una unidad de pH provoca una disminución de 30 a 45 veces la concentración de iones de Zn^{2+} en la solución acuosa. Entre pH de 7 y 9, la concentración total de Fe soluble en la solución de los suelos bien aireados no exceda de 10^{-10} M. las deficiencias de Zn también son más comunes producen en suelos tropicales altamente meteorizados tipos de suelos que cubren más o menos el 20% de la superficie terrestre (Driessen y Dudal, 1991).

La distribución de los pelos radiculares, la arquitectura de la raíz y la asociación con micorrizas determinan el volumen de Fe y Zn que pueden ser extraídos del suelo. Más de un 80% de especies terrestres pueden establecer una interacción mutualista con micorrizas. En esta interacción, la planta proporciona hidratos de carbono a los hongos, mientras que los hongos proporcionan a la planta nutriente limitantes para su crecimiento. Los minerales entran en las células de las plantas a través de proteínas de transporte localizadas en la membrana plasmática de la célula. Las membranas contienen diferentes tipos de proteínas de transporte como ATPasas y co-transportadores (Chrispeels *et al.*, 1999).

Respecto a la evolución en la toma de Fe por diferentes especies de plantas existe la estrategia I para dicotiledóneas y monocotiledóneas no gramíneas y la `Estrategia II ' para especies gramíneas. En la Estrategia I, las plantas aumentan la excreción de protones a lo largo de las superficies de la raíz, para ayudar a transformar Fe^{+3} insoluble en el suelo a Fe^{+2} compuestos solubles. También generan una mayor liberación de agentes reductores o quelatos tales como los compuestos fenólicos, desde las raíces hasta el suelo. Las plantas que emplean la estrategia II, como los cereales, se caracterizan por una mayor liberación de fitosideróforos (o aminos no proteinogenico), como respuesta a la deficiencia de Fe. Siendo esta respuesta rápidamente suprimida por el reabastecimiento de Fe. Plantas Estrategia II pueden crecer en suelos calcáreos que no va a apoyar el crecimiento de algunas plantas dicotiledóneas (Welch *et al* 1993; Yi y Guerinot, 1996; Bienfait, 1988).

Respecto al Zn cuando los suelos son deficientes en este elemento, las plantas aumentan la exudación de solutos de bajo peso molecular desde sus raíces, en dicotiledoneas los exudados son generalmente aminoácidos, azúcares y fenoles y en gramíneas fitosideróforos. Según estudios para el transporte de Zn a través de la membrana plasmática existen dos mecanismos uno de alta afinidad y uno de baja afinidad. Esta función se le acarrea a dos genes el ZIP1 y ZIP3, los cuales se expresan en las raíces ante deficiencias de Zn (Grotz *et al.*, 1998).

2.1.5 Hierro y Zinc en los tejidos de la planta

Después de minerales se han tomado por las células de las raíces, se transfieren a los vasos del xilema para la translocación a los brotes. Los minerales se disuelven en el agua, ya sea iones o acompañado como moléculas orgánicas de bajo peso, y su transporte en los vasos del xilema es debido al transporte de agua, que está dirigido desde las raíces a los brotes y que termina en las láminas foliares donde el agua es liberada mediante la transpiración. El transporte de minerales en el floema depende de la capacidad de carga del floema. El Fe se carga en el floema cuando se compleja con nicotianamina. No se sabe si el floema carga el Zn de forma de quelato (Marschne, 1995).

Sin embargo, el suministro de Fe y Zn a los crecientes tejidos, requiere una absorción continua por las raíces. Un aumento en la absorción de nutrientes puede no necesariamente mejorar su contenido en la parte comestible de la planta. Esto es especialmente cierto para Fe. La absorción de este mineral y su translocación hacia las diferentes funciones fisiológicas y bioquímicas de la planta es bien equilibrada para minimizar la acumulación de Fe tóxico en las partes comestibles de la planta (Tabla 2-3).

La concentración de los cationes de estos dos elementos en la planta es muy baja debido a que estos se incorporan a enzimas o compuestos de bajo peso molecular. Una gran cantidad de Fe hace parte de los citocromos y también es empleado en la fotosíntesis para la fijación de carbono en el cloroplasto, el Fe puede temporalmente ser almacenado en cuerpos proteicos que se encuentran en las semillas, xilema, floema y en cloroplastos de hojas si se mantienen en oscuridad. El Zn se encuentra en enzimas involucradas en varios procesos fisiológicos y de crecimiento (Grusak y Dellapenna, 1999).

Tabla 2-3. Agua, Fe, Zn, ácido ascórbico (AA) y ácido fitico en las partes comestibles de algunas plantas cultivadas.

	Agua (% Peso fresco)	Fe (mgkg ⁻¹ peso seco)	Zn	AA	Acido fitico (g kg ⁻¹ peso seco)
Hojas					
Lechuga (hojas sueltas)	94	250	50	3000	0.1
Lechuga (cabeza)	96	70	40	2000	
Col	85	110	30	8000	
Repollo	92	80	25	4000	

Tabla 2-3: (Continuación)

Raíces/ Tuberculos					
Zanahoria	88	40	15	800	0.9
Papa	79	40	20	950	0.1
Batata	70	20	8	550	0.4-1.6
Yuca	60	7	8	510	1.5-2.2
Rábano	95	60	60	4400	
Semillas					
Trigo	11	45	35	0	3.9-13.5
Harina de trigo, blanco	12	13	8	0	4.9
Maíz	10	30	25	0	8.3-22.2
Avena	8	50	40	0	7-11.6
Cebada	9	40	30	0	7.5-11.6
Centeno	11	30	40	0	5.4-14.6
Sorgo	9	50	-	0	9.1-13.5
Arroz integral	12	20	20	0	8.4-8.9
Arroz Blanco	13	9-11	11-12	0	3.4-5
Caupi	77	48	44	109	9.4
Soya	8	170	50	65	10-22.2
Gandul	11	60	30	0	7.1-70
Frutos					
Platano	65	17	4	529	1.8
Tomate	94	70	15	3000	0.4
Naranja	87	8	5	4000	

Fuente: Frossard *et al.* (2000).

- **Hojas:** Los contenidos de Fe, y Zn en las hojas en base a materia seca son más altos que en otros tejidos. Las láminas foliares son los sitios de absorción de luz, la fotosíntesis y la transpiración. Son sitios con alta actividad metabólica y por lo tanto, presentan una alta demanda de Fe y Zn. Alrededor del 80% del Fe de la hoja está contenido en los cloroplastos. Enzimas dependientes del Zn también están involucradas en procesos fotosintéticos y al igual son importantes para la desintoxicación de radicales libres de oxígeno. Menores contenidos, Fe, y Zn son encontrados en laminass foliares cubiertas por las hojas más viejas y que no son expuestas directamente a la luz (cabeza de la lechuga, repollo). Estas hojas son de color verde amarillento (Terry y Low, 1982)
- **Raíces, tuberculos y bulbos:** Para la mayoría de las especies de plantas el contenido de Fe y Zn sobre materia seca en raíces, tubérculos y bulbos son más bajos que en otros tejidos, excepto quizás en frutos. Lo anterior dado a que la función de estos tejidos es para almacenar los carbohidratos fotosintéticos para su uso posterior. Por otro lado, la baja actividad metabólica de estos órganos de almacenamiento puede ser la razón de una baja demanda de hierro y zinc (Udoessien y Aremu ,1991)

- **Frutos:** Los contenidos de Fe y Zn son bajos en los frutos de la mayoría de especies de plantas. La actividad y la demanda metabólica de Fe y Zn parece ser baja también. El contenido de la totalidad de los dos minerales tiende a ser más altas en frutas vegetales en comparación con árboles frutales y bayas (Ferguson *et al.*, 1993).
- **Semillas:** Aunque los niveles de Fe y Zn son relativamente bajos en las semillas, en base a materia seca, su bajo contenido de humedad y el consumo relativamente grande por humanos significa que proporcionan una útil cantidad de ingesta de Fe y Zn. Los contenidos de Fe son menores en los granos de cereales respecto a las semillas de leguminosas. El contenido de Zn es similar a los contenidos de Fe en tanto en semillas de leguminosas y granos de cereales, a pesar de la baja actividad metabólica de estos órganos. El Fe en las semillas se almacena como fitoferritina o fitato para su reutilización durante la germinación. El Zn también se almacena como fitato y al igual puede estar en la proteína de almacenamiento metalotioneína (Reddy *et al.*, 1989).

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Material vegetal

Para esta parte del estudio se seleccionaron 13 líneas avanzadas de Arveja de porte bajo (*Pisum sativum* L.) del programa de desarrollo de cultivares mejorados de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.

Tabla 2-4. Descripción de las 13 líneas avanzadas de arveja seleccionadas para este estudio.

Código	Tratamiento	Genealogía	Pedigree	IS Ponderado
UN5171	1(Testigo)	WSU31-1	Variedad Alejandrita	0,85
UN6651	2	LINEA1205	MA-M-M-MA-CM-M-M	1,86
UN7469	3	WSU31 x (SANTAISABEL x WSU31)	MD-MC-M-M-CM-M-M	1,27
UN7637	4	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1A-MA-M-M-CM-M-M	1,21
UN6650	5	LINEA1048	M-M-M-MA-CM-M-M	0,39
UN7429	6	SANTAISABEL x NEWERAWISCONSIN	MC(F2)-MA-M-MA-CM-M-M	0,32
UN7540	7	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1B-MC-M-M-CM-M-M	0,22
UN7544	8	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1C-MA-M-MA-CM-M-M	0,23
UN7536	9	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1A-MB-M-MA-CM-M-M	0,04
UN5564	10	LINEA1049	M-M-M-M-CM-M-M	-0,13
UN7539	11	(SANTAISABEL x WSU31) x WSU31	1B-MB-M-M-CM-M-M	-0,07
UN5175	12	BANQUET	1-M-M-MA-CM-M-M	-0,71
UN7555	13	SANTAISABEL x WSU31	M(F2)-MB-MA-M-MA-CM-M-M	-0,25

El testigo la variedad Alejandrita (UN5171) es un material de porte bajo (1,20m) con adaptación a la zonas frías de los altiplanos de Cundinamarca y Boyacá, con alturas superiores a los 2200 msnm; su rendimiento promedio en vaina verde es de 7546 kg ha⁻¹. Los materiales que presentaron índice de selección negativo fueron escogidos por variables de alto interés agronómico como lo es la resistencia a *Fusarium* y *ascochyta*, el tipo de grano y el porte de la planta (porte bajo), además el valor del índice no fue tan bajo respecto a los materiales no seleccionados.

2.2.2 Localización y manejo agronómico

El presente trabajo se desarrolló en tres diferentes localidades; entre el segundo semestre del 2013 y el segundo semestre del 2014: los sitios de evaluación fueron Granada, Granja de la Universidad Nacional Marengo- Sede Bogotá, ubicada en el Municipio de Mosquera y el invernadero tres de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional sede Bogotá; todos ubicados en el departamento de Cundinamarca. Respecto al sitio de evaluación bajo invernadero los ensayos se realizaron en tres épocas, segundo semestre del 2013 (UNAL1), primer semestre del 2014 (UNAL2) y segundo semestre del 2014 (UNAL3).

Los datos de localización geográfica, condiciones climáticas, características físicas y químicas relevantes de los suelos y fechas de siembra y cosecha pueden ser vistas en el capítulo 1 numeral 1.2.2

Se establecieron surcos adecuados para el establecimiento de la semilla de arveja. La fertilización a la hora de la siembra se realizó a con NPK 15-15-15 aplicado al surco directamente antes de la distribución de la semilla, se aplicó un insecticida- nematicida de ingrediente activo 2,3-dihidro-2,2-dimetil-7- benzofuranil-metil carbamato; para el control de insectos. El herbicida específico para malezas de hoja ancha de ingrediente activo 3-(3,4-Diclorofenil)-1-metoxi-1metilurea se empleo ocho días después de la siembra localidades de Granada y Marengo. El sistema de tutorado fue el empleado por los agricultores para materiales indeterminado; este asegura el crecimiento de las plantas y facilita las labores agronómicas del cultivo.

2.2.3 Diseño Experimental

Las líneas en cada localidad se evaluaron en un diseño de bloques completos al azar (BCA), con cuatro repeticiones y submuestreo. La unidad experimental fue una parcela de dos surcos de 5 metros de largo; la distancia entre cada planta fue de 20 centímetros y entre surco de 1 metro. Las variables fueron medidas en 5 plantas consideradas como las más vigorosas y en competencia completa

2.2.4 Análisis estadístico de los resultados

Los datos de las evaluaciones se registraron y codificaron en un archivo MS Excel. Esta información fue y procesada con el programa estadístico SAS ® (Statistical Analysis

System, versión v 9.0). Fueron evaluados los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con las pruebas de Shapiro – Wilk y Bartlett respectivamente.

Para el análisis comparativo de las variables de calidad nutricional y comercial de las 13 líneas en las cuatro y cinco localidades se empleó un análisis de varianza individual. Posteriormente se desarrolló un análisis combinado de varianza; el cual determinó que variables presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) y altamente significativas ($P < 0,01$) para así continuar con un análisis de estabilidad para estas variables. Los modelos estadísticos utilizados para estos dos análisis pueden verse en el numeral 1.2.5 del capítulo 1.

▪ **Análisis de estabilidad**

Se realizó un análisis de CP para los efectos no aditivos de la interacción G x A (Gollob, 1968). Este modelo denominado AMMI por Gauch y Zobel (1988), está constituido por parámetros aditivos y multiplicativo (modelo citado en el capítulo 1).

Previamente al análisis se ajustó cada una de las variables con un análisis de covarianza y luego se realizó una prueba de Bartlett para comprobar la homogeneidad de varianza (Steel y Torrie, 1980). El número de ejes posibles (CP) que el modelo puede retener en AMMI es el mínimo ($G-1$; $E-1$). Los ejes no significativos se incluyeron en el residual. Posteriormente se graficó el primer eje del CPI contra el segundo eje (CPI vs. CP2). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SAS (1999) y de acuerdo a los procedimientos establecidos para medias ajustadas por Vargas y Crossa (2000).

2.2.5 Variables registradas

- **Granos por vaina (GVA):** Se separaron 10 vainas en verde o en seco (en seco para UNAL3) al azar entre las plantas seleccionadas, por cada parcela y se procedió a contar el número de granos por cada vaina, expresando finalmente el promedio de granos por vaina.
- **Longitud de vainas (LONVA):** Se recogieron 10 vainas al azar de cada una de las cinco plantas seleccionadas en cada parcela y se midió su longitud. Se expresó en el promedio de longitud por vaina
- **Peso de 100 granos verdes (P100GV):** Se contaron y pesaron 100 granos verdes de cada parcela.
- **Peso de 100 granos secos (P100GS):** Se registró el peso de 100 granos secos en gramos con un porcentaje de humedad del 14%;

- **Peso de vainas verdes con grano por planta (PVAVP):** Este dato se calculó en base al número de vainas por planta (capítulo 1), el peso del grano verde de diez vainas y el peso de diez vainas verdes. Valor dado en gramos
- **Contenidos de Hierro y Zinc en el grano de arveja:** Para la determinación de contenidos de Fe y Zn por cada línea se tomaron tres repeticiones o muestras diferentes de 50 gramos de grano seco; para cada tratamiento por localidad. El análisis de los contenidos fue realizado en el laboratorio de servicios analíticos de la Universidad Nacional; Facultad de Ciencias Agrarias, Sede Bogotá; mediante la técnica de absorción atómica.

Las variables en verde se evaluaron en 4 Ambientes (Granada, Marengo, UNAL1 y UNAL2) por lo tanto la localidad UNAL3 solamente presenta datos para variables en seco.

2.3 Resultados y discusión

Todas las variables evaluadas en este capítulo cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas ya mencionadas en materiales y métodos

2.3.1 Variables de calidad comercial

Para las variables asociadas a calidad comercial (Anexo B1) la localidad de Granada presentó diferencias altamente significativas para el factor genotipo en todas las variables. Longitud de la vaina (LONVA) y peso de vainas verdes con grano por planta (PVAVP) no presentaron significancia a nivel de genotipo en la localidad Marengo. En la localidad UNAL1 la longitud de la vaina (LONVA), el porcentaje de grano verde por vaina (PORGVV) y el peso de vainas verdes con grano por planta (PVAVP), fueron las variables que no mostraron diferencias estadísticamente significativas. El peso de vainas verdes con grano por planta (PVAVP) y el porcentaje de grano verde por vaina (PORGVV) fueron variables que no presentaron diferencias estadísticas significativas en la localidad UNAL2. En la localidad UNAL3 donde solo se realizó la toma de datos para rasgos en seco todas las variables presentaron diferencias estadísticas altamente significativas para el factor genotipo.

Enfocándonos en la tabla anterior se encontraron coeficientes de variación altos para la variable peso de vainas verdes con granos por planta en todas las localidades de evaluación. Según Garzón y Gasca (1990), el peso de las vainas depende de las condiciones climáticas, del tamaño, número, peso y madurez de los granos de dicha vaina; factores que muy seguramente, pueden estar explicando los altos coeficientes de variación presentados

En el número de granos por vaina (Tabla 2-5) el menor promedio fue de 5,690 (Granada) y el mayor de 7,296 (Marengo). El mínimo valor para la desviación estándar se presentó en la localidad de Marengo (0,334) y el mayor valor en Granada (0,39), valores que no expresan una alta diferencia entre localidades respecto a la variación del número de

granos por vaina entre las líneas. En granada, la localidad donde se presentó el mínimo valor de desviación estándar, el mayor número de granos por vaina fue de 6,22 para UN7540 y el menor valor de 4,80 para la línea UN5175 y para la localidad de Marengo la cual presento una mayor amplitud de la variación entre líneas, el valor mínimo para la variable fue de 6,42 para la línea UN7555 y el valor máximo de 8,40 para la línea UN6651. La línea UN7429 fue la de mayor promedio a través de todas las localidades.

Tabla 2-5. Promedios para granos por vaina; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

GRANOS POR VAINA (GVA)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1)UN5171	5,67ba	7,12bc	6,20ba	5,73bc	6,35ba	6,24ebdc
(2)UN6651	6,00a	8,40 a	7,03ba	5,93bac	6,25b	6,75a
(3)UN7469	6,15 ^a	7,45Ba	7,36^a	6,16bac	6,00b	6,61bac
(4)UN7637	5,27ba	7,20bc	6,20ba	5,00c	6,12b	6,00e
(5)UN6650	5,77ba	7,82ba	6,60ba	5,53bc	7,30a	6,66ba
(6)UN7429	5,82ba	7,57ba	7,20 ^a	6,76 ba	6,92ba	6,84 a
(7)UN7540	6,22^a	7,15bc	6,73ba	6,70 ba	6,70ba	6,70ba
(8)UN7544	5,65ba	7,12bc	7,06ba	7,20^a	6,80ba	6,72ba
(9)UN7536	6,05 ^a	7,25bc	6,70ba	5,93 bac	6,45ba	6,49 bdac
(10)UN5564	5,32ba	7,12bc	5,76b	5,80bac	6,35 ba	6,10ed
(11)UN7539	5,52ba	6,95bc	6,73ba	5,50 bc	5,92 b	6,12edc
(12)UN5175	4,80b	7,25Bc	6,73ba	6,60ba	6,60ba	6,36ebdac
(13)UN7555	5,70 ba	6,42 c	5,80 b	5,50 bc	6,67 ba	6,061 ed
MAXIMO	6,22	8,40	7,36	7,20	7,30	6,844
MINIMO	4,80	6,42	5,76	5,00	5,92	6,00
PROMEDIO	5,690 d	7,296 a	6,625 b	6,02 c	6,496 b	6,43
DS	0,397	0,334	0,35	0,379	0,343	

Números resaltados en negrilla indican los valores máximos y mínimos para promedios de líneas a través de localidades, promedios de localidades y líneas dentro de localidades. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Ligarreto y Ospina (2009) indican que el número de granos por vaina es uno de los componentes de rendimiento más importantes en el mejoramiento de la arveja para el caso de Colombia, donde más de 95% de la producción de arveja se destina al mercado de vaina verde. En arveja es ideal un número de granos por vaina igual o mayor a 6; respecto a los valores de este estudio en los promedios por localidad la localidad granada fue la única que no supero este valor. Las líneas en la localidad Marengo fueron superiores al valor antes indicado.

Comparando con estudios realizado en materiales de porte arbustivo Casanova *et al.* (2012) reportaron rangos de granos por vaina de 6,41y 6,66. Siddique *et al.* (2002) con variedades de arveja que soportan la densidad de 80 plantas/m², encontró números de granos por vaina de 4,1 a 8, datos significativos estadísticamente entre materiales. Por último González y Ligarreto (2006), mostraron en su análisis estadístico diferencias significativas entre las variedades evaluadas con el mayor número de granos por vaina

en la variedad Little Marvel con 6 y la variedad banquet de menor número de granos por vaina con 4,23.

Basados en lo citado, las líneas evaluadas en este estudio han sido eficazmente seleccionadas para este rasgo puesto que sus valores están por encima o igual a lo reportado en literatura y además superan los valores encontrados por Gómez, 2008 en la variedad santa Isabel la mas sembrada en el país con 4.57 y 3.93 granos por vaina en las localidades de Madrid y Mosquera (Cundinamarca) respectivamente. En la localidad de Granada respecto a las demás se puede ver que el número de granos producidos por vaina, se refleja con menor o mayor grado según las condiciones ambientales a las que se exponga el desarrollo del cultivo; por lo tanto las bajas precipitaciones, la baja fertilidad del suelo y la mayor altura para esta localidad pudieron haber determinado el bajo comportamiento de las líneas en estudio González, y Ligarreto (2006).

Los valores de desviación estándar para la longitud de la vaina no mostraron gran diferencia entre las localidades, sin embargo la localidad Marengo presento el mayor valor de desviación con 0,52 en donde la línea UN5175 presento la menor longitud con 7,07 cm y UN6651 expreso la mayor longitud con 8,25 cm (máximo valor para todas las localidades). Al contrario el mínimo valor de desviación estándar se encontró en UNAL2 (0,25), siendo la línea UN7536 la de menor valor con 6,85 cm de longitud de vaina y UN7429 la de mayor longitud (7,79 cm). El promedio para esta variable oscilo entre 7,20 cm para UNAL1 mostrando a las líneas UN7536 (6,70 cm) y UN6650 (7,63 cm) como la de mayor y menor valor respectivamente; a 7,64 cm para la localidad de Marengo. Esta variable tuvo un promedio general a través de las localidades de 7,442 (Tabla 2-6).

Tabla 2-6. Promedios para longitud de la vaina; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

GRANOS PORVAINA (GVA)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1)UN5171	5,67ba	7,12bc	6,20ba	5,73bc	6,35ba	6,24ebdc
(2)UN6651	6,00a	8,40 a	7,03ba	5,93bac	6,25b	6,75 ^a
(3)UN7469	6,15a	7,45Ba	7,36a	6,16bac	6,00b	6,61bac
(4)UN7637	5,27ba	7,20bc	6,20ba	5,00c	6,12b	6,00e
(5)UN6650	5,77ba	7,82ba	6,60ba	5,53bc	7,30a	6,66ba
(6)UN7429	5,82ba	7,57ba	7,20a	6,76 ba	6,92ba	6,84 a
(7)UN7540	6,22a	7,15bc	6,73ba	6,70 ba	6,70ba	6,70ba
(8)UN7544	5,65ba	7,12bc	7,06ba	7,20a	6,80ba	6,72ba
(9)UN7536	6,05a	7,25bc	6,70ba	5,93 bac	6,45ba	6,49 bdc
(10)UN5564	5,32ba	7,12bc	5,76b	5,80bac	6,35 ba	6,10ed
(11)UN7539	5,52ba	6,95bc	6,73ba	5,50 bc	5,92 b	6,12edc
(12)UN5175	4,80b	7,25Bc	6,73ba	6,60ba	6,60ba	6,36ebdc
(13)UN7555	5,70 ba	6,42 c	5,80 b	5,50 bc	6,67 ba	6,061 ed
MAXIMO	6,22	8,40	7,36	7,20	7,30	6,844
MINIMO	4,80	6,42	5,76	5,00	5,92	6,00
PROMEDIO	5,690 d	7,296 a	6,625 b	6,02 c	6,496 b	6,43
DS	0,397	0,334	0,35	0,379	0,343	

La línea UN7429 presento el mayor promedio de longitud de vaina a través de las localidades con 7,96 cm, valor que se correlaciona positivamente con el componente número de granos por vaina donde esta línea también fue la de mayor valor. Según Galindo y Clavijo (2007) acorde con la longitud de la vaina, la planta presenta un número de óvulos guardando un espaciamiento necesario para el desarrollo posterior de los granos; por lo tanto es de esperar que vainas de mayor longitud permitan un mayor número de granos, hipótesis que en este estudio se confirmó para algunas líneas.

Casanova *et al.* (2012), encontró diferencias estadísticas significativas entre líneas para el rasgo de longitud de la vaina con un valor mínimo de 6,32 y un máximo de 7,45 cm; Pacheco *et al.* (2011) encontro una media general de 7,20 cm. Gómez 2008 encontro para la localidad Mosquera un valor de 6.87 cm para la variedad Santa lasabel y 7.191 cm para el material WSU31 (Testigo en este estudio) y en la localidad Madrid Cundinamarca la variedad santa Isabel promedio 7.00 cm y WSU31 con 7,65 cm. Finalmente Galindo (2006), con la variedad santa Isabel mostro promedios generales para longitud de la vaina en la granja experimental Marengo de la Universidad Nacional de 5,76 cm.

En general los resultados de este estudio se encuentran entre y por encima de los rangos encontrados por otros autores. Por otra parte, en el análisis de varianza y en la prueba de comparación de medias los resultados obtenidos para este rasgo se encontró muy poca variación entre las líneas evaluadas, siendo probable que las líneas en estudio compartan los mismos genes para este carácter.

Se reflejaron extremos destacados para la variable peso de 100 granos verdes. Por un lado y con un mayor valor de desviación estándar se encontró la localidad UNAL1 (11,32), indicando una mayor amplitud de variación entre lineas para este rasgo, en esta localidad se presentó la línea de máximo valor a través de los sitios de evaluación siendo la UN5564 con 69,67 gramos; el valor minimo en esta localidad fue de 45,23 g para UN7429. Al contrario la localidad de Marengo con el valor más bajo de desviación estándar (3,95) expreso un valor máximo para la variable de 68,10 para la línea UN7555 y un valor mínimo de 48,87 g para UN7539, al igual esta localidad fue la de mayor promedio con 56,20 g. UNAL2 fue la localidad que presento el menor promedio respecto a las demás con 53,39g en donde la línea UN7469 fue la de mayor valor con 61,03 g y UN7539 la línea de menor valor con 43,03 g (Tabla 2-7).

Tabla 2-7. Promedios para el peso de 100 granos verdes; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

PESO DE 100 GRANOS VERDES (P100GV)					
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	52,87 bac	60,85 bac	54,98 a	58,60 ba	56,83 bac
(2) UN6651	55,35 bac	55,75 bdc	54,95 a	50,56 ba	54,15 bac
(3) UN7469	54,00 bac	55,90 bdc	58,77 a	61,03 a	57,43 bac

Tabla 2-7: (Continuación)

(4) UN7637	51,80 bc	52,15 dc	51,10 a	50,76 ba	51,45 bc
(5) UN6650	50,42 c	55,12 bdc	49,43 a	54,10 ba	52,27 bac
(6) UN7429	64,47 a	55,62 bdc	45,23 a	59,50 ba	56,21 bac
(7) UN7540	54,87 bac	54,00 bdc	60,27 a	55,26 ba	56,10 bac
(8) UN7544	51,60 c	61,84 bac	62,30 a	59,43 ba	58,79 ba
(9) UN7536	53,02 bac	54,50 bdc	49,70 a	46,41 ba	50,91 bc
(10) UN5564	48,82 c	57,42 bdac	69,67 a	55,96 ba	57,97 bac
(11) UN7539	51,00 c	48,87 d	49,93 a	43,03 b	48,21 bc
(12) UN5175	51,16 c	64,17 ba	52,30 a	52,16 ba	51,87 bac
(13) UN7555	64,30 ba	68,10 a	64,27 a	49,73 ba	61,60 a
MAXIMO	64,47	68,10	69,67	61,03	61,60
MINIMO	46,82	48,87	45,23	43,033	48,21
PROMEDIO	54,13	57,25	55,61	53,39	55,22
DS	4,226	3,957	11,328	4,773	

Un valor de 3,014 de desviación estándar para la localidad Marengo permitió una buena discriminación entre líneas para el peso de 100 granos secos, siendo el mayor valor respecto a los demás sitios de evaluación, se encontraron valores desde 23,00 (UN7469) hasta 36,22 (UN755) (Tabla 2-8). La localidad UNAL1 mostro los valores más bajos respecto a la desviación estándar (1,63) y promedio entre localidades (24,345 g) en donde los valores oscilaron entre 20,20 g para la línea UN5171 a 32,00 g para UN7555. Cabe resaltar que la línea UN7555 fue el material de mejor comportamiento para esta variable a través de todas las localidades expresando un máximo en UNAL3 con 41,75 g. El valor promedio máximo para el rasgo se dio en la localidad UNAL3 con 28,353 g.

Tabla 2-8. Promedios para el peso de 100 granos secos; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco ambientes en el departamento de Cundinamarca.

PESO DE 100 GRANOS SECOS (P100GS)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	21,60 fe	25,77 b	20,20 c	22,90 bc	24,97 cbd	23,26ef
(2) UN6651	23,70 fced	25,02 b	22,10 bc	15,90 c	26,07 cbd	22,956ef
(3) UN7469	23,35 fced	23,00 b	22,70 bc	24,80 bc	30,25 cbd	24,93 cefd
(4) UN7637	30,22 b	28,57 ba	25,23 bc	27,90 ba	31,70 cb	28,96b
(5) UN6650	21,15 fe	25,25 b	22,26 bc	23,70 bc	27,35 cbd	24,05 ef
(6) UN7429	27,85 cbd	25,85 b	27,06 ba	23,63 bc	26,95 cbd	26,37cebd
(7) UN7540	24,65 fcebd	25,27 b	26,66 ba	24,76 bc	22,32 d	24,62 efd
(8) UN7544	22,77 fed	26,05 b	23,30 bc	24,46 bc	25,65 cbd	24,51 efd
(9) UN7536	28,82 cb	28,71 ba	27,00 b	26,20 b	29,35 cbd	28,17cb
(10) UN5564	18,97 f	24,48 b	20,93 bc	21,00 bc	24,00 cd	21,98 f
(11) UN7539	24,92 cebd	27,37 ba	24,66 bc	27,53 ba	33,20 b	27,70cbd
(12) UN5175	22,75 fed	23,85 b	22,30 bc	21,66 bc	25,02 cbd	23,24ef
(13) UN7555	37,25 a	36,22 a	32,00 a	36,96 a	41,75 a	37,100
MAXIMO	37,25	36,22	32,00	36,96	41,75	37,10 ^a
MINIMO	18,97	23,00	20,20	15,90	22,32	21,98
PROMEDIO	25,23 b	26,57 ba	24,34 b	24,72 b	28,35 a	25,99
DS	1,903	3,014	1,637	2,703	2,789	

Según Duarte y Adams (1963), el peso de los granos es de los componentes que más influye en el rendimiento. Casanova *et al.* (2012), en materiales arbustivos de arveja bajo cuatro densidades de siembra encontró pesos mínimos de 100 granos de 22,11 y máximos de 23,50 gramos; González y Ligarreto (2006), reportaron máximos en la variedad banquet con 29.73 g los datos máximos y mínimos de este estudio estuvieron por encima de los anteriormente reportados; este resultado se puede relacionar con la baja densidad de siembra empleada. Al disminuir la densidad de siembra el peso de las semillas aumenta, debido a que a menor competencia intraespecífica por la toma de nutrientes y a mayor aireación se favorece el desarrollo fisiológico y reproductivo de las plantas y por ende mayor peso de los granos(Forero y Ligarreto, 2009).

Gómez (2008) encontró valores para el material WSU31 en las localidades de Madrid y Mosquera Cundinamarca de 22.80 y 22.52 gramos; este estudio mostro promedios muy similares para esta variedad empleada como testigo, tanto por localidad como a través de localidades. Retomando el anterior autor los valores del material santa Isabel también evaluado en las dos localidades de Cundinamarca mostraron máximos muy similares a los de este estudio (Madrid 37.88 y Mosquera 38.45 gramos). Lo anterior refleja que las líneas empleadas están al mismo nivel del material más sembrado en el país, respecto al peso de 100 granos secos.

En la Tabla 2-9 se presentan los valores promedios para el porcentaje de grano verde por vaina; la mayor variación entre líneas se encontró en la localidad. Para este rasgo las variaciones entre líneas dentro de cada localidad fueron bajas siendo UNAL1 la de mayor valor con 5.43 y la de menor variación UNAL2 con 3.24. El menor porcentaje de grano verde se presentó en la localidad Granada con 47,39 % variando de 36.14% para la línea UN7544 hasta 57,79 % para la línea UN6651 y el mayor porcentaje lo mostro la localidad UNAL1 69.25 % oscilando desde 60.98 para la línea UN7429 hasta 77.25 % para UN5175; para un promedio general a través de localidades de 57,24%.

Tabla 2-9. Promedios para porcentaje de grano verde por vaina; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cuatro ambientes en el departamento de Cundinamarca.

PORCENTAJE DE GRANO VERDE POR VAINA (PORGVV)					
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	46,33 ebdfc	66.82 a	71.63 a	55.02 a	59.47 ba
(2) UN6651	57,79 a	69.29 a	76.12 a	53.38 a	64.06 a
(3) UN7469	45,68 ebdfc	59.33 bdac	65.34 a	56.19 a	56.04 bcd
(4) UN7637	48,95 ebdca	60.21 bdac	67.41 a	51.50 a	56.67 bc
(5) UN6650	50,90 bdca	64.09 a	73.80 a	55.58 a	60.58 ba
(6) UN7429	39,41 ef	51.03 dc	60.98 a	55.86 a	50.10 d
(7) UN7540	44,59 edfc	52.63 bdc	64.84 a	48.81 a	52.13 cd
(8) UN7544	36.14 f	50.60 d	68.71 a	48.88 a	49.98 d
(9) UN7536	48.89 ebdca	61.80 bdac	62.53	52.74 a	56.33 bcd
(10) UN5564	54,67 bac	67.16 a	70.12 a	53.38 a	61.27 ba

Tabla 1-10: (Continuación)

(11) UN7539	40,88 edf	63.58 ba	70.83 a	51.39 a	56.03 bcd
(12) UN5175	56,60 ba	67.59 a	77.25 a	57.29 a	64.31 a
(13) UN7555	45,27	62.22 bac	67.89 a	53.35 a	56.69 bc
MAXIMO	57,79	69.29	77.25	57.29	64.31
MINIMO	36.14	50.60	60.98	48.81	49.98
PROMEDIO	47.39 d	61.26 b	69.25 a	53.34 c	57.24
DS	3.80	3.79	5.43	3.24	

La variable peso de vainas verdes con grano por planta, solo se evaluó en cuatro localidades (Tabla 2-10) el menor promedio para esta variable se encontró en la localidad de Granada con 52,91 g al igual que el menor valor de desviación estándar (20,30) las líneas dentro de esta localidad mostraron valores desde 24,04 g para UN5564 hasta 86,34 g para UN7544. La localidad Marengo presento el máximo valor respecto al promedio entre localidades con 204,96 g y el mayor valor de desviación estándar (53,00), donde la línea UN5175 con 158,90 g fue la de menor valor y UN754 con 280,14 g la de mayor valor resaltando entre los demás sitios.

Tabla 2-10. Promedios para el peso de vainas verdes con grano por planta; de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cuatro ambientes en el departamento de Cundinamarca

PESO DE VAINAS VERDES CON GRANO POR PLANTA (PVAVP)					
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	53,79 ba	197,14 a	89,81 a	68,23 a	105,56 ba
(2) UN6651	29,25 ba	195,73 a	63,58 a	80,14 a	95,08 ba
(3) UN7469	29,24 ba	191,61 a	104,81 a	97,98 a	106,56ba
(4) UN7637	69,28 ba	223,52 a	61,24 a	104,03 a	119,07ba
(5) UN6650	34,33 ba	217,08 a	63,69 a	77,66 a	102,12ba
(6) UN7429	70,97 ba	255,63 a	57,90 a	96,97 a	126,50 ba
(7) UN7540	62,64 ba	236,23 a	53,24 a	101,97 a	118,65ba
(8) UN7544	86,34 a	280,14 a	59,89 a	115,96 a	142,39a
(9) UN7536	54,96 ba	169,01 a	41,56 a	67,93 a	87,46 b
(10) UN5564	24,04 b	177,45 a	60,04 a	101,90 a	92,27ba
(11) UN7539	70,76 ba	162,56 a	41,70 a	76,98 a	92,09 b
(12) UN5175	25,68 b	158,90 a	36,67 a	85,26 a	78,86b
(13) UN7555	76,58 ba	199,49 a	62,79 a	72,89 a	107,95ba
MAXIMO	86,34	280,14	104,81	115,96	142,39
MINIMO	24,04	158,90	36,67	67,93	78,86b
PROMEDIO	52,91 b	204,96 a	61,30 b	88,30 b	105,73
DS	20,30	53,00	29,13	20,46	

Patiño *et al.* (1997), con variedades arbustivas encontraron rangos de peso de vainas verdes por planta entre 3,6 gramos para Rondifon y 7,8 gr para Marifon; valores muy inferiores a los encontrados en este estudio, esto resultado puede ser dado a la baja

densidad de siembra empleada respecto al anterior autor puesto que un incremento de la de población por encima del óptimo, afecta los componentes de rendimiento (Casanova *et al.*, 2012).

En el análisis combinado de varianza para las variables relacionadas con calidad comercial (Anexo B2) todas las variables a excepción del peso de cien granos verdes presentaron diferencias estadísticamente significativas y altamente significativas para los factores localidad y genotipo; solamente las variables, porcentaje de grano verde por vaina (PORGVV), peso de 100 granos secos (P100GS) y granos por vaina (GVA) y presentaron diferencias estadísticas significativas y altamente significativas para el factor IGA respectivamente. Resultados similares fueron encontrados por Snoad y Arthu (1997) y Gonzales (2001) para granos por vaina y peso de 100 granos secos.

La significancia encontrada para en factor IGA, para estas dos variables, nos indica una respuesta diferencial de las 13 líneas que formaron parte de este trabajo, a las variaciones ambientales en las diferentes localidades. Por lo tanto se requiere de un estudio más detallado de estabilidad y así analizar y cuantificar la naturaleza de dicha interacción y establecer las localidades que más contribuyen a dicho factor y cuales permiten una mejor discriminación, en cuanto a cada variable, adicionalmente, determinar genotipos estables, de adaptación específica y la posibilidad de agrupar localidades que presenten un mismo patrón de respuesta

El análisis AMMI detectó diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) y altamente significativa ($P < 0,01$) entre ambientes, genotipos y la interacción genotipo por ambiente (IAG) para las tres variables consideradas después del análisis combinado dentro de la categoría de calidad comercial (Tabla 2-11).

Para las variables granos por vaina (GVA), porcentaje de grano verde por vaina (PORGVV) y peso de 100 granos secos (P100GS) la localidad mostro el 45,33, 54,34 y 6,91%, las líneas el 13,03, 13,89 y 52,97%; y el efecto de la IGA con un 19,645, 7,15 y 11,12 % de la varianza total, respectivamente. Respecto a lo anterior podemos ver que para la variable granos por vaina y porcentaje de grano verde por vaina el ambiente contribuye de mayor forma respecto a el efecto de la línea y la IGA; indicando diversidad en las localidades de estudio (Gauch y Zobel, 1997). Por el contrario para el peso de 100 granos secos (P100GS) es relevante destacar un menor efecto del ambiente en la expresión de este carácter y una mayor contribución de la línea a la variación observada. Estos porcentajes de aportes del genotipo y el ambiente concuerdan con lo encontrado por Gonzales (2001) en 18 materiales de arveja evaluados en diferentes zonas de Valladolid y Madrid España

Tabla 2-11. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cuatro y cinco localidades del departamento de cundinamarca, para las variables de componentes de rendimiento.

CALIDAD COMERCIAL								
FV	GL	GVA		P100GS		GL	PORGVV	
		Numero		Gramos			Porcentaje	
		CM	%	CM	%		CM	%
Modelo	67	1,750**	78,171	69,264**	74.761	54	322,416**	78,904
Bloque	3	0,247	0,495	12,008	0.580	3	135,124**	1,837
Localidad	4	17,004**	45,331	107,324**	6.915	3	3996,952**	54,342
Genotipo	12	1,629**	13,033	274,009**	52.971	12	255,538**	13,897
GenxLoc	48	0,614**	19,645	14,383*	11.122	36	43.882*	7,159
Error	166	0,197	21,828	9,437	25.238	127	27.805	15,878
Total	233		100		100	181		100
R²			0,788		0,747			0.832
CV			6,865		11,819			9.210
Promedio			6,469		25,991			57.248
Componente		Términos AMMI		Términos AMMI			Términos AMMI	
		CM	%	CM	%		CM	%
IPCA1	14	0,964**	41,713	25,130**	48.705	14	68.219**	51.493
IPCA2	12	0,807**	30,269	15,996	26.868	12	47.816	30.937
IPCA3	10	0,696**	22,082	11,535	6.394	10	32.586	17.569
IPCA4		0,228	5,936	6,906	8,031		0.000	0.000
Residual								

El análisis AMMI para la variable granos por vaina encontró que los tres primeros componentes con 36 grados de libertad acumularon más del 94,06% de la varianza total de la interacción, además la prueba de F indico que estos tres componentes son altamente significativos. Con los mismos grados de libertad de la variable anterior, el 99,99 y 81,96% de la varianza total de la interacción fue explicado por los tres primeros IPCA para el porcentaje de grano verde por vaina y el peso de 100 granos secos (P100GS). En estos dos rasgos solamente el primer componente fue estadísticamente altamente significativo. Por el porcentaje de varianza que acumularon los IPCA en las dos variables no es necesario considerar más ejes pues el efecto residual es muy poco y no significativo.

El porcentaje de varianza acumulada por los dos primeros componentes para granos por vaina y peso de 100 granos secos fue de 75,573 y 78,426 % respectivamente; resultados superiores a lo encontrado por Gonzales (2001) quien evaluo 20 líneas de arveja en las localidades de Madrid y Valladolid durante cuatro años, reportando un porcentaje de varianza total acumulada no superior al 64 % en los dos primeros componentes. Respecto a la variable porcentaje de grano verde por vaina la varianza acumulada en estos dos componentes fue de 82,43. Cabe resaltar que se hace énfasis en los dos

primeros componentes puesto que AMMI emplea un análisis bidimensional y no permite la interpretación de más de dos componentes.

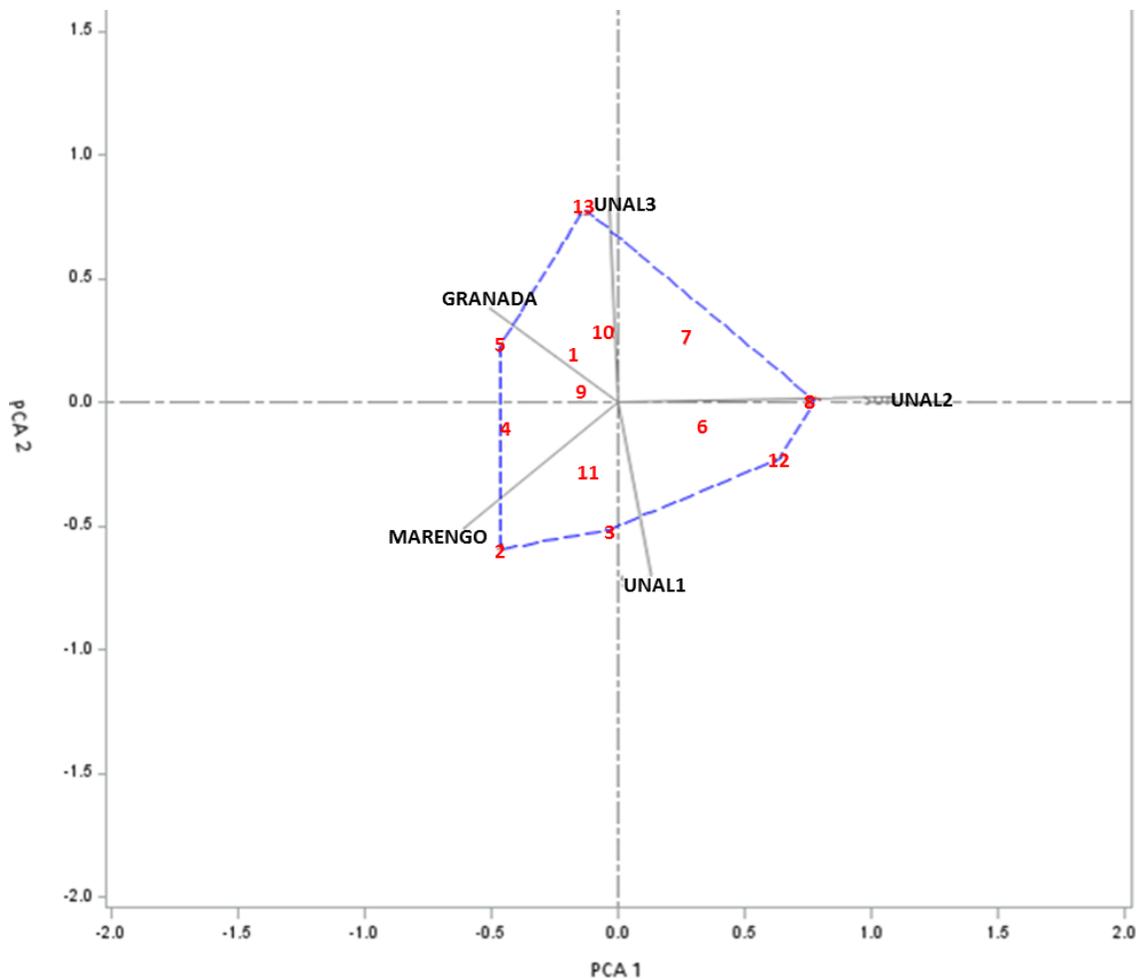
En especies relacionadas como frijol y en variables de rendimiento de grano, altamente correlacionadas con estas tres variables (Forero y Ligarreto, 2009). Gallegos *et al* (2012) en un análisis multivariado de la IGA (AMMI) indicó que 55 % de la variación se explica con los dos primeros componentes principales, y al incluir el tercero se explica el 68.9 %. Goncalves *et al.* (2010) al evaluar 14 líneas de frijol establecidas en 24 localidades encontraron que un 83.4 % de la SC de la IGA se explicó por tres componentes principales. Carbonell *et al.* (2004) evaluó 18 variedades de frijol y en 23 ambientes de Brasil, mediante el método AMMI observó que el primer componente principal absorbe 26,20% y que, junto con el segundo, se acumula 46.27%. Según el criterio de Pereira *et al.* (2009) los tres primeros componentes principales del análisis AMMI deben explicar más del 60 % para considerarlo suficiente y al menos 70 % como satisfactorio; situación que cumplen ampliamente estos resultados.

En análisis de estabilidad con la metodología AMMI para rendimiento de trigo Yau (1995) y Vargas *et al.* (1999), también encontraron más de dos componentes significativos estadísticamente. Crossa *et al.* (1990), con maíz y Van Oosterom *et al.*, 1993) con cebada indicaron cinco ejes significativos:

En la Figura 2-1 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para el número de granos por vaina. La línea 9 (UN7536) ubicada en posición más cercana al origen de los ejes contribuyó poco a la interacción con relación a los que se encuentran más alejados, por lo que presentaron menor variación en el número de granos por vaina, siendo esta la línea más estable, por interactuar menos con los ambientes.

Las líneas de arveja 2 (UN6651), 3 (UN7469), 4 (UN7637), 5 (UN6650), 8 (UN7544), 12 (UN5175) y 13 (UN7555) formaron el polígono de variación y fueron las que presentaron mayor diferenciación (efecto positivo o negativo) en número de granos por vaina a través de las localidades. Las líneas 2, 3, 5 y 8 presentaron número de granos por vaina superiores a la media general (6,438) ; lo cual sugiere que responden en la medida en que el ambiente tiende a ser mejor a diferencia de las líneas 4, 12 y 13, siendo la línea 4 la de que obtuvo el más bajo promedio (6,000). Algunas líneas mostraron adaptación específica a una determinada localidad como es el caso de la línea 2 para Marengo; la línea 3 para UNAL1; la línea 5 para Granada; la línea 8 para UNAL2 y la línea 13 para UNAL3.

Figura 2-1. Biplot AMMI para granos por vaina en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.



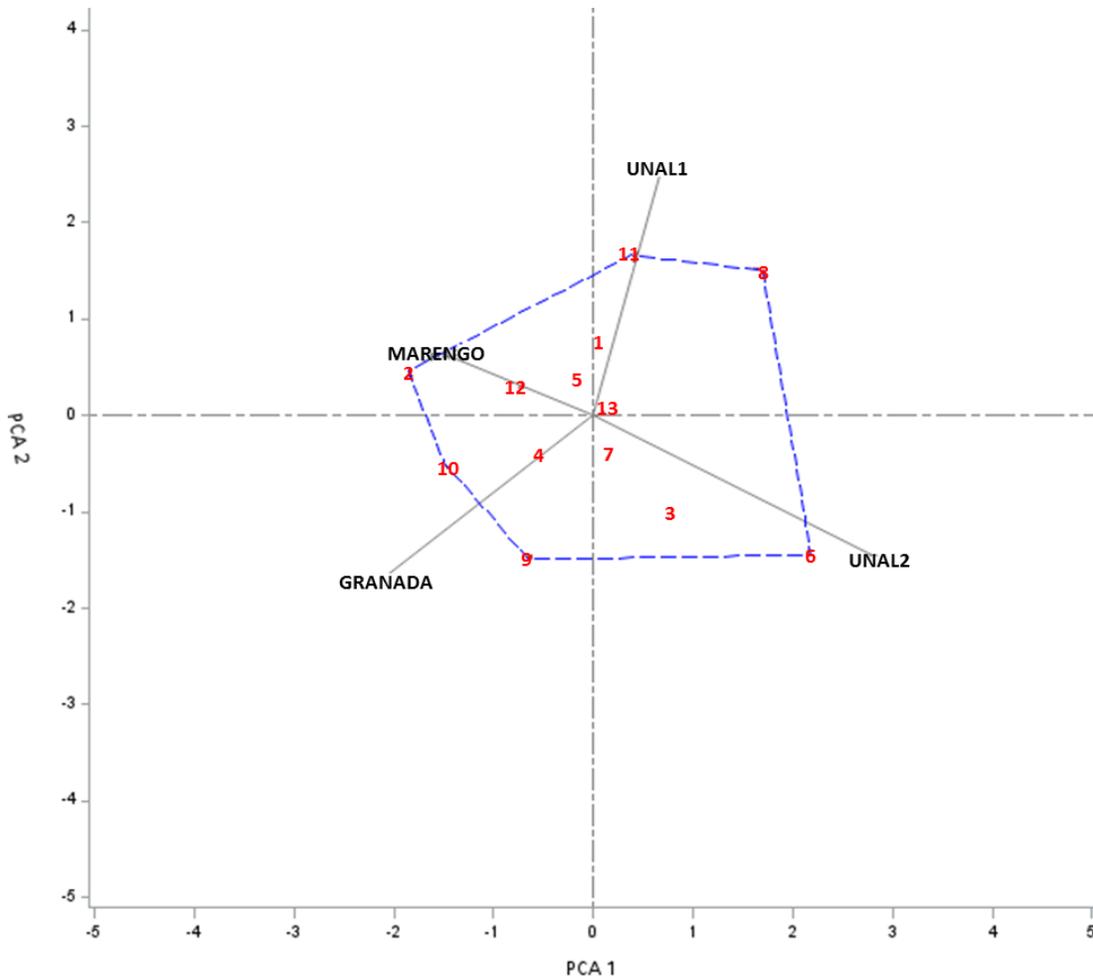
En cuanto a las localidades ninguna de las cinco en las que se evaluó este rasgo se posicionó cerca al origen, por el contrario las todas las localidades en especial UNAL2 presentaron mayor amplitud en sus escores lo que indica su mayor contribución a la interacción. Para esta variable no se encontraron localidades próximas en los cuadrantes ni similares en la longitud de los vectores por lo tanto no podemos asumir la posibilidad de mega ambientes.

En la figura 2-2 se muestra la representación gráfica de la contribución de los genotipos y localidades a la interacción considerando los dos primeros ejes de ACP para porcentaje de grano verde por vaina.

Según los criterios descritos anteriormente, la línea 13 (UN7555) con un promedio de 56.697% mostró ser el más estable a través de localidades (más cercana al centro de origen de los ejes), seguido de las líneas 5 (UN6650) y 7 (UN7540), donde la línea 5 mostró un valor promedio de 60.587% superior al promedio general (57.248%). Las líneas 2 (UN6651), 6 (UN7429), 8 (UN7544), 9 (UN7536), 10 (UN5564) y 11 (UN7539) formaron el polígono de variación y fueron las que presentaron mayor diferenciación o

inestabilidad en el porcentaje de grano verde por vaina. Por lo tanto las líneas 2 y 10 presentaron valores superiores a la media general (57.24%); lo cual sugiere que responden en la medida en que el ambiente tiende a ser mejor a diferencia de las demás líneas con promedio por debajo del promedio general, siendo la línea 8 la de más bajo promedio (49.984 %).

Figura 2-2. Biplot AMMI para porcentaje de grano verde por vaina en 13 genotipos de arveja evaluados en cinco ambientes de Cundinamarca.



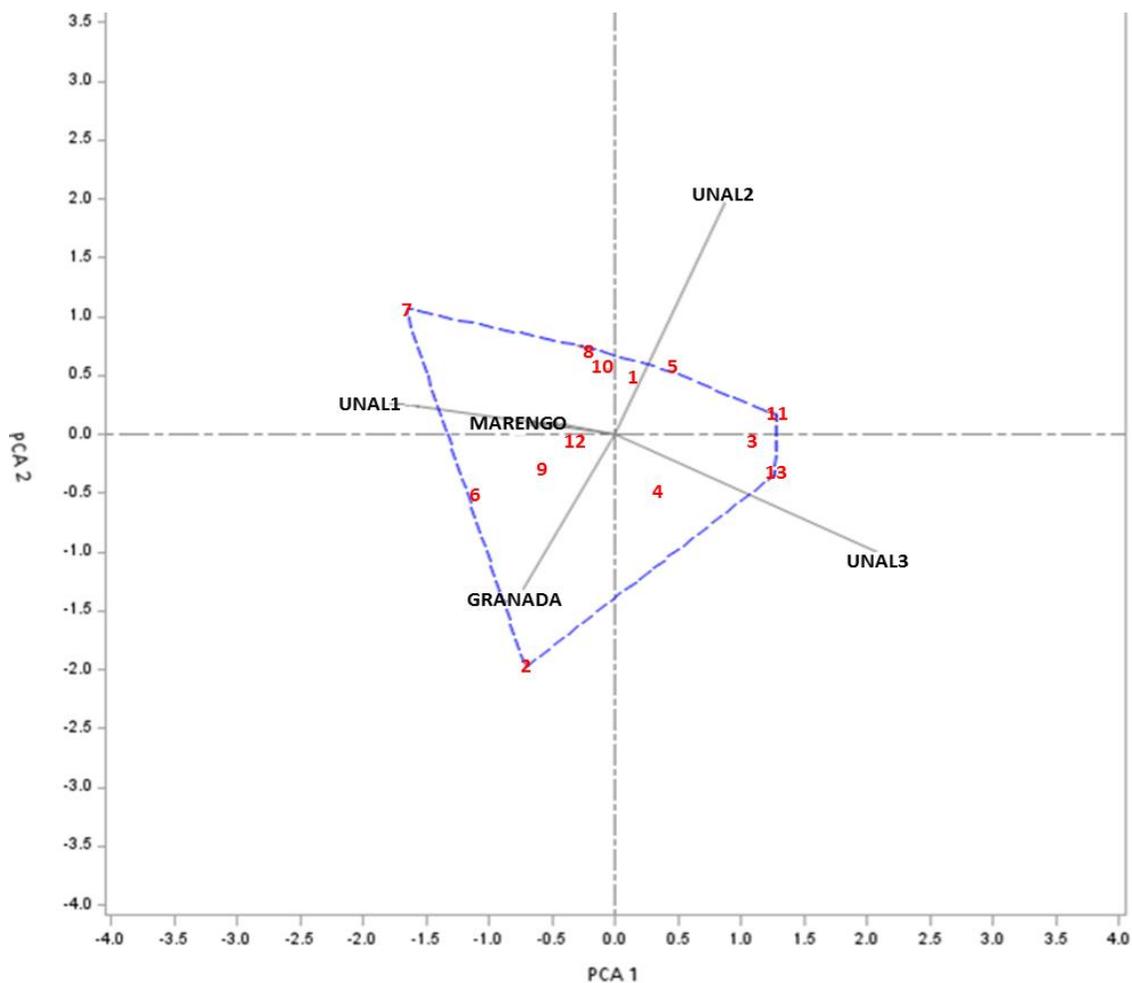
Algunas líneas mostraron adaptación específica (correlación positiva) a una determinada localidad como es el caso de la línea 2 para Marengo, la línea 6 para UNAL2 y la línea 11 para UNAL1

En cuanto a las localidades aquellas posicionadas próximas al origen como Marengo se puede considerar representativa de las condiciones ambientales promedio con respecto a los factores importantes para la interacción. Las localidades Granada, UNAL1 y UNAL2 mostraron una mayor longitud de sus vectores y por ende una mayor variación y

contribución a la interacción, permitiendo además una mayor discriminación del comportamiento promedios de las diferentes líneas. El modelo AMMI no permitió agrupar localidades en grupos homogéneos

En la Figura 2-3 se muestra las líneas y localidades para la variable peso de 100 granos secos, en donde se encontró que la localidad Marengo fue la que menos contribuyó a la diversidad entre líneas debido a la corta magnitud del vector. Las Localidades de mayor aporte a la variación entre líneas fueron UNAL1, UNAL2 y UNAL3 por su mayor longitud de vectores. La localidad granada presento una magnitud de vector intermedia por ende un intermedio aporte a la interacción.

Figura 2-3. Biplot AMMI para peso de 100 granos secos en 13 líneas de arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.



Para el caso de las diferentes líneas de arveja se encontró que la línea 12 (UN5175) fue la más estable a través de las cinco localidades ubicándose cerca al origen, con un promedio (23,244g) inferior al promedio general (25,991g) las líneas que presentaron mayor variación, a través de las localidades, fueron la 2(UN6651), 7 (UN7540), 11 (UN7539) y 13 (UN7555) formando el polígono de variación. De las anteriores líneas la 11 y 13 presentaron pesos promedio superiores a la media general; lo cual sugiere que responden en la medida en que el ambiente tiende a ser mejor, siendo la línea 13 la de mayor promedio en peso (37,100). por otra parte las líneas 2 y 7 presentaron promedio por debajo del promedio general.

2.3.2 Variables de calidad nutricional

A nivel general, los contenidos de hierro y zinc entre las semillas de las trece líneas evaluadas en las cinco localidades presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0.05$ o $P < 0.01$) para el factor genotipo, a excepción de los contenidos de hierro en Granada. Estos resultados potencian las diferencias genéticas a nivel de micronutrientes de las líneas de arveja evaluadas, permitiendo discriminar líneas de altos, bajos o intermedios contenidos de hierro y zinc, interesantes para futuros programas de mejoramiento enfocados hacia biofortificación (Anexo B1).

Los trabajos enfocados en el contenido de estos micronutrientes en variedades nacionales son nulos. Sin embargo estos resultados son comparables con lo realizado por Amarakoon *et al.* (2012) quienes evaluaron seis materiales de arveja (*Pisum sativum* L.) en siete localidades de Dakota del Norte, EE.UU. los autores citados se enfocaron en el análisis del contenido de hierro (Fe), zinc (Zn), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo total (P), concentración de ácido fítico (PA), encontrando diferencias estadísticas significativas para el factor genotipo en cada localidad.

Los coeficientes de variación (CV) para el contenido de Hierro presentaron una amplitud de variación de 2,506 para la localidad UNAL1 a 29,218 % para Granada. Respecto al contenido de zinc en el grano de arveja se encontró el mínimo valor de CV en la localidad de Marengo con 2,848% y los máximos valores en las localidades UNAL2 y Granada con 12,181 y 12,020 % respectivamente. Los valores de coeficientes de variación para el contenido de estos dos micronutrientes fueron bajos e intermedios lo cual indica la acertada metodología experimental utilizada y buen control del error. En base a lo anterior encontramos que para el contenido de estos dos micronutrientes en el grano de arveja se encontró que las localidades Granada y UNAL2 fue la localidad de mayor variación para este rasgo y Marengo la localidad menos variable (Anexo B1).

En la Tabla 2-12 se presentan los valores promedios para el contenido de hierro en los granos de arveja. La mayor variación entre las líneas para este rasgo se encontró en la localidad Granada con una desviación estándar de 14,727 y con un valor mínimo de 52,40 mg/kg para la línea UN7539 y un valor máximo de 93,50 mg/kg para UN7536, por otra parte esta localidad fue la de mayor promedio.(63,423 mg/kg). El menor valor de desviación estándar (menor variabilidad entre líneas) se dio en UNAL1 con 1,246, en

esta localidad obtuvo la línea con mas altos contenidos de hierro para todos los sitios de evaluación; UN5171 con 97,867 mg/kg.

Tabla 2-12. Promedios para contenidos de hierro (mg/kg); de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca.

HIERRO (Fe)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	64,07 a	43,300 g	97,867 a	52,700 bac	51,100 bc	61,81 a
(2) UN6651	63,10 a	64,600 b	69,367 b	50,000 bc	47,033 dc	58,82 ba
(3) UN7469	63,40 a	53,933 cb	61,200 cb	47,633 bc	51,767 bc	55,59 bdac
(4) UN7637	60,07 a	49,967 cfed	45,367 g	49,733 bc	49,533 c	48,65 bdc
(5) UN6650	61,20 a	55,700 b	65,267 cb	58,933 ba	55,033 ba	59,23 ba
(6) UN7429	67,10 a	52,500 cbd	59,233 ed	55,100 bac	49,067 c	56,60 bac
(7) UN7540	58,23 a	48,567 fed	66,133 b	52,667 bac	59,000 a	56,92 bac
(8) UN7544	63,20 a	53,733 cb	55,967 ef	47,767 bc	42,033 d	52,54 bdac
(9) UN7536	93,50 a	45,167 gf	66,767 b	55,600 bac	49,933 bc	62,19 a
(10) UN5564	59,10 a	36,467 h	59,300 ed	49,100 bc	58,900 a	52,57 bdac
(11) UN7539	52,40 a	36,200 h	58,200 ed	45,367 c	33,367 e	45,11 d
(12) UN5175	66,23 a	50,633 ced	57,500 ed	62,267 a	48,400 c	57,01 bac
(13) UN7555	52,90 a	47,100 gfe	51,300 f	54,233 bac	35,100 e	48,13 dc
MAXIMO	93,50	64,600	97,867	69,400	59,000	62,19
MINIMO	52,40	36,200	45,367	45,367	33,367	45,11
PROMEDIO	63,423 a	49,067 a	62,574 a	52,392 a	48,482 a	55,187
DS	14,727	1,300	1,246	3,236	1,437	

El menor contenido promedio de hierro se obtuvo en la localidad UNAL3 con 48,482 mg/kg variando de 33,367 para UN7539 a 59,000 mg/kg para UN7540, No se encontraron diferencias significativas entre localidades. El promedio general a través de las localidades fue de 55,187 mg/kg de hierro. El máximo contenido de hierro a travez de las cinco localidades lo obtuvo la línea UN7536 con 62,19 y el minimo fue para UN7539 con 45,11 mg/kg; la prueba de comparación de medias tukey mostro diferencias altamente significativas entre estos dos materiales.

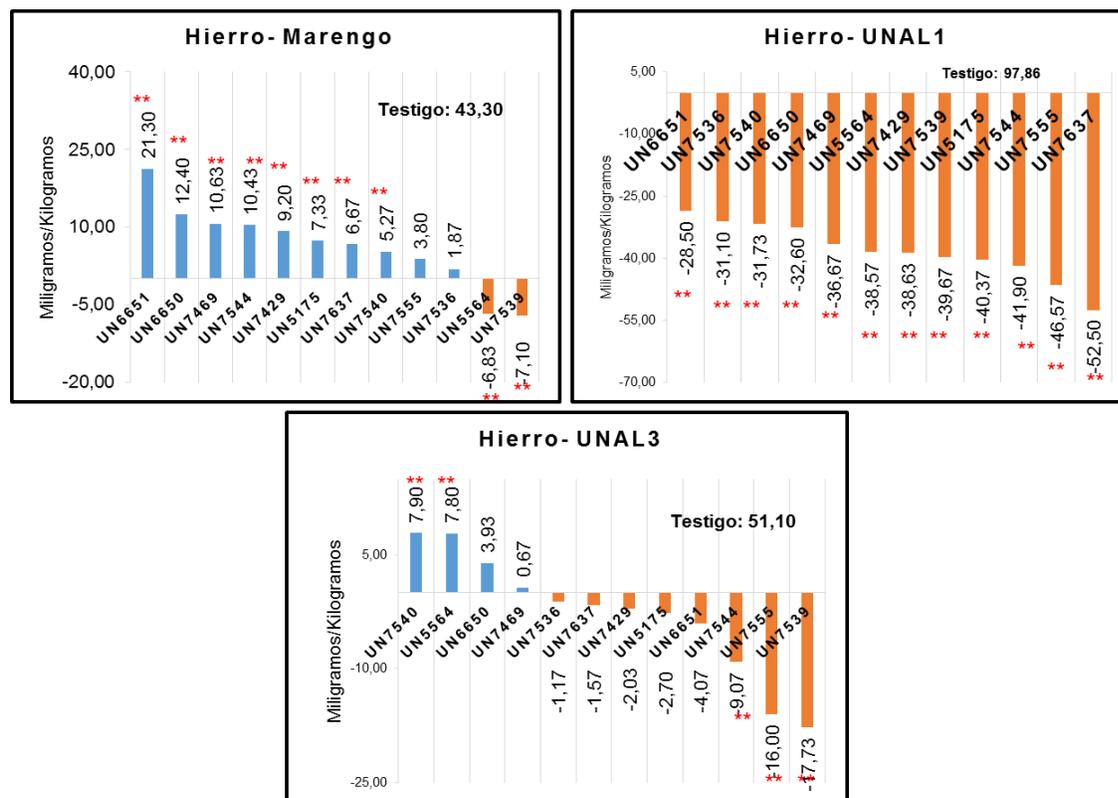
Estos resultados son similares a lo encontrado por Amarakoon *et al.* (2012) quien indico promedios en materiales de arveja de 46 para DS Admiral (yellow) a 54 mg/kg para Cruiser (green);a través de siete localidades, con un promedio general de 52 mg/kg, los materiales extremos fueron diferentes estadísticamente según tukey. Respecto a las localidades el autor anteriormente citado encontró rangos de 44 a 60 mg/kg, valores inferiores a los mostrados en este estudio.

Blair *et al.* (2009) con genotipos de frijol del centro de agricultura tropical (CIAT) evaluaron los contenidos de hierro y zinc en una población de 87 líneas endogámicas

recombinantes en las localidades del Darien y Popayan departamento del valle del cauca. Los padres de esta población fueron los materiales DOR364 considerado de bajo contenido y G19833 como un material de alto contenido en hierro, los contenidos de zinc aunque fueron similares a los de hierro no fueron significativos. Los resultados obtenidos por el anterior autor indicaron que los padres DOR364 y G19833 presentaron valores de 42,8 y 66.7 mg/kg, para Popayan y de 49.0 y 75.5 mg/kg para el Darien; la media de la población en Popayan fue de 58,46 y de 58,82 mg/kg para el Darien. Cvitanich *et al* (2011): analizaron el contenido en hierro y zinc de diferentes tejidos de la semilla en frijoles mesoamericanos y andinos del banco de germoplama de CIAT; encontrando que los cotiledones son los órganos de mayor almacenamiento (80–96% del peso total de la semilla) con concentraciones de hierro de 43 a 80 mg/kg. Con base a lo anterior este estudio reúne una amplia diversidad de líneas respecto al contenido de este microelemento, destacando algunos materiales de gran potencial basados en la comparación con frijol, especie reconocida por sus altos niveles de este nutriente (Beebe *et al.*, 2000).

La prueba de Dunnett para contenidos de hierro de acuerdo a la comparación del testigo variedad Alejandrita (UN5171) con respecto a las diferentes líneas, no identifico diferencias significativas para la localidad de Granada y UNAL2. Para la localidad Marengo se encontraron diferencias significativas para las líneas UN6651, UN6650, UN7469, UN7544, UN7429, UN5175, UN7637, y UN7540 con ventajas positivas respecto al testigo de 21,30; 12,40; 10,63; 10,43; 9,20; 7,33; 6,67 y 5,27 mg/kg de hierro respectivamente. Para UNAL1 se encontraron diferencias estadísticas significativas a favor del testigo respecto a todas las líneas. Finalmente en la localidad UNAL3 se mostraron diferencias estadísticas significativas a favor de las líneas UN7540 y UN5564 con 7,90 y 7,80 mg/kg de hierro respectivamente (Figura 2-4).

Figura 2-4. Prueba de Dunnet para el contenido de hierro. Testigo variedad Alejandrita-UN5171.



** Materiales que mostraron diferencias estadísticas significativas (0,05) respecto al testigo

Las condiciones ambientales en especial edáficas en la localidad UNAL2 permitieron alcanzar lo más altos contenidos de zinc en los granos de arveja (Tabla 2-13) con 65,817 mg/kg, donde la línea UN5175 fue la de máximo contenido con 78.067 y UN7539 la de menor valor (51,867). Granada fue otra localidad en donde las líneas de arveja dieron su mejor expresión para este rasgo (62,820 mg/kg). El menor promedio para contenido de zinc se dio en la localidad UNAL3 con un promedio de 50,043 mg/kg; los rangos de valores estuvieron entre 39,067 (UN7539) a 81,100 mg/kg (UN6650).

Tabla 2-13. Promedios para contenidos de Zinc (mg/kg); de la evaluación de 13 líneas avanzadas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca.

ZINC (Zn)						
LÍNEA	GRANADA	MARENGO	UNAL 1	UNAL2	UNAL3	PROMEDIO GENERAL
(1) UN5171	61,133 bdac	47,667 ih	44,367 fe	75,067 ba	46,567 c	54,96 ced
(2) UN6651	62,267 bdac	68,000 c	53,867 dc	71,700 ba	48,967 c	60,96
(3) UN7469	53,467 bdc	69,233 c	61,267 b	70,833 ba	48,833 c	60,73 cbd
(4) UN7637	69,300 bac	87,467 a	39,167 f	57,933 ba	47,133 c	60,20 cebd

Tabla 2-13: (Continuación)

(5) UN6650	78,333 a	80,633 b	53,100 dc	64,433 ba	81,100 a	71,52 a
(6) UN7429	77,400 a	59,633 ed	50,267 dc	67,633 ba	44,400 cd	59,87 cebd
(7) UN7540	48,800 dc	53,600 gf	69,067 a	64,267 ba	49,233 cb	56,99 ced
(8) UN7544	72,733 ba	58,967 ed	41,800 f	57,100 ba	45,600 c	55,24 ced
(9) UN7536	46,533 d	52,167 gfh	55,200 c	68,133 ba	49,300 cb	54,27 e
(10) UN5564	69,167 bac	49,167 gih	48,767 de	56,400 ba	48,900 c	54,48 e
(11) UN7539	50,133 dc	45,167 i	41,333 f	51,867 b	39,067 d	45,51 f
(12) UN5175	74,067 ba	61,133 d	64,433 ba	78,067 a	46,033 c	64,75 b
(13) UN7555	53,333 bdc	55,000 ef	48,967 de	72,200 ba	55,433 b	56,99 ced
MAXIMO	78,333	87,467	69,067	78,067	81,100	71,52
MINIMO	46,533	45,167	39,167	51,867	39,067	45,51
PROMEDIO	62,820 b	60,602 b	51,661 c	65,817	50,043 c	58,189
DS	6,001	1,372	1,553	6,371	1,694	

En UNAL2, con la máxima desviación estándar (6,371), se encontró el máximo promedio de localidad con 65,817 mg/kg; el contenido máximo de zinc fue de 78,067 mg/kg (UN517) y el mínimo de 51,867 mg/kg (UN7539); por el contrario Marengo, con menor amplitud de variación (1,372) mostro un máximo de 87,467 mg/kg para línea UN7637 (mayor valor entre todas las localidades) y un mínimo de 45,167 mg/kg para UN7539.

La localidad Granada también presento una alta variación entre líneas para este rasgo (6,001) con un máximo de 78,333 mg/kg (UN6650) y un mínimo de 46,533 mg/kg (N7536). La localidad de menor promedio fue UNAL3 con 50,043 mg/kg. El promedio general fue de 58,189 mg/kg de zinc en el grano de arveja, con un rango a travez de las cinco localidades de 45,51 para UN7539 a 71,52 mg/kg para UN6650. Se visualizaron diferencias estadísticas significativas tanto entre líneas como entre localidades según la comparación de medias tukey.

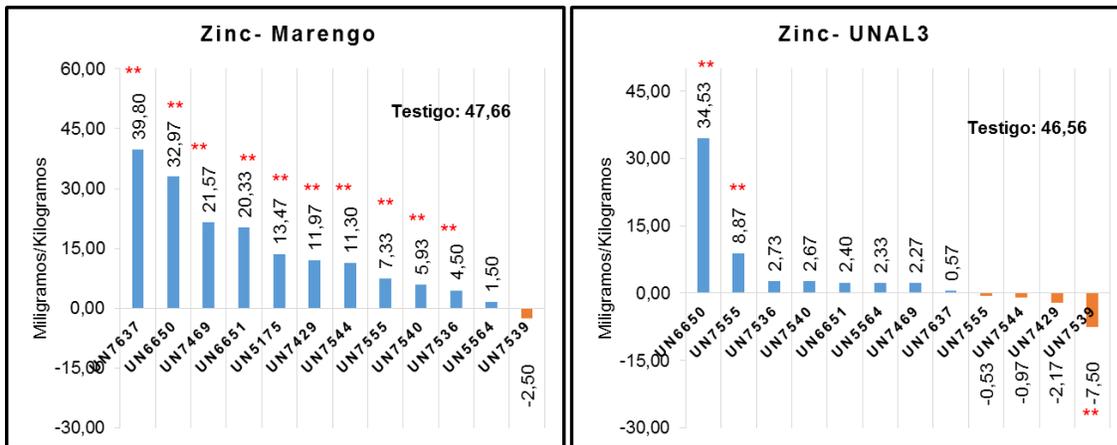
Estos resultados son superiores a lo reportado por Amarakoon *et al.* (2012) quienes indicaron rangos de 39 a 63 mg/kg para los promedios de cada genotipo a través de las localidades y un rango entre los promedios de las localidades de 32 a 69 mg/kg, siendo este ultimo dato superior por poco a lo encontrado en este estudio. Por otra parte al comparar estos resultados con especies relacionadas como frijol la cual ha sido reportada por altos contenidos en zinc (Moraghan y Grafton 1999); Blair *et al* (2009) reportaron contenidos de zinc para DOR364 (frijol mesoamericano bajo en zinc) y G19833 (frijol andino alto en zinc) de 21.7 y 29.9 mg/kg en Popayan y 28.5 y 30.5 mg/kg en el Darien Valle del cauca, respectivamente, al igual evaluaron 87 líneas recombinantes a partir del cruce de estos dos materiales encontrando un promedio de 25 mg/kg de zinc para las dos localidades ya mencionadas.

Cvitanich *et al* (2011) en el analisis del contenido de micronutrientes en diferentes tejidos de la semilla de frijoles mesoamericanos y andinos, procedentes del banco de germoplasma de CIAT, reporto rangos de contenidos de zinc 17 y 30 mg/kg en los cotiledones, tejido en el cual se almacena del 80–96% del zinc total de la semilla.

Los altos contenidos de micronutrientes mostrados en el grano de arveja en la localidad Granada podrían estar relacionados con la respuesta fisiológica de la planta al estrés generado por la deficiencia de nutrientes en el suelo, la baja precipitación y mayor altura sobre el nivel del mar. Uno de los mecanismos desarrollados es la fotosíntesis compensatoria, donde plantas bajo estrés, incrementan significativamente su biomasa, sintetizados y acumulación de nutrientes, pero al igual disminuyen la producción de tejidos de interés comercial como se ve reflejado en otros componentes de rendimiento en esta localidad (Retuerto *et al.*, 2003; Basurto *et al.*, 2008).

Respecto a los contenidos de zinc la prueba dunnett mostro diferencias estadísticas significativas en la localidad Marengo; en donde las líneas UN7637, UN6650, UN7469, UN6651, UN5175, UN7429, UN7544, UN7555, UN7540 y UN7536 presentaron ganancias respecto al testigo en un rango de 4,50 (UN7637) hasta 39,80 (UN7536) mg/kg de zinc. En la localidad UNAL3 las líneas UN6650 con una ganancia de 34,53 y UN7555 con 8,87 mg/kg de zinc frente al testigo, fueron las líneas que presentaron diferencias estadísticas significativas (Figura 2-5).

Figura 2-5. Prueba de Dunnett para el contenido de zinc. Testigo variedad Alejandrita-UN5171.



** Materiales que mostraron diferencias estadísticas significativas (0,05) respecto al testigo

En el Anexo B2 se presentan los resultados del análisis de varianza combinado a través de localidades para los contenidos de hierro y zinc en el grano de arveja, con base en este análisis se detectaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0.01$) entre localidades, líneas y la interacción genotipo x ambientes (IGA) para estas dos variables. Sigificancias similares fueron encontradas por Amarakoon *et al.* (2012) en arveja.

La significancia encontrada para la interacción genotipo x localidad IGA, en los contenidos de estos dos micronutrientes, indica una respuesta diferencial de las 13 líneas de arveja evaluadas en este estudio a las variaciones ambientales; por lo tanto es necesario un estudio detallado de estabilidad y todo lo que este acarrea

Para los contenidos de micronutrientes hierro y zinc (Tabla 2-14) se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0,01$) entre localidades (L), entre genotipos (G) y en la interacción IGA, lo que significó que las líneas respondieron de manera diferencial a las variaciones ambientales de las localidades y por ende la identificación de un genotipo superior no puede ser realizada considerando la respuesta promedio de las variedades, ya que la clasificación genotípica varió significativamente en las diferentes localidades.

La suma de cuadrados de la línea o genotipo explico el 11,393 y 22,413% de la variación total observada respectivamente (Tabla 2-14). La suma de cuadrados del factor localidad explico el 20,041% para hierro y 24,984% para zinc, el efecto de la interacción para estos dos micronutrientes expreso el 23,561 y 41,779% de la variación total observada. Según el orden anteriormente mencionado. Estos resultados permitieron observar que para el contenido de estos dos micronutrientes el efecto ambiental de la localidad y los efectos de interacción (en especial para zinc) son más relevantes que el comportamiento *per se* de cada línea de arveja.

Tabla 2-14. Análisis de varianza AMMI de la evaluación de 13 líneas de arveja en cinco localidades del departamento de Cundinamarca, para los contenidos de hierro y zinc en grano seco.

CONTENIDOS DE MICRONUTRIENTES						
FV	GI	HIERRO		gl	ZINC	
		Mg/kg			Mg/kg	
		CM	%		CM	%
Modelo	66	392,273 **	62,570	66	410,323 **	89,229
Bloque	2	1567,043 **	7,574	2	7,879	0,051
Localidad	4	2073,153 **	20,041	4	1895,717 **	24,984
Genotipo	12	392,862 **	11,393	12	566,884 **	22,413
GenxLoc	48	203,103 **	23,561	48	264,168**	41,779
Error	128	120,995	37,429	128	25,538	10,770
Total	194		100	194		100
R ²			0,625			0,892
CV			19,931			8,709
Promedio			55,187			58,212
Términos AMMI						
Componente		CM	%		CM	%
IPCA1	15	300,419 **	46,3607	15	428,314**	50,5244
IPCA2	13	205,247	27,4506	13	233,562**	23,8777
IPCA3	11	155,261	17,5706	11	192,646**	16,6648
IPCA4	9	93,075	8,6180	9	126,215**	8,9331
Residual						

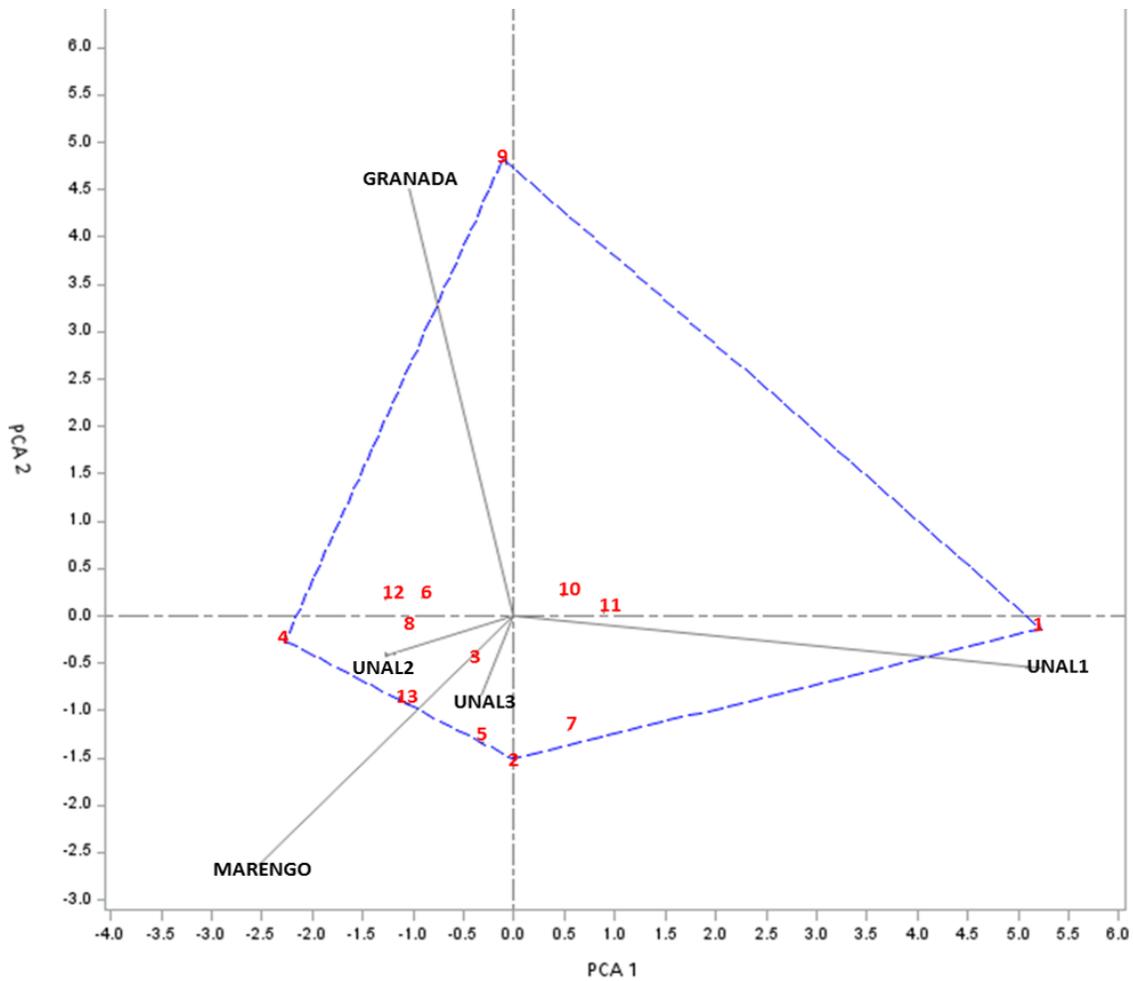
Aunque la información sobre el efecto de la IGA para los contenidos de hierro y zinc en arveja es casi nulo, estos resultados son comparables con lo realizado por Amarakoon *et al.* (2012), quienes evaluaron seis materiales de arveja comercial naturalmente ricos en estos micronutrientes en siete localidades de Dakota del Norte, EE.UU. Ellos encontraron significancia estadística para el factor L*G; al igual que en este estudio, los autores indican, que el porcentaje de cuadrados medios del factor localidad fue mayor, reflejando diversidad en los ambientes y una mayor contribución de la localidad a la interacción Gauch y Zobel, 1997).

El análisis AMMI mediante la matriz de estimación de los componentes principales de interacción (IPCA), encontró que para el contenido de hierro y zinc los tres primeros IPCA con 39 grados de libertad explicaron el 91,381 y 91,066% de la variancia de la interacción respectivamente; en donde para hierro el primer componente presentó significancia estadística altamente significativa y para zinc todos los componentes fueron altamente significativos.

En las Figuras 2-6 y 2-7 se muestra la representación gráfica de la contribución de las líneas y de las localidades para la interacción relativa a los dos primeros ejes para las variables relacionadas con el contenido de hierro y zinc en el grano de arveja.

La gráfica biplot (Figura 2-6) para contenidos de hierro en el grano de arveja indicó que las líneas 3 (UN7469) y 10 (UN5564) con valores de 55,59 y 52,57 mg/kg respectivamente, siendo muy cercanos al promedio general (55,187 mg/kg); fueron las líneas más estables a través de localidades (más cercana al centro de origen de los ejes).

Figura 2-6 Biplot AMMI para contenidos de Hierro (mg/Kg) en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.



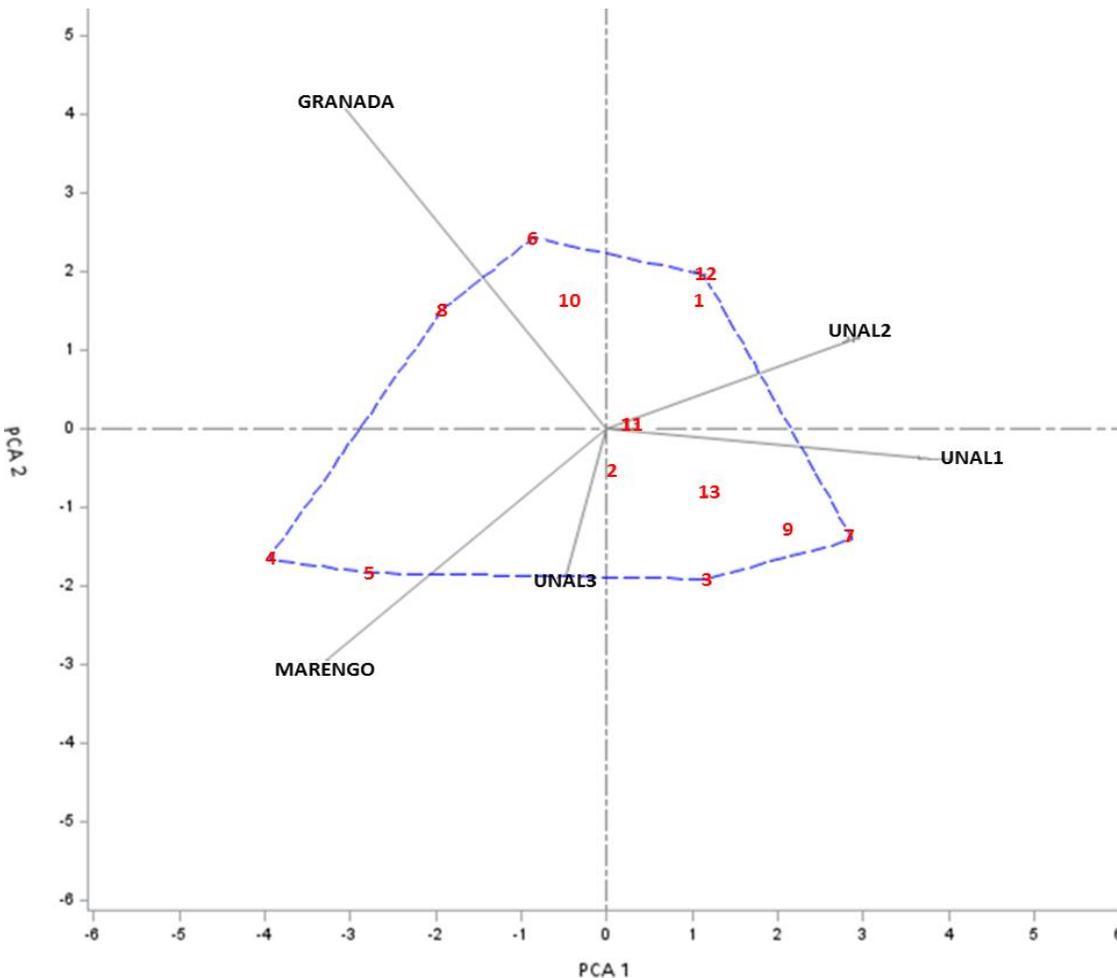
Las líneas de arveja 1(UN5171), 2 (UN665), 4 (UN7637) y 9 (UN7536) formaron el polígono de variación y fueron los que mayor diferenciación presentaron indicando que están variando su comportamiento a través de la localidades y tienden a ser los más inestables; por lo tanto generan un efecto positivo o negativo sobre el contenido de hierro en los granos de arveja. La línea 4 presentó un promedio más bajo respecto a la media general y al contrario las líneas 1,2 y 9 presentaron contenidos de hierro superiores a la media general; lo cual sugiere que responden en la medida en que el ambiente tiende a ser mejor. La línea 9 (UN7536) fue la de mayor promedio general con 62,19 mg/kg.

Se encontraron adaptabilidades específicas o interacciones positivas de la línea 9 (UN7536) para la localidad Granada y 1(UN5171) para UNAL1. En cuanto a las localidades UNAL2 y UNAL3 se pueden considerar más representativas de las condiciones ambientales medias y con poco efecto sobre la interacción debido a su cercanía al origen. Por otra parte los ambientes Granada, Marengo y UNAL1 presentaron una mayor longitud en sus vectores y por ende un efecto importante en la interacción.

Para el contenido de zinc en el grano de arveja (Figura 2-7) fue relevante que la línea 11 (UN7539) fue la de mayor estabilidad a través de las cinco localidades (más cercana al

origen), seguida de la línea 2 (UN6651). Siendo los que menos interaccionan con las localidades.

Figura 2-7. Biplot AMMI para contenidos de Zinc (mg/Kg) en 13 líneas de Arveja evaluados en cinco localidades de Cundinamarca.



Las líneas que conformaron el polígono de variación y que son los más inestables a través de las localidades fueron la 3 (UN7469), 4 (UN7637), 5 (UN6650), 6 (UN7429), 7 (UN7540), 8 (UN7544) y 12 (UN5175), donde las líneas 7 y 8 presentaron un promedio menor a la media general (58,18 mg/kg) y por el contrario las líneas 3, 4, 5 (línea de mayor contenido 71,52,mg/kg), 6 y 12 presentaron un efecto positivo del ambiente sobre la expresión de este rasgo mostrando un promedio mayor a la media general. No se encontraron líneas de adaptabilidad específica.

De las cinco localidades donde se evaluaron las 13 líneas de arveja la localidad UNAL2 y UNAL3 fueron las de menor magnitud en sus vectores (cercanas al origen), siendo sitios que pueden ser considerados representativos de las condiciones ambientales promedio y con baja contribución a la IGA Los ambientes Granada, Marengo y UNAL1 presentaron la

mayor variación y contribución a la interacción, permitiendo además una mayor discriminación del comportamiento promedio de las diferentes líneas. No se encontraron agrupaciones de localidades.

3. Conclusiones y recomendaciones

3.1 Conclusiones

1. El estudio de los rasgos agronómicos relacionados con arquitectura de la planta, rendimiento y sus componentes, los parámetros que determinan la calidad comercial y los contenidos de minerales en 13 nuevos genotipos de arveja permitieron reconocer una fuente genética importante en los procesos de selección hacia la obtención de nuevas variedades de arveja de porte bajo para la agricultura colombiana.
2. La evaluación agronómica de los 13 genotipos de arveja en los cinco ambientes fue importante para reconocer cuales variables en estudio tienen mayor efecto genético, ambiental y de la interacción G x A, cuales ambientes son los mejores para la expresión fenotípica de los genotipos, cuales genotipos son los más estables y cuales tiene adaptación específica.
3. Para el conjunto de variables de rendimiento se detectó que la línea UN7544 es la de mayor potencial en promedio de los cinco ambientes, la línea UN7555 es la de mejor calidad comercial por su excelente tamaño de los granos y vainas mientras que las líneas UN6650 y UN7536 sobresalen por altos contenidos nutricionales del grano.
4. Los análisis individuales por localidad, mostraron que las condiciones ambientales de la localidad "Marengo", permitieron una mejor expresión del potencial genético de las 13 líneas, respecto a las variables relacionadas con rendimiento y sus componentes.
5. Para los rasgos de calidad nutricional en genotipos elite de arveja se encontró un efecto altamente significativo de la Interacción genotipo x ambiente (IGA)

3.2 Recomendaciones

1. La línea UN5175, fue la de mayor precocidad a días en las cuatro localidades, donde fue evaluada para esta variable, aunque sus rendimientos son bajos es un material a tener en cuenta como progenitor en futuros procesos de mejoramiento para conferir precocidad.
2. La línea UN7469 aunque no mostro los mejores rendimientos se proyecta como un material de gran potencial en cultivos a altas densidades de siembra debido a la poca altura mostrada a través de las localidades de evaluacion
3. Evaluar las 13 líneas en otras localidades de características edafo-climaticas contrastantes.
4. A partir de este estudio proponer algunas líneas como nuevas variedades mejoradas o como progenitores para conferir características de rendimiento y calidad de la vaina y grano a través de procesos de mejoramiento.

A. Anexo: Análisis de varianza individual y combinado para las localidades de evaluación; cuadrados medios para la variable días a floración, variables asociadas a la arquitectura de la planta, componentes de rendimiento y rendimiento.

Anexo A1. Análisis de varianza para cinco localidades de evaluación; cuadrados medios del análisis de varianza para la variable días a floración, variables asociadas a la arquitectura de la planta, componentes de rendimiento y rendimiento.

GRANADA									
FV	GL	DAF	ALTPLA	RABAS	NUPLA	VAPLA	RVV	RGV	RENDGS
B	3	9,89	540,61**	0,09	36,00**	28,77*	648444,7	90022,9	65866,2*
G	12	81,13**	352,81**	0,01	7,78**	25,59**	1193789,4**	143729,1*	62516,3**
Error	36	10,93	42,20	0,01	1,40	8,21	365216,7	60072,7	16874,8
M		78,69	52,89	1,08	15,67	7,90	2645,9	1180,3	553,3
Cv		4,20	12,28	11,99	7,56	36,25	45,682	41,5	46,9
MARENGO									
B	3	10,15	106,46	1,21**	2,84	287,37*	14134421,2**	3480098,2 *	538224,7*
G	12	96,92**	166,66**	0,48	5,40**	42,63	14134421,2 *	460682,4	183293,8
Error	36	18,15	60,20	0,23	1,48	65,29	2330158,5	874697,1	177304,1
M		63,30	63,92	2,95	18,07	29,85	10248,2	6137,3	2651,5
Cv		6,73	12,13	16,51	6,74	27,06	30,7	30,478	31,7
UNAL1									
B	3	42,33	840,14	0,19	3,24	11,88	50611,7	93297,7	5362,7
G	12	67,42	332,89	0,15	5,80	33,66	653063,5	300063,0	41961,2
Error	36	75,08	336,60	0,08	3,49	36,90	840073,8	332833,6	63648,5
M		63,17	102,32	1,67	19,12	11,90	3065,2	2078,6	923,7
Cv		13,71	17,93	17,16	9,76	51,02	59,8	55,5	54,6
UNAL2									
B	3	25,84	4008,17	0,00	17,14**	118,40	3059886,6 **	715610,0 **	135290,3**
G	12	29,42	241,67	0,44	4,43	23,25	457125,5	109484,5	24176,3
Error	36	18,34	135,21	0,12	1,77	17,73	457125,5	126792,5	26299,3
M		67,84	90,57	1,65	19,21	14,97	4415,2	2334,80	1109,89
Cv		6,31	12,83	21,40	6,94	28,11	29,1	30,5	29,2
UNAL3									
B	3		586,91**	1,44**	12,12**	147,71**			272535,1**
G	12		309,12*	0,41*	7,24**	35,97*			143728,4**
Error	36		120,43	0,18	1,56	9,53			25258,1
M			95,20	1,94	18,26	13,58			1262,2
Cv			11,52	21,84	6,83	22,72			25,1

FV: Fuentes de variación. GL: Grados de libertad. B: bloque. G: Genotipo. M: promedio de la variable. E: error experimental. Cv: coeficiente de variación. *Diferencias estadísticas significativas al 5% **Diferencias altamente significativas al 1%.

Anexo A2. Análisis de varianza combinado para la variable días a floración, variables relacionadas con la arquitectura de la planta y componentes de rendimiento y variables de rendimiento para las 13 líneas de arveja evaluadas en cuatro y cinco localidades del departamento de Cundinamarca

FV	GL	ALTPLA	RABA	NUPLA	VAPLA	GL	DAF	RVV	RGV	RENDGS
		S								
L	4	21832,3**	24,27**	97,87**	3594,93*	3	49629,7*	155402119,0	61172161,1**	8171222,77**
					*		*	**		
B(L)	15	1030,66**	0,66**	14,89**	127,09**	12	15,1	5056959,5**	1232817,9**	230942,03**
G	12	859,50**	0,65**	22,23**	52,75*	12	151,4**	2680081,1*	339608,4*	197575,66**
L*G	48	135,91	0,21*	2,11	27,09	36	30,8*	986618,0	224783,6	58034,62
Error	18	124,01	0,13	1,83	27,57	14	21,0	1106625,6	372356,2	64730,49
	0					4				
M		79,26	1,88	17,94	15,89		53,3	5286,92	3036,43	1331,47
Cv		14,04	19,32	7,55	33,04		8,6	3,979,492	4,019,266	3,821,665

FV: Fuentes de variación. GL: Grados de libertad. L: localidad. B: bloque. G: Genotipo. M: promedio de la variable. E: error experimental. Cv: coeficiente de variación. *Diferencias estadísticas significativas al 5% **Diferencias altamente significativas al 1%.

B. Anexo: Análisis de varianza individual y combinado para las localidades de evaluación; cuadrados medios para la variable relacionadas con calidad comercial y calidad nutricional

Anexo B1. Análisis de varianza para cuatro y cinco localidades de evaluación; cuadrados medios del análisis de varianza para las variables relacionadas con calidad comercial y calidad nutricional.

Calidad comercial							Calidad nutricional		
GRANADA							GRANADA		
FV	GL	GVA	LONVA	PORGVV	P100GV	P100GS	PVAVP	Hierro	Zinc
B	3	0,349	0,636	138.835**	128,576**	11,708	1037,4075	4240,131**	9,213
G	12	0,625**	0,769**	170.661**	95,873**	92,216**	1910,070**	305,170	390,918**
E	36	0,224	0,156	20.478	25,312	5,133	52,912	343,413	57,020
M		5,690	7,391	47.396	54,131	25,232	45,684	63,423	62,820
CV		8,332	5,354	9.547	9,294	8,978	47,195	29,218	12,020
MARENGO							MARENGO		
B	3	0,392	0,376	86.335*	15,207	14,890	19749,621**	4240,131**	4,804
G	12	0,867**	0,631	160.824**	108,413**	44,735**	4786,290	305,170	485,998**
E	36	0,161	0,384	20.354	22,183	12,873	3728,227	343,413	2,980
M		7,296	7,646	61.261	57,255	26,573	203,285	63,423	60,602
CV		5,510	8,111	7.364	8,226	13,502	30,039	29,218	2,848
UNAL1							UNAL1		
B	3	0,093	0,457	92.588	14,051	3,067	80,905	2,991	0,983
G	12	0,766**	0,259	68.365	148,504	31,378**	1044,948	466,176**	252,153**
E	36	0,203	0,210	47.458	202,986	4,237	1344,097	2,460	3,822
M		6,624	7,204	69.251	55,602	24,345	61,305	62,574	51,661
CV		6,818	6,503	9.947	25,627	8,452	59,808	2,506	3,784
UNAL2							UNAL2		
B	3	0,404	0,681**	41.056	13,818	15,078	4895,630**	642,453**	31,869
G	12	1,183**	0,317**	21.463	88,813*	69,189**	731,357	69,626*	192,634**
E	36	0,227	0,103	16.640	36,077	11,573	662,829	16,588	64,278
M		6,028	7,320	53.340	53,583	24,725	88,299	52,392	65,817
CV		7,919	4,389	7.647	11,209	13,758	29,156	7,773	12,181
UNAL3							UNAL3		
B	3	0,063	0,166			20,689		1,863	3,715
G	12	0,605**	0,604**			104,003**		183,630**	301,855**
E	36	0,167	0,123			11,023		3,272	4,544
M		6,496	7,465			28,353		48,482	50,043
CV		6,297	4,710			11,709		3,731	4,259

FV: Fuentes de variación. GL: Grados de libertad. B: bloque. G: Genotipo. M: promedio de la variable. E: error experimental. Cv: coeficiente de variación. *Diferencias estadísticas significativas al 5% **Diferencias altamente significativas al 1%.

Anexo B2 Análisis de varianza combinado para las variables relacionadas con calidad comercial y calidad nutricional para las 13 líneas de arveja evaluadas en cuatro y cinco localidades del departamento de Cundinamarca

FV	GL	Calidad comercial				GL	Calidad comercial			GL	Calidad comercial	
		P100GV	PORGVV	PVAVP	GVA		LONVA	P100GS	Hierro		Zinc	
L	3	129,104	3984.857**	248641,279**	4	18,864**	1,239**	126,614**	4	2073,15**	1895,71**	
B(L)	12	48,710	94.280**	8091,059**	15	0,263	0,325	13,704	10	977,95**	10,11	
G	12	183,093**	289.621**	4288,054**	12	1,626**	1,513**	283,985**	12	392,86**	566,88**	
L*G	36	86,172	43.897*	1578,574	48	0,605**	0,266	14,383*	48	203,10**	264,16**	
E	144	101,208	24.881	1770,584	180	0,194	0,203	9,131	120	73,68	26,52	
M		55,222	57.248	105,735		6,438	7,422	25,991		55,18	58,18	
CV		14,265	8.713	39,795		6,844	6,072	11,626		15,55	8,85	

FV: Fuentes de variación. GL: Grados de libertad. L: localidad. B: bloque. G: Genotipo. M: promedio de la variable. E: error experimental. Cv: coeficiente de variación. *Diferencias estadísticas significativas al 5% **Diferencias altamente significativas al 1%.

Bibliografía

- Alaoui, L., Essatara, M. (1985). Dietary Fiber and phytic acid levels in the major food items consumed in morocco. *Nutrition Reports International* 31, 469 - 476.
- Allard. L. W. (1999). *Principles of Plant Breeding*. John Wiley & Sons. New York. 254 pp.
- Amarakoon, D., Thavarajah D., Mcphee K., Thavarajah P. 2012. Iron-, zinc-, and magnesium-rich field peas (*Pisum sativum* L.) with naturally low phytic acid: A potential food-based solution to global micronutrient malnutrition. *Journal of Food Composition and Analysis* 27, 8 –13.
- Ascherio, A, And Willett, W.C. 1996. Epidemiological studies relating iron status to coronary heart disease and cancer, in *Iron Nutrition in Health and Disease*, Ed by Hallberg L and Asp N-G. John Libby and Co, London, pp 303 - 311.
- Barriga, R. H. M. P. 1980. Caracterização de cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) com relação a produção e estabilidade. (Master's Thesis) Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Basurto, M., Nuñez, A., Perez, R., Hernandez, O.A. 2008. Fisiología del estrés ambiental en plantas. Facultad de ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. 5p. http://www.uach.mx/extension_y_difusion/synthesis/2009/04/27/Fisiologia_%20del_estres_ambiental_en_plantas.pdf
- Beebe, S., Gonzalez, A. V., Rengifo, J. 2000. Research on trace minerals in common bean. *International food policy research institud*. Sao Pablo, 44, 446–450.
- Bernal R., J.H. 2013. Efecto de las variaciones ambientales en el crecimiento, desarrollo y acumulación de azúcares en variedades de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 164 p.
- Bienfait, H. 1988. Mechanisms in Fe-eficiency reactions of higher plants. *J Plant Nutr* 11, 605 - 629.

- Blair, M.W., Astudillo, C., Grusak, M.A., Graham, R., Beebe, S.E. 2009. Inheritance of seed iron and zinc concentrations in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Mol breeding* 23,197-207.
- Bouis H. 1996. Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. *Nutr Rev.* 54,131–7.
- Bouis, H.E. 2003. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost? *Proceedings of the Nutrition Society* 62, 403-411.
- Bourion, V. Fouilloux, C. Le Signor, E. Lejeune-Hènaut. 2002. Genetic studies of selection criteria for productive and stablepeas. *Euphytica* 127, 661-273.
- Cañas Ángel, Z., Restrepo Molina D.A., Cortés Rodríguez, Misael. 2011 Revisión: Productos Vegetales como Fuente de Fibra Dietaria en la Industria de Alimentos. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 64, 6023-6035.
- Carbonell M., S.A., De Azevedo Filho, J.A., Dos Santos Dias, L.A., Franco Garcia, A.A., De Moraes, L.K. 2004. Common bean cultivars and lines interactions with environments. *Sci. Agric.* 61, 169 -177.
- Carneiro, P. C. S. 1998. Novas metodologias de análise da adaptabilidade e estabilidade de comportamento. *Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de vicosa*, 69; 797-805.
- Casanova E., L., Solarte L., J., Checa C., Oscar. 2012. Evaluación de cuatro densidades de siembra en siete líneas promisorias de arveja arbustiva (*Pisum sativum* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas* 29, 129 - 140.
- Castro R., M. 1995. Evaluación de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en diferentes densidades y sistemas de siembra en la región de Simijaca (Cundinamarca). Tesis de pregrado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. 86 p.
- Charles-Edwards, D. A., Doley, D., Rimmington, G. M. 1986. *Modelling Plant Growth and Development*. Academic Press. Sidney, Australia. 235 p.
- Chataika, B. y E., Bokosi, J.M., Kwapata, M.B., Chirwa, R.M., Mwale, V.M., Mnyenyembe, P., Myers, J.R. 2010. Performance of parental genotypes and inheritance of angular leaf spot (*Phaeosariopsis griseola*) resistance in the common bean (*Phaseolus vulgaris*). *African Journal Biotechnology* 9, 4398-4406.
- Chaves, Lázaro J. 2001. Interação de genótipos com ambientes. Em: Recursos genéticos e melhoramento-plantas. (Eds) Lourenço Nass, Afonso Celso Candelaria Valois, Itamar Soares de Melo, Maria Cléria Valadares Rondonópolis: Fundação MT. p 673-713.

- Chrispeels, M.J., Crawford, N:M. and Schroeder, J.I. 1999. Proteins for transport of water and mineral nutrients across the membranes of plant cells. *Plant Cell* 11, 661 - 676.
- Cook, J.D., Layrisse, M., Martinez-Torres C., Monsen, E., And Finch, C.A.. 1972). Food iron absorption measured by an extrinsic tag. *J Clin. Invest* 51, 805-815.
- Crossa, J., Wescott, B. Gonzáles, C. 1988. Analysing yield stability of maize genotypes using a spatial model. *Theor. Apl. Genet.* 75, 863-868.
- Crossa, J., Gauch, H.G., Zobel, R.W. 1990. Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international cultivar trials. *Crop sci.* 30, 493-500.
- Damba, G.P. 2008. Evaluación de métodos para análisis de estabilidad en diferentes ambientes en genotipos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. 110 p.
- Dehghani, H., Ebadi, A., and Yousefi, A. 2006. Biplot analysis of genotype by environment interaction for Barley yield in Iran. *Agron. J.* 98, 388-393.
- Delgado C., C.G. 2014. "Efecto del ácido acetilsalicílico para activación de defensas en el cultivo de arveja (*Pisum sativum*), en el sector de Chapués, cantón Tulcán, Carchi – Ecuador". Tesis de pregrado. Facultad De Industrias Agropecuarias y Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica Estatal del Carchi. Ecuador. 98 p..
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2015. Cultivo y variedades de Arveja en Colombia. www.dane.gov.co/files/investigaciones/.../Bol_Insumos31_mar_2015.pdf
- Diaz, J. y Zapata, M. 1990. Control de malezas: práctica agronómica fundamental en el cultivo de la arveja. *Investigacion y progreso agropecuario Carillanca.* 9, 28 – 33.
- Dhillon, G. y Chanal, G. 1981. An analysis of combining ability and reciprocal effects in garden pea (*Pisum sativum* L.). *J. Res. Punjab Agric. Univ.* 18, 359-364.
- Driessen, P.M and Dudal, R. 1991. The major soils of the world. Lecture notes on their geography, formation, properties and use. Agricultural University Wageningen, Katholieke Universiteit Leuven. Belgium, 310 pp.
- Duarte, R. y Adams, M. 1963. Component interaction in relation to expression of a complex trait in a field bean crops. *Crop Science* 3, 185 – 186.
- Eberhart, S. A., and W. A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop sciences* 6, 36-40.

- Fedecafe. 1986. El cultivo de la arveja. Proyecto Hortalizas, Frutales y Flores. Ed. Litocenco Ltda., Cali. 18 p
- Fenalce. 2006. El cultivo de Arveja en Colombia. Primera edición, Produmedios, Bogotá. 29p. http://www.FENALCE.org/nueva/plantillas/arch_web/APR_2015B_Noviembre.pdf
- Fenalce. 2010. Importancia de los cultivos representados por FENALCE. El cultivo de la arveja, historia e importancia. 3p. http://datateca.unad.edu.co/contenidos/302571/2016-16-l/Refbibliograf/Unidad_2/arveja93.pdf
- Fenalce. 2015. Reportes estadístico. http://www.FENALCE.org/nueva/plantillas/arch_web/APR_2015B_Noviembre.pdf
- Ferguson, E.L., Gibson, R.S., Opare-Obisaw, C., Osei-Opare, F., Stephen, A.M., Lehrfeld, J And Thompson, L.U. 1993. The zinc, calcium, copper, manganese, nonstarch polysaccharide and phytate content of seventy-eight locally grown and prepared African foods. *J Food Comp Anal* 6, 87- 99.
- Fletcher, H.F., Ormrod, D.P., Maurer, A.R., Stanfield, B. 1966. Response of peas to environment. I. Planting date and location. *Can. J. Plant Sci.* 46, 77-85.
- Flores, L. 2008. Respuesta del cultivo de arveja *Pisum sativum*, a la aplicación complementaria de tres fertilizantes foliares a base de algas marinas a tres dosis. San Gabriel-Carchi. Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador. 44 p.
- Forero, A. y Ligarreto, A. 2009. Evaluación de dos sistemas de tutorado para el cultivo de la arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en condiciones de la Sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 3, 81 – 94.
- Fox, B.A., Cameron, A. G. 1997. Ciencia de los alimentos, nutrición y salud. Primera reimpresión. Editorial Limusa. México. D. F. pp. 122-128.
- Frossard, E., Bucher, M, Mächler, F., Mozafar, A., And Hurrell, R. 2000. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition (Review). *J Sci Food Agric.* 80, 861- 879.
- Galindo, J. y Clavijo, J. 2007. Área de la hoja compuesta y variaciones de forma en los fitómeros de arveja (*Pisum sativum* L.) en respuesta a diferentes ambientes de Trópico Alto Andino. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 8, 44-51.
- Gallego, C. (2005). Avance en un ciclo de selección de poblaciones de frijol volubles (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Bola roja por su reacción a la enfermedad antracnosis (*Colletotrichum lindemuthianum*). Tesis de pregrado. Facultad de

- Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. 37p. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652006000200005
- Gardner, F. O., Pearce, R. B., Mitchel, R. L. 1990. Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press. Iowa, EUA. 327p.
- Garzón, M. y Gasca, H. 1990. Comportamiento de dos variedades de arveja (*Pisum sativum* L.) para uso industrial bajo dos sistemas de siembra y cuatro densidades en las condiciones de la Sabana de Bogotá. Tesis Facultad de pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. pp 6-45.
- Gauch, H.G., Jr. 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam. 279 p.
- Gauch, H., Zobel, R. 1996. AMMI analysis of yield trials. In: M. S. Kang y H. G. Gauch (eds.), Genotype-by-environment interaction. CRC Press, Boca Raton, pp. 85-122.
- Gauch, H.G., Zobel, R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science* 37, 311-326
- Gómez, E. 2005. Transformación y mejora del valor nutritivo de la harina de guisante mediante la adición de enzima fitasa. Universidad de Granada, Facultad de farmacia, departamento de fisiología. Tesis doctorado. <http://hera.ugr.es/tesisugr/15826272.pdf>
- Gómez J., G.E. 2008. Evaluación de efectos de genes mayores sobre rasgos de rendimiento en arveja (*Pisum sativum*) a partir del cruzamiento de las variedades Santa Isabel x WSU31. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Tesis Maestría - Énfasis en Genética y Fitomejoramiento. 39 p.
- Gómez, H. y Álvaro, G. 1981. Informe sobre el departamento Agrícola – San Jorge. Informe de la Compañía Levapan S.A., Bogotá D.C., p 12-35.
- González G., M.R. 2001. Interacción genotipo por ambiente en gisante proteaginoso (*Pisum sativum* L.). Tesis de doctorado. Departamento de producción vegetal y silvopascicultura. Universidad de Valladolid. 307p.
- González, F. y Ligarreto, G. 2006. Rendimiento de ocho genotipos promisorios de arveja arbustiva (*Pisum sativum* L.) bajo sistema de agricultura protegida. *Fitotecnia Colombiana* 6, 52-61.
- Gonçalves, C. C. De M., Paiva, P. C. De A., Dias, E. S., Siqueira, F. G. De, Henrique, F., (2010). Evaluation of the cultivation of *Pleurotus sajor-caju* (Fries) Sing on cotton textile mill waste for mushroom production and animal feeding. *Ciencia e Agrotecnologia* 34, 220-225

- Graham R.D., Welch, R. (1966). Breeding for staple food crops with high micronutrient density. Agricultural strategies for micronutrients. Working paper 3. International Food Policy Research Institute, Washington D.C. 55, 353-364.
- Graham, R.D., Welch, R.M., Bouis, H.E. (2001). Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps. *Advances in Agronomy* 70, 77–142.
- Grotz, N., Fox, T., Connolly, E., Park, W., Guerinot, M.L And Eide, D. (1998). Identification of a family of zinc transporter genes from *Arabidopsis* that respond to zinc deficiency. *Proc Natl Acad Sci USA* 95, 7220 - 7224.
- Grusak, M.A and Dellapenna, D. (1999). Improving the nutrient composition of plants to enhance human nutrition and health. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol Biol.* 50, 133 -161.
- Halliwell, B. (1987). Oxidants and human disease. *FASEB Journal* 1, 358 - 364
- Hardman, L.L., Brun, W.A., (1971). Effect of atmospheric carbon enrichment at different developmental stages on growth and yield components of soybeans. *Crop Sci.* 11, 886-888.
- Harvestplus. (2015). Nutrients. <http://www.harvestplus.org/content/nutrients>
- Hotz, C., Brown, K.H. (2004) Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. International Zinc Nutrition Consultative Group Technical Document No. 1, *Food Nutr. Bull.* 25, 91–204.
- Johnston, T.J., Pendleton, J.W., Peters, D.B., Hicks, D.R., (1969). Influence of supplemental light on apparent photosynthesis, yield, and yield components of soybeans (*Glycine max* L). *Crop Sci.* 9, 557-581.
- Krall, J.M., Miller S.D., Cecil J.T., Bastian C., Foulke T., Baltensperger D.D., Harveson, B.M., Burgener, P.A., Hergert, V, Hein, G.L., Lyon, D.J., Nleya, T., Rickertsen J., Blodgett, S. (2006). Pea production in the High Plains. South Dakota State University Extension, Fact Sheet. 13 p.
- Laing. D. R. (1978). Adaptabilidad y estabilidad en el comportamiento de plantas de frijol común. Documento presentado en la reunión de discusión sobre viveros internacionales de rendimiento y adaptación de frijol. CIAT. 24p.
- Lamartiniere, C. A. (2000). Protection against breast cancer with genistein: a component of soy. *Am. J. Clin. Nutr.* 71, 1-3.

- Latham, M. C. (1997). Human Nutrition in the Developing World. FAO Food and Nutrition Series No.29. Rome: FAO.
- Lewis, B. Schrire, B. Mackinder, & M. Lock (EDS.). (2005). Legumes of the World. Royal Botanic Gardens, Kew. pp. 307-335
- Ligarreto, G. y Ospina, A. 2009. Analisis de parametros heredables asociados al rendimiento y precocidad en arveja voluble (*Pisum sativum* L.) tipo Santa Isabel. Agronomía Colombiana 27, 333-339.
- Lin, C.S., Binns, M.R., Lefkovitch, L.P. (1986). Stability analysis: Where do we stand? (Contribution no. 1-770 from the Engineering and Statistical Res. Centre, Res. Branch, Agric. Canada, Ottawa, Canada, KIA OC6 Received 14 Nov, 1985. Crop Sci., 26: 894-900). <http://cuke.hort.ncsu.edu/cucurbit/wehner/521/hs521readings/GxESbiltyAnal86 Lin.pdf>
- Londoño, J., M.L. Naranjo. (1996). Aplicación de aminoácidos como complemento a la fertilización química y orgánica en el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) var. Piquinegra. Tesis de pregrado. Facultad de Agronomía. Universidad de Caldas. 62p.
- Macphail, A.P., Charlton R., Bothwell T.H., Bezwoda W.R. 1985. Experimental fortificants, in Iron fortication of food, Ed by Clydesdale F Mand Weimer K.L. Academic Press, New York. p. 55 - 75.
- Marin, D. (1986). Rendimiento en granos en *Canavalia ensiformis* (L.) DC. bajo diferentes arreglos espaciales, épocas y densidades de siembra. Rev. Facultad de Agronomía. 14, 205–219.
- Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants, 2nd edn. Academic Press, London.
- Martinez, J. y Martinez, E. 1997. Evaluación del comportamiento agronómico de veinte líneas de arveja (*Pisum sativum* L.) de crecimiento determinado en el municipio de Pasto, departamento de Nariño. Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. Pasto. 115p.
- Mazzani B. (1983). Cultivo y mejoramiento de plantas oleaginosas. Venezuela. P 383-384
- Mera, M. (1989). Densidad poblacional y espaciamiento en arveja (*Pisum sativum* L.) para grano seco de follaje reducido. Agricultura técnica. Chile, 49:, 148 – 152.
- Messina, Mark J. (1999). Legumes and soybeans: overview of their nutritional profiles and health effects. Am. J. Clin. Nutr. 70 (suppl), 39S–50S.
- Milan, M., Acosta, L. Y Gonzalez. (1997). Validación de variedades mejoradas de arveja en zonas de Valle y altura. Cochabamba, Bolivia. IBTA. pp 90-102.

- Moraghan Jt, Grafton K (1999) Seed zinc concentration and the zinc-efficiency trait in navy bean. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 918–922
- Moreno, M. Y Dilmar, J. (1987). Manual de mejoramiento de la Arveja. ICA. Bogotá DC., 18p.
- Nachit, M.N., Nachit, G., Ketata, H., Gauch Junior, H.G., Zobel, R.W. (1992). Use of AMMI and regression models to analyse genotype-environment interaction in durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 83, 597-601.
- Nestel, P., Bouis H.E., Meenakshi, J. V., And Pfeiffer W. (2006). Biofortification of Staple Food Crops. Symposium: Food Fortification in Developing Countries. American Society for Nutrition. *J. Nutr.* 136, 1064–1067.
- Ney, B. (1994). Modélisation de la croissance aérienne d'un peuplement de pois. En: *Agrophysiologie du Pois Protéagineux. Applications à la Production Agricole.* B. Ney, E. Duchêne, B. Carrouée, F. Angevin (eds.), INRA, ITCF, UNIP. Paris, pp 39-48.
- Ninh, N.X., Thissen, J.P., Collette, G., Khoi H Hand Ketelslegers, J.M. (1996). Zinc supplementation increases growth and circulating insulin-like growth factor I (IGF-I) in growth-retarded Vietnamese children. *Am. J. Clin. Nutr.* 63,514 - 519.
- Nolasco S., J.S. (2001). Evaluacion de diferentes densidades de siembra de haba. (*Vicia faba* L.), como cultivo trampa para trips (*Triphs* sp.) en el cultivo de arveja china (*Pisum sativum* L.), en la Aldea Xeabaj, Santa Apolonia, Chimaltenango. Tesis de pregrado. Facultad De Agronomía. Instituto de Investigaciones Agronómicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. 82p.
- Olvera L., A.R., Gama L., S., Delgado S., A. (2012). Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Fascículo 107 FABACEAE. Departamento de Botánica, Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM.
- Pacheco, C.A., Vergara, M.C. Y Ligarreto, G.A. (2011). Clasificación de 42 Líneas Mejoradas de Arveja (*Pisum sativum* L.) por Caracteres Morfológicos y Comportamiento Agronómico. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá
- Pandey, S., Vargas, J.E. (1985). La interacción fenotipo-medio ambiente y su importancia en el mejoramiento intrapoblacional en las plantas cultivadas. Trabajo presentado en el VII Congreso Latinoamericano de Genética- I Congreso Colombiano de Genética. Mimeografiado. 38p.
- Patiño, W.J., Valderrama G., J., Ñustez L., C.E. (1997). Evaluación de nueve variedades de arveja (*Pisum sativum* L.), para uso industrial, en la region de Suba, Bogotá. *Agronomía Colombiana* 14,108-118.

- Peñaranda C. G., Molina G., D.Y. (2011). La producción de arveja (*Pisum sativum*) en la vereda Monteadentro, provincia de Pamplona, Norte de Santander. Año VII N° 11 (Enero - Diciembre). Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. http://ojs.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/FACE/article/view/334/322
- Pereira, H.S., Melo, L.C., Faria, L.C., Díaz, J.L.C., Del Peloso, M.J., Costa, J.G.C., Wendland, A. (2009). Stability and adaptability of carioca common bean genotypes in states of the central South Region of Brazil. *Crop Breeding & Applied Biotechnology* 9,181-188.
- Pérez, J.C., H. Ceballos, E. Ortega, J. Lenis. (2005). Análisis de la interacción genotipo por ambiente en yuca (*Manihot esculenta* Crantz) usando el modelo AMMI. *Fitotecnia Colombiana* 5, 11-19.
- Prasad, R., Singh, R. N., (1996). Effect of feeding water soaked corn and fodder on performance and digestibility of nutrients in Angora rabbits. *Indian J. Anim. Nutr.* 13, 162-166.
- Prieto, G, Salvagiotti, F. (2010). Fertilización con fósforo y azufre en arveja (*Pisum sativum*) en el Sudeste de Santa Fe. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo pp 158.
- Puertas, M. J. (1992). *Genética fundamentos y perspectivas*. 1ª. Ed. Mc. Graw. Hill Interamericana de España. 741p
- Rao, P. S., Reddy, P. S., Rathore, A., Reddy, B.V.S, Panwar, S. (2011). Application GGE biplot and AMMI model to evaluate sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids for Genotype x Environment interaction and seasonal adaptation. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 81,438-444.
- Reddy, N., Person, M., Sathe, S. and Salunkhe, D. (1989). *Phytates in cereals and legumes*. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida.
- Retuerto, R., Rodríguez, R.S., Lema, F., Obeso, J. (2003). Respuesta compensatoria de plantas a situaciones de estrés. Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Facultad de Biología, Área de ecología, Universidad de Oviedo, Santiago de Compostela.
- Ridge, P.E., Pye, D.L. (1985). The effects of temperature and frost at flowering on the yield of peas grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 12, 339-346.
- Riggs, T.J. (1986). Collaborative spring barley trials in Europe 1980-1982. Analysis of grain yield. *Plant Breeding* 96, 289-303.

- Rivera, J.A., Ruel, M.T., Santizo, M.C., Lonnerdal B And Brown, K.H. (1998). Zinc supplementation improves growth of stunted rural Guatemalan infants. *J. Nutr.* 128, 556 - 562.
- Roche, R. (1996). Prévision du nombre de noeuds reproducteurs chez le pois en conditions potentielles. En *Forum Pois*. Paris. UNIP (ed.), pp. 14-15.
- Roche, R. Y M.H. Jeuffroy. (2000). A Model to Calculate the Vertical Distribution of Grain Number in Pea. *Agronomy Journal* 92, 663–671.
- Rodríguez-Maribona, B., Tenorio, J.L., Conde, J.R., Ayerbe, L., (1993). Rendimiento y sus componentes en variedades de guisante (*Pisum sativum* L.) con diferentes grados de estrés hídrico. *Invest. Agr.: Prod. Veg.* 8, 153-164.
- Salonen, J.T., Nyyssönen, K., Korpela, H., Tuomilehto, J., Seppänen, R And Salonen, R. (1992). High stored iron levels are associated with excess risk of myocardial infarction in Eastern Finnish men. *Circulation* 86, 803 - 811.
- Sánchez C., F., Moreno P., E., Cruz A., E. L. (2009). Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. México- Texcoco. Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. 67p.
- Sánchez L., G. Y Quevedo G., D. (1988). Comportamiento agronómico de seis cultivares de arveja (*Pisum sativum* L.) en cuatro densidades de siembra. Tesis Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, pp 13-44.
- Sandberg, A.S. (2002). Bioavailability of minerals in legumes. *Br. J. Nutr.* 88, 281-285.
- Sandstrom, B. (1997). Bioavailability of zinc. *Eur. J. Clin. Nutr.* 51, Supl., S17 - S19.
- Sarawat, P., F.L. Stoddar, D.R. Marshall Y S.M. Ali. (1994). Heterosis for yield and related characters in pea. *Euphytica* 80, 39-48.
- Siddique, A.B., Wright, D. And Mahbub Ali, S.M. (2002). Effects of Sowing Dates on the Phenology, Seed Yield and Yield Components of Peas. *Journal of Biological Sciences* 2, 300-303.
- Simmonds, N. W. (1979). *Principles of Crop Improvement*. Longman. NY. 408p.
- SINGH, R.K. (1985). Genotypic and phenotypic variability correlations in pea. *Indian J. Agric. Sci.* 55, 147-150.

- Snoad, B. and Arthur, A.E. (1974). Genotype-Environment Interactions in Peas. John Innes Institute, Norwich (England). Theoretical and Applied Genetics 44, 222-231.
- Steel R., G.D., and Torrie, J.H. (1980). Principles and Procedures of Statistics, Second Edition, New York: McGraw-Hill.
- Summerfield, R.J., Roberts, E.H., Ellis, R.H., Lawn, R.J. (1991). Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. Exp. Agric. 27, 11-31.
- Terry, N. and Low, G. (1982). Leaf chlorophyll content and its relation to the intracellular location of iron. J Plant Nutr. 5, 301 - 310.
- Thomson, N.J., Cunningham, R.B. (1979). Genotype x environment interactions and evaluations of cotton cultivars. Australian Journal of Agriculture Research 30, 105-112.
- Turc, O. (1988). Elaboration du nombre de graines chez le pois protéagineux (*Pisum sativum* L.) (cv. Frisson, Finale et leurs homologues afila): influence du rayonnement intercepté et application au diagnostic cultural. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 95 pp.
- Turc, O., Lecoœur, J., Combaud, S., Wery, J. (1996). Les stress hydriques précoces: un puissant modulateur de l'architecture du pois. En: Forum Pois. UNIP (ed.) Paris, pp.16-17.
- Udoessien, E.I. and Aremu, C.Y. (1991). Mineral composition of selected Nigerian foodstuffs. J. Food Comp. Anal 4, 346 - 353.
- Vaca P., R.E. (2011). Evaluación de tres bioestimulantes con tres dosis en el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.). En santa martha de Cuba – Carchi. Ibarra – Ecuador 2011. Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Escuela de Ingeniería Agropecuaria.
- Vallejo, F. y Estrada, E. (2002). Mejoramiento genético de plantas. Universidad Nacional de Colombia. Impresión Feriva. S.A. pp. 183-201.
- Vallejo, F. A., M. Espitia, O. Checa, T. C. Lagos, F. Salaza, E. Restrepo. (2005). Análisis estadísticos para los diseños genéticos en fitomejoramiento. Universidad Nacional de Colombia. Palmira.
- Van Oosterom, E.J., Klejin, D., Ceccareli. S., Nachit, M.M. (1993). Genotype by environment interactions of barley in the Mediterranean region. Crop Sci. 33, 669-674.

- Vargas, M.J., Van Eeuwijk, F.A., Ramirez, M.E., Sayre, K. (1999). Using partial least squares regression factorial regression and AMMI models for interpreting genotype x environment interaction. *Crop Sci.* 39, 955-967.
- Vargas H.M., Crossa, J. (2000) El análisis AMMI y la gráfica del biplot en SAS. Unidad de biometría. CIMMYT. México. <http://www.cgiar.org/biometrics>.
- Villareal, F. (2006). Determinación del efecto en la productividad de cinco dosis del bio-estimulante “Florone” en tres variedades de arveja (*Pisum sativum*) aplicado en dos épocas. San José-Carchi. Tesis de grado previo a la obtención del título del Ingeniero Agrónomo. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas.
- Wang, N., Daun, J.K. (2004). Effect of variety and crude protein content on nutrients and certain antinutrients in field peas (*Pisum sativum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84: 1021–1029. <http://biozoojournals.ro/swjhbe/v1n2/06.swjhbe.v1n2.Harmankaya.pdf>
- Wang, Trevor L., Domoney, C., Hedley, Cliff L., Casey, R., And Grusak, Michael A. (2003). Can We Improve the Nutritional Quality of Legume Seeds? Nutritional Quality of Legume Seeds. *Plant Physiology* 131, 886–89
- Welch, R., Norvell, W., Schaefer, S., Shaff, J., Kochian, L. (1993). Induction of iron (III) and copper(II) reduction in pea (*Pisum sativum* L.) roots by Fe and Cu status: Does the root-cell plasmalemma Fe(III)-chelate reductase perform a general role in regulating iron uptake. *Planta* 190, 555 - 561.
- Welch, R. and Graham, R.D. (1999). A new paradigm for world agriculture: meeting human needs. *Productive, sustainable, nutritious. Field Crops Res* 60, 1 - 10.
- Welch, R.M., Graham, R.D. (2000). A new paradigm for world agriculture: productive, sustainable, nutritious, healthful food systems. *Food Nutr Bull* 21:361–366 Also available via <http://foodandnutritionbulletin.org/FNB/index.php/>. FNB/article/view/322.
- Welch, R.M. (2001). Micronutrients, agriculture and nutrition, linkages for improved health and well being. In: Singh K, Mori S, Welch RM, editors. *Perspectives on the micronutrient nutrition of crops*. Jodhpur, India: Scientific Publishers. p. 247–89.
- Welch R.M., Graham R.D. (2002). Breeding crops for enhanced micronutrient content. *Plant Soil* 245:205–214. Also available via [http://www.ingentaconnect.com/content/klu/plso/\(2002\)/00000245/00000001/00312890](http://www.ingentaconnect.com/content/klu/plso/(2002)/00000245/00000001/00312890)
- Welch, R.M. and Graham, R.D. (2005). Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 18, 299-307.

- White, P.J., Broadley, M.R. (2005). Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* 10, 586–593.
- World Health Organisation (WHO). 2011. Micronutrient Deficiencies, Iron Deficiency Anemia. Retrieved December 4, 2011 from: <http://www.who.int/nutrition/topics/ida/en/index.html>.
- Yan, W., Kang, M.S. (2002). GGE biplot analysis. A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL. USA. 271 pp.
- Yates, F., Cochran, W.C. (1938). The analysis of groups of experiments. *Journal of Agricultural science* 28, 556-580.
- Yau, S.K. (1995). Regression and AMMI analyses of genotype x environment interactions an empirical comparison. *Agron. J.* 87, 21-126.
- Ying, Y. and Guerinot, M.L. (1996). Genetic evidence that induction of root Fe(III) chelate reductase activity is necessary for iron uptake under iron deficiency. *The Plant Journal* 10(5), 835 - 844. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-313X.1996.10050835.x/pdf>
- Zobel, R. W., Wright, M.J. and Gauch H.G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80, 388-393.