

VARIABILIDAD GENÉTICA EN FRÍJOL COMÚN (*Phaseolus vulgaris* L.): I. ANÁLISIS DE VARIABLES MORFOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS CUANTITATIVAS.

Genetic variability on shrab bean (*Phaseolus vulgaris* L.):
I. Morphological and quantitative agronomical analysis

Gustavo A. Ligarreto M¹, Orlando Martínez W²

RESUMEN

Con base en la evaluación de variables cuantitativas, se llevó a cabo la identificación de la variabilidad genética de una colección colombiana de frijol de crecimiento arbustivo. La investigación se realizó con 30 accesiones, de las cuales tres son variedades mejoradas y una línea élite; las evaluaciones se realizaron en siete ambientes, seis de ellos en clima frío y uno en clima medio. Los resultados se analizaron por métodos univariados y multivariados de componentes principales para el conjunto de variables y por análisis de conglomerados entre accesiones.

En el análisis de componentes principales, los primeros seis representan el 87,31% de la variación total, los cuales discriminaron a los cultivares de la colección por acervos genéticos andino y mesoamericano. Las diferencias morfológicas y agronómicas fueron mayores entre las accesiones andinas, pues su grado de dispersión en los tres primeros componentes es más alto que en los mesoamericanos.

La diversidad entre los acervos esta representada, principalmente, por el hábito de crecimiento, la precocidad, el área foliar, el rendimiento por planta y el número de semillas por vaina. Las variables de mayor heredabilidad, representadas por alto coeficiente de repetibilidad $r > 1$ (Goodman y Paterniani, 1969), fueron número de nudos, longitud de las vainas, longitud del ápice de las vainas, el número de vainas por planta, la época a madurez fisiológica y el peso de 100 semillas, las cuales pueden utilizarse para estudios de similaridad morfológica y evolución.

Palabras claves: evaluación, caracterización, frijol arbustivo, *Phaseolus vulgaris*, estadística multivariada, germoplasma.

SUMMARY

Based in the evaluation of quantitative variables it was carried out the identification of the genetic variability

of a shrub bean Colombian collection. The investigation was carried out with 30 accessions of which three are improved varieties and one is an elite line, the evaluations were carried out in seven environments, six of them in cold climate and one in temperate climate. The results were analyzed by univariate and multivariate methods by principal components analysis for the group of variables and cluster analysis among accessions.

In the principal components analysis the first six components represented 87.31% of the total variation, which discriminated the cultivars of the collection for Andean and Meso-American gene pool. The morphological and agronomical differences were bigger among the Andean accessions, because of its dispersion degree in the first three components, which is higher than in the Meso-American ones.

The diversity among the gene pools is represented mainly by the growth habit, precocity, foliate area, yield per plant and the number of seeds by pod. The variables of high heredability represented by high repeatability coefficient $r > 1$ (Goodman and Paterniani, 1969) were: number of knots, pod length, pod apex length, the number of pods per plant, time to physiological maturity and the weight of 100 seeds which can be used for studies of morphological similarity and evolution.

Key words: evaluation, characterization, shrub bean, *Phaseolus vulgaris*, multivariate statistic, germplasm.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de variabilidad del frijol común, una especie del nuevo mundo, se encuentran en sus formas silvestres en las regiones de los Andes y Mesoamérica, lo cual ha permitido detectar un flujo consecuente de genes, pudiendo producir recombinación de genotipos (Singh et al., 1991).

Hasta mediados de la década de los 30, el mejoramiento genético del frijol se limitaba a las presiones naturales de selección y a aquellas preferencias de los agricultores.

¹Profesor Asistente. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá E.-Mail: galigarm@bacata.usc.unal.edu.co

²Profesor. Instituto de Genética, Universidad de los Andes. Bogotá.

La colección, evaluación y selección sistemática del germoplasma por los Programas Nacionales se inició en la década siguiente Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, México y Perú se encuentran entre los primeros países que establecieron programas de mejoramiento de frijol (Voysest, 1983).

Un aspecto que reviste importancia en relación con las características morfológicas es saber cuáles son apropiadas para encontrar diferencias y similitudes, ya que ellas tienen un efecto notable en el fenotipo de la planta entera. Goodman y Paterniani (1969) afirman que la selección de éstas se realiza con base en el efecto del ambiente y de su interacción, siendo los caracteres reproductivos los menos influidos, con excepción de los componentes de rendimiento, debido a que hay muchos factores que lo condicionan, como la interacción genotipo por ambiente y el ambiente mismo, lo cual ocurre, también, con la mayoría de los caracteres vegetativos.

Muchas han sido las investigaciones realizadas tratando de establecer criterios de clasificación de los bancos de germoplasma, buscando variabilidad en frijol. Tohme et al. (1993) determinaron como la variabilidad genética nos permite seleccionar una gama de individuos con caracteres de vital importancia en la selección de colectas para obtener variedades que sean del agrado de productores y consumidores.

Los datos generados acerca de los distintos atributos deben ser analizados con técnicas de estadística multivariada, la cual asume que hay dependencia entre las diferentes propiedades utilizadas para caracterizar una unidad. La independencia entre las unidades experimentales se conserva y pueden constituir una muestra aleatoria de una población (Chalfield y Collins, 1986; Johnson y Wichern, 1988).

Entre los métodos de análisis multivariado para detectar la interdependencia entre variables y, también, entre individuos se incluyen el análisis por conglomerados o "clusters", el de componentes principales, el de ordenamiento multidimensional y algunos métodos no paramétricos (Manly, 1994). Los componentes principales son

un análisis de la estructura de variancia y covariancia, el cual busca transformar las variables observadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas; las cuales representan combinaciones lineales de las variables originales (Pla, 1986).

Los componentes principales permiten analizar la correlación entre variables, reducir un gran conjunto de variables a otro grupo más pequeño y de sentido biológico, examinar la agrupación taxonómica de individuos y construir índices para agrupar individuos (Pielov, 1984; Pla, 1986; Onyilagha, 1986). Los análisis de conglomerados permiten la conformación de grupos de individuos similares y los análisis discriminantes consisten en separar distintos conjuntos de objetos u observaciones y en asignar nuevos objetos a grupos previamente definidos como, también, permiten conocer qué tan distantes están dos o más poblaciones de interés (Johnson y Wichern, 1988).

Los objetivos de este estudio fueron: 1°. Establecer la variabilidad genética en la colección de frijol en estudio, mediante el análisis de variables morfológicas y agronómicas cuantitativas, 2°. Proponer una clasificación de las accesiones en grupos genéticos homogéneos y 3°. Hacer inferencias de la aplicación del método de clasificación a los recursos genéticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el Centro de Investigación Tibaitatá, de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, ubicado a 4° 42' de latitud norte y 74° 12' de longitud oeste, en el Municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia), y en la Estación Experimental Calima Darién, del Centro de Agricultura Tropical CIAT, localizada a 3° 56' de latitud norte y 76° 31' de longitud oeste, en el Municipio de Calima (Valle del Cauca, Colombia), se llevó a cabo un estudio de evaluación de frijol en seis ambientes en la primera localidad y en un ambiente en la segunda (Cuadro 1).

Cuadro 1. Localización y ambientes en los cuales se evaluaron los cultivos en estudio.

Localización	Año y semestre	Altitud (m)	Factores ambientales ^{1/}	
			Precipitación (mm)	Temperatura °C
C.I. Tibaitatá, Corpoica, 4°42' N, 72°12' Oe	1994 A	2540	473	13,2
	1994 B	2540	292	12,8
	1996 A	2540	396	13,2
	1996 B	2540	242	12,8
	1997 A	2540	267	13,5
	1997 B	2540	149	13,4
Calima Darién. CIAT, 3° 56' N, 76°31' Oc	1998 A	1485	495	20,0

^{1/} Precipitación acumulada por ciclo de cultivo y temperatura promedio diaria.

Los suelos de los lotes en el C.I. Tibaitatá tuvieron niveles adecuados de fertilidad (estructura franco limosa, materia orgánica 3,7%, fósforo 30 ppm, capacidad de intercambio catiónico 31,8 y miliequivalentes en 100 g de suelo en los siguientes elementos: Ca: 19,0, Mg: 2,8, K: 0,19 y Na: 0,63) para el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos (Howeler y Medina, 1977).

Se utilizaron semillas de 30 accesiones de frijól común (*Phaseolus vulgaris* L.), de hábito de crecimiento arbustivo tipo I y II y postrado tipo III. De estas colectas,

16 corresponden a variedades regionales del nivel nacional, 10 a introducciones de Centro y Suramérica, y las variedades mejoradas de importancia comercial en Colombia ICA Tundama (Perú 5 x desconocido), ICA Cerinza ((Antioquia 10 x L-3043) x (Ant. 8 x Ant. 26)), Diacol Andino cultivada por más de 40 años por los agricultores y la línea élite L-34400 derivada de una línea mejorada por ICA Cerinza, usadas como testigos. Las accesiones pertenecen a la colección colombiana de frijól existente en el banco de germoplasma de Corpoica, en el C.I. Tibaitatá, conformada por 165 accesiones (Cuadro 2).

Cuadro 2. Accesiones de frijól de la colección colombiana, estudiadas en la evaluación morfológica y agronómica en siete ambientes. Corpoica C.I. Tibaitatá, 1994 A-1997 A y Calima Darién CIAT, 1998 A.

Nº. CIAT	Identificación	Origen ^{1/}	Hábitos de ^{2/} Crecimiento	Semilla Color ^{3/}	Tamaño ^{4/}	Acervos ^{5/}
G4698	Tolima 16	CLB	3	RjC	P	M
G4674	Nariño 7 A	CLB	3	Rj	P	M
-o- *	Tolima 17-2	CLB	1	RjC	G	A
G4544	Antioquia 20	CLB	2	RjC	G	A
G11576	Perú 5	PER	3	RjC	G	A
G4644	C/marca 148	CLB	1	RjC	G	A
-o- *	México 497	MEX	1	Rj	G	A
G4543	Antioquia 19	CLB	1	RsRj	G	A
G4700	Tolima 16 B	CLB	3	Rj	P	M
G4551	Antioquia 27A	CLB	1	RjC	G	A
G7895	Perú 40	PER	1	RjC	M	A
G4610	Cauca 34	CLB	3	Rj	P	M
G4545	Antioquia 21	CLB	3	Rj	P	M
G4648	Huila 5	CLB	3	Rj	P	M
-o- *	Tolima 17-1	CLB	2	Rj	P	M
-o- *	México 496	MEX	1	RjC	G	A
-o- *	México 171	MEX	1	Rj	M	A
G4706	Boyacá 18	CLB	1	Rj	M	A
G11525	Perú 154	PER	1	Rj	M	A
G4706	Tolima 43	CLB	1	Rj	M	A
G5772	Diacol Andino	CLB	1	RsRj	G	A
G14016	ICA Tundama	CLB	2	RjC	M	A
-o-	Línea 34400	CLB	1	Rj	G	A
-o-	ICA Cerinza	CLB	1	Rj	M	A
G11292	Argentina 1	ARG	2	C	P	M
G11293	Bolivia 7	BLV	1	CM	G	A
-o- *	Perú 224	PER	3	CM	G	A
G4679	Nariño 12	CLB	1	Rj	G	A
G4534	Antioquia 10	CLB	1	RjC	G	A
G3729	Argentina 2	ARG	1	N	M	A

1/ CLB = Colombia; PER= Perú; MEX= México; ARG= Argentina; BLV= Bolivia.

2/ 1 = arbustivo determinado, 2= arbustivo indeterminado, 3= postrado.

3/ Rj = rojo; C= crema; M= morado; N= negro; Rs= Rosado

4 G =grande; M= mediano; P= pequeño, con peso de 100 semillas >40; 25-40 y <25g, respectivamente.

5/ Acervo genético: A= andino; M= mesoamericano.

* Accesiones que no coinciden o no están en la colección mundial en el CIAT.

Las accesiones regionales e introducidas fueron tomadas al azar de la colección de trabajo del ICA y Corpoica para el mejoramiento de la especie con adaptación al clima frío y medio de Colombia. Todas las colectas se sembraron en los seis ambientes (diferentes lotes y semestres) en la localidad C.I. Tibaitatá, y en Calima Darién bajo el diseño experimental de bloques completos al azar con 30 tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron las accesiones. La unidad experimental fue un área de 9,6 m², constituida por cuatro surcos de 4 m de largo, distanciados 0,6 m entre ellos, con distancia de 10 cm. entre plantas.

La medición de los datos de las variables de respuesta se realizó con base en los descriptores propuestos por el CIAT para la especie *Phaseolus vulgaris* L. (Muñoz *et al.*, 1993). En cada parcela, a 10 plantas, en competencia con otras plantas dentro y entre surcos, se registraron, en forma individual, las variables en estudio. La clasificación de los materiales por acervo genético corresponde a la sugerida por Ligarreto y Martínez (2001). En el cuadro 3, se presentan los 23 caracteres cuantitativos evaluados, con sus respectivas unidades de medida y estado fenológico.

Cuadro 3. Descriptores varietales usados en la caracterización morfológica y agronómica de 30 accesiones de frijol.

Descriptores	Abrev.	Descriptores	AAbrev.
Plántula		Madurez fisiológica	
Días a emergencia	Deme	Días a madurez fisiológica	
Longitud de hipocotilo (cm.)	Lhip		Dmfi
Longitud del epicotilo (cm)	Lepi		
Ancho hojas primarias (cm)	Ahpr		
Longitud hojas primarias (cm)	Lhpr		
Floración		Cosecha	
Días a floración	Dflo	Días a cosecha	Dcos
Longitud del tallo principal (cm)	Ltpr	Longitud de las vainas (cm)	Lvai
Altura de la cobertura (cm)	Acob	Ancho de las vainas (cm)	Avai
Numero de nudos	Nnud	Longitud del ápice vainas (cm)	Lava
Longitud folíolo central (4º. nudo)	Lfce	Vainas por planta	Vpla
Ancho folíolo central (4º. nudo)	Afce	Semillas por vaina	Svai
Área foliar folíolo central (cm ²)*	Affc	Número plantas por parcela	Nppa
		Rendimiento por planta (g)	Rpla
		Rendimiento por parcela (g)	Rpar
		Peso de 100 semillas (g)	Psem

* Affc=Lfce x Afce x 0.75.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los datos de las variables de respuesta se procesaron con el Sistema SAS (Statistical Analysis System), versión 6,12 (SAS Institute, 1994). Con el procedimiento GLM del SAS, se realizaron los análisis de varianza para cada variable en la serie de ambientes de evaluación y con Univariate, se obtuvo la prueba de normalidad del supuesto del modelo estadístico (eij ~ N(0, s²)).

Los componentes de varianza se obtuvieron a partir de los cuadrados medios de las accesiones y del error experimental, como efectos aleatorios y repeticiones y ambientes, como efectos fijos del análisis de varianza presentado en el cuadro 4.

Este análisis se realizó con la aplicación del procedimiento Varcomp del SAS. Los estimadores de los componentes se calcularon en la siguiente forma:

$$\sigma^2 = M1; \quad \sigma_g^2 = (M3 - M2) / r; \quad \sigma_{gn}^2 = (M3 - M2) / r; \quad \sigma_a^2 = (M5 - M3 - M4 + M1) / g \cdot r.$$

Donde: g = accesión; a = ambiente; r = repetición; y los valores de M son los cuadrados medios de cada fuente de variación.

Cuadro 4. Forma de análisis de varianza para accesiones y ambientes, y estimación de cuadrados medios (C.M.E.)

Fuentes de variación	Cuadrados medios	C.M.E
Ambiente	M5	$\sigma^2 + gr\theta_a^{1/}$
Repetición (ambiente)	M4	$\sigma^2 + g\theta_{ra}^2$
Genotipo	M3	$\sigma^2 + r\sigma_{gn}^2 + ra\sigma_r^2$
Genotipo x ambiente	M2	$\sigma^2 + r\sigma_{gn}^2$
Error experimental	M1	σ^2

^{1/} g = accesión; a = ambiente; r = repetición.

Con estos estimadores, se halló el coeficiente de repetibilidad (γ) propuesto por Goodman y Paterniani (1969) para estudios de clasificación de colectas, el cual permite determinar las variables con bajo aporte ambiental sobre la expresión fenotípica de los materiales, los cuales pueden, a su vez, ser útiles para encontrar similitud y disimilitud entre accesiones. El coeficiente se representa como

$$\gamma = (s2g / (s2a + s2ga)) > 1$$

Los caracteres con $\gamma > 1$ indican que la medida entre accesiones tiene más expresión genética que efecto de ambiente e interacciones.

Los análisis multivariados se aplicaron, primero, a todas las variables y, luego, a un grupo de seis variables seleccionadas por valor $\gamma > 1$. Para evitar el efecto debido a la magnitud de la escala de medida entre los caracteres, los datos se estandarizaron a valores z con promedio cero y varianza ($s2$) uno (Scholotzhauer y Littell, 1987; Steel y Torrie, 1985).

Se usó el procedimiento Princomp sobre las variables estandarizadas que aparecen en el Cuadro 3, con el fin de elegir el número adecuado de componentes ($l^3 1$) que estiman la variancia y su contribución a la variabilidad total sugerida por los datos de la colección (Chalfield y Collins, 1986). También,

se diseñó, mediante el procedimiento 3GD (SAS Institute, 1994), la discriminación de las accesiones con los coeficientes de los tres primeros componentes principales ($l^3 1$).

En la selección de las variables más importantes en los componentes, se aplicó el método B4 propuesto por Jolliffe (1972), citado por Argüelles (1990), que favorece a las variables con mayor valor absoluto de los coeficientes en cada uno de los componentes.

Mediante el análisis Cluster, usando el ligamiento promedio (UPGMA) y la distancia euclidiana entre pares de colectas, se construyó un dendograma que da información de la cercanía y disimilaridad entre los materiales. Para el procesamiento se utilizaron los paquetes estadísticos SYN-TAX, versión 5,0 (Podani, 1993), y NTSYS, versión 2,0 (Rohlf, 1998).

RESULTADOS

Análisis de la variabilidad genética basada en descriptores cuantitativos

Los promedios, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación de los caracteres cuantitativos en los siete ambientes se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Estadísticas simples de variables morfológicas cuantitativas de 30 accesiones de frijol.

Variables	Nº. Obs.	Intervalos		Promedios	Varianzas	Desviación. estándar	Coeficient. Variación (%)	Normal. ^{1/}
		Mínimo	Máximo					
Días emergencia	270	10,0	28,0	17,7	19,9	4,5	25,2	no
Longitud hipocótilo	390	1,0	5,7	4,6	1,3	1,1	24,6	no
Longitud epicótilo	390	0,5	4,7	1,5	0,3	0,6	36,3	no
Ancho hojas prim.	390	2,2	11,7	5,2	2,5	1,6	30,4	no
Long. hojas prim	390	3,2	10,7	5,4	1,3	1,1	21,0	no
Long. foliolo cent.	390	2,4	11,2	7,8	3,6	1,9	24,3	si
Ancho foliolo cent.	390	1,6	12,2	6,4	3,0	1,7	27,0	si
Long. tallo principal	390	15,4	75,2	34,6	139,3	11,8	34,1	no
Altura cobertura	390	6,4	65,8	38,0	119,2	10,9	28,8	no
Número de nudos	390	3,2	17,2	8,5	10,0	3,2	37,2	no
Longitud de vainas	579	4,0	16,0	11,0	3,0	1,7	15,7	si
Ancho de vainas	579	0,5	1,7	1,3	0,0	0,2	14,7	no
Long. ápice vainas	579	0,3	2,1	1,3	0,3	0,5	41,6	no
Vainas por planta	579	3,4	67,2	15,8	69,6	8,3	52,9	no
Semillas por vaina	579	1,5	11,7	3,8	0,8	0,9	22,8	no
Area foliolo central	390	3,0	92,9	40,1	324,8	18,0	44,9	no
Rend. por planta	430	2,9	54,6	15,5	81,5	9,0	58,1	no
Rend. por parcela	642	9,2	3813,8	1001,8	648886	805,5	80,4	no
Días a floración	642	38,0	120,0	67,5	426,1	20,6	30,6	no
Días madurez fisiól.	276	107,0	152,0	127,7	106,9	10,3	8,1	no
Días a cosecha	561	65,0	175,0	124,6	1050,2	32,4	26,0	no
Peso 100 semillas	760	10,8	77,4	38,0	157,4	12,5	33,0	no
No. plantas parcela	444	14,0	107,0	62,3	166,3	12,9	20,7	no

^{1/} Prueba de normalidad de Shapiro - Wilk (1965); distribución normal "si" corresponde a $p > 0,01$, "no" normalidad corresponde a $p \leq 0,01$.

Los coeficientes de variación fueron superiores al 8%, lo cual indica que para cada descriptor existe, un amplio rango de dispersión en la colección de frijol en estudio, en especial, para el rendimiento por parcela, el cual presentó el valor más alto: 80,4 % de variación. Las varianzas y desviaciones estándar para rendimiento por parcela y días a cosecha mostraron los valores más altos con respecto de los otros caracteres.

La prueba de normalidad en el supuesto del modelo estadístico $eij \sim N(0, s^2)$ produjo respuestas favorables a las variables longitud y ancho del folíolo central y longitud de las vainas y no normalidad para las otras 20 variables, motivo por el cual, para estas últimas, fue necesario la transformación de los datos con raíz cuadrada para efectos de los análisis de varianza combinados de los ambientes.

El grado de asociación entre pares de variables medidas en los siete ambientes presentó valores de correlación negativos y positivos con altos niveles de significancia

estadística. Se resaltan las variables número de nudos, longitud de las vainas, longitud del ápice de las vainas, número de vainas por planta, días a madurez fisiológica y peso de 100 semillas, por alcanzar los valores absolutos más altos en sus coeficientes de correlación, los cuales oscilaron entre -0,77 hasta 0,91, y fueron, a su vez, altamente significativos ($p < 0,01$).

El número de observaciones para establecer el grado de asociación entre las 23 variables fue grande, entre 270 y 760 (Cuadro 5), lo cual causó significancia para coeficientes bajos de correlación. Debido a que existe una estructura de correlación importante entre las variables, es pertinente la aplicación de las estadísticas multivariadas como componentes principales, para conocer cuales variables discriminan a las accesiones de frijol en estudio.

En el análisis de componentes principales, se aprecia que los primeros seis componentes representan el 87,31% de la variación total (Cuadro 6).

Cuadro 6. Componentes principales seleccionados por su valor característico (λ^2) a partir de 23 variables morfológicas cuantitativas evaluadas en siete ambientes.

Componentes principales	Valores característicos (λ)	Diferencias de valores característicos	Proporciones de la varianza total	
			Absoluta (%)	Acumulada (%)
1	10,089	5,571	43,86	43,86
2	4,518	2,658	19,64	63,51
3	1,859	0,428	8,08	71,60
4	1,431	0,287	6,22	77,82
5	1,143	0,105	4,97	82,79
6	1,038	0,393	4,51	87,31

El primer componente aportó el 43,86%, el segundo, 19,64%, mientras que el componente seis contribuyó con 4,51% de esta variación. El alto porcentaje de la variación total explicada por los primeros seis componentes sugiere que ellos contienen variables que discriminan bien la colección de frijol.

La representación gráfica de los componentes principales (Figura 1) deja apreciar que en los cultivares andinos y mesoamericanos existen diferencias morfológicas y agronómicas, las cuales son mayores entre las accesiones andinas, pues su grado de dispersión en los tres primeros componentes es más alto que en los mesoamericanos. La diversidad entre los andinos esta representada por el hábito de crecimiento determinado e indeterminado y por su procedencia del norte y sur de los Andes y Perú.

Los caracteres cuantitativos que separan los cultivares en el primer componente incluyen longitud de epicótilo (coeficiente=0,267), ancho y longitud de las hojas primarias (0,275 y 0,268), número de nudos (-0,278) y de vainas por planta (-0,289), días a floración (-0,283) y a madurez fisiológica (-0,266) y peso de 100 semillas (0,251). Las características que más aportan en la discriminación en el segundo componente son longitud, ancho y área del folíolo central (0,326, 0,348 y 0,356 respectivamente). En el tercer componente, la separación de las accesiones se debió, en especial, a la variable días a emergencia (-0,586). La longitud del hipocótilo (-0,564) fue la variable de estado de plántula que clasificó a las variedades de frijol en el cuarto componente; en el quinto y sexto componentes, el número de plantas cosechadas por parcela (-0,564) y el de número de semillas por vaina (0,447) fueron los caracteres que mejor discriminaron las accesiones de frijol (Cuadro 7).

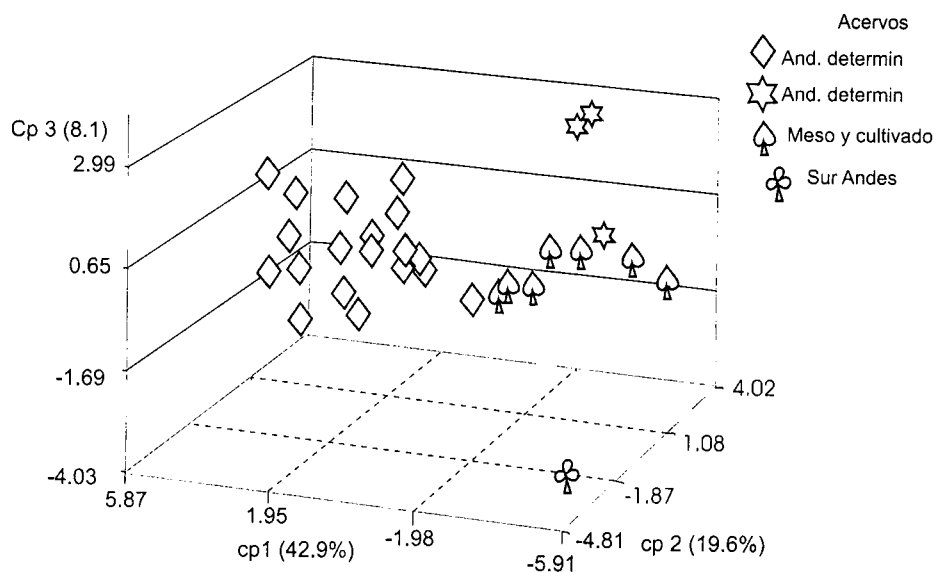


Figura 1. Dispersión de 30 accesiones de la colección colombiana de frijol en los tres primeros componentes principales de 23 descriptores cuantitativos. Las accesiones andinas indeterminadas son Perú 5, Tundama y Perú 224; el cultivar Argentina 2 constituye el grupo sur de los Andes. Los acervos genéticos se relacionan en el cuadro 2.

Cuadro 7. Variación representada por los coeficientes de caracteres morfológicos en cada vector característico asociado a los seis componentes principales de 30 accesiones de frijol.

Variables	Vectores característicos					
	1 ^o	2 ^o	3 ^o	4 ^o	5 ^o	6 ^o
Días emergencia	0,009	0,179	-0,586	0,182	-0,106	-0,071
Longitud hipocótilo	0,124	-0,096	0,161	0,586	0,083	0,320
Longitud epicótilo	0,267	-0,017	0,225	0,101	0,003	-0,188
Ancho hojas prim.	0,275	0,132	0,131	-0,107	0,089	-0,035
Long. hojas prim.	0,268	0,001	0,245	0,023	0,230	0,143
Long. foliolo cent.	0,144	0,326	-0,106	-0,023	0,303	0,326
Ancho foliolo cent.	0,158	0,348	-0,162	-0,042	-0,020	0,229
Long. tallo ppal.	-0,175	0,282	0,276	0,058	-0,199	0,002
Altura cobertura	-0,170	0,282	0,358	0,045	-0,087	-0,196
Número de nudos	-0,278	0,154	0,111	-0,050	0,021	0,067
Long. de vainas	0,162	0,237	0,182	0,298	-0,434	0,088
Ancho de vainas	0,189	0,118	-0,033	-0,324	0,291	-0,339
Long. ápice vainas	0,221	0,121	0,215	-0,021	-0,041	-0,044
Vainas por planta	-0,289	0,031	-0,073	-0,057	0,066	0,152
Semillas por vaina	-0,198	-0,076	0,100	-0,153	0,013	0,447
Area foliolo central	0,158	0,356	-0,139	-0,042	0,128	0,296
Rend. por planta	-0,144	0,348	0,032	-0,022	0,166	-0,158
Rend. por parcela	-0,147	0,194	-0,253	0,321	-0,213	-0,246
Días a floración	-0,283	0,111	0,090	-0,028	0,066	-0,015
Días mad. fisiolog.	-0,266	0,162	-0,059	0,086	0,226	0,058
Días a cosecha	-0,237	0,207	0,223	0,016	0,184	-0,117
Peso 100 semillas	0,251	0,220	-0,061	0,084	0,045	-0,248
Nº. plantas parc.	0,091	0,144	0,005	-0,496	-0,564	0,176

El cuadro 8 contiene los estimadores de los componentes de varianza para los 23 descriptores cuantitativos sobre los siete ambientes de evaluación, con los cuales se obtuvo el coeficiente de repetibilidad. El valor más alto de este coeficiente correspondió al peso de 100 semillas ($r=6,04$) seguido por la longitud de las vainas ($r=4,83$). Valores cercanos a la unidad los presentaron el número de nudos ($r=1,07$) y el de vainas por planta ($r=1,08$), la longitud del ápice de las vainas ($r=1,33$) y la época a

madurez fisiológica ($r=1,01$).

Valores inferiores a 1 en éste parámetro implican diferencias entre las accesiones a través de los ambientes para el carácter medido, al respecto del cual, se presentó una baja de la repetibilidad en el rendimiento por parcela, época a floración, época a cosecha y número de plantas por parcela, con valores, en su orden, de $r= 0,02, 0,05, 0,05$ y $0,003$.

Cuadro 8. Componentes de varianza estimados de 30 accesiones de frijol (s2g), ambientes (s2a), interacción accesiones x ambiente (s2g.a) y coeficientes de repetibilidad $\gamma = (s2g) / s2a+s2ga$ en 23 caracteres morfológicos^{1/}.

Variable	Ambientes de evaluación	σ^2_g	σ^2_a	$\sigma^2_{g.a}$	γ
Días emergencia	3	1,121	7,479	2,1900	0,11
Longitud hipocótilo	4	0,192	0,586	0,1220	0,27
Longitud epicótilo	4	0,048	0,170	0,0004	0,28
Ancho hojas primarias	4	0,449	2,115	0,1269	0,20
Longitud hojas primarias	4	0,266	0,661	0,0522	0,37
Longitud folíolo central	4	0,419	1,562	0,4320	0,21
Ancho folíolo central	4	0,300	1,599	0,1582	0,17
Longitud tallo principal	4	57,418	66,279	15,7040	0,70
Altura cobertura	4	23,962	85,691	17,5160	0,23
Número de nudos	4	5,262	3,817	1,0990	1,07
Longitud de vainas	6	1,933	0,262	0,1370	4,83
Ancho de vainas	6	0,008	0,016	0,0016	0,45
Longitud ápice vainas	6	0,058	0,041	-0,0013	1,33
Vainas por planta	6	21,548	9,924	9,9951	1,08
Semillas por vaina	6	0,070	0,382	0,035	0,17
Area folíolo central	4	41,542	176,220	29,835	0,20
Rendimiento por planta	5	6,231	24,721	1,6596	0,23
Rendimiento por parcela	5	11489,862	595647,026	41121,773	0,02
Días a floración	6	23,667	434,586	16,0287	0,05
Días madur. fisiológica	4	51,246	30,912	20,1550	1,01
Días a cosecha	5	64,214	1200,901	28,3536	0,05
Peso de 100 semillas	7	126,519	8,479	12,4494	6,04
Nº. plantas por parcela	6	0,314	33,539	49,8135	0,003

^{1/} En todas las variables los componentes de varianza para accesiones, ambientes e interacción de accesiones x ambiente mostraron diferencias altamente significativas.

Variabilidad genética representada por variables cuantitativas de alto efecto genético.

Las seis variables cuantitativas que con coeficientes de repetibilidad altos ($r>1$) se seleccionaron para discriminar la similitud entre las accesiones, puesto que aseguran su estabilidad en los diferentes ambientes. Como estas variables tienen alto grado de asociación entre sí, se les analizó mediante componentes principales, obteniéndose en los dos primeros componentes valores característicos mayores a uno que explican el 85,39 de la variación total, con contribución del 67,31% para el primer componente y 18,07% para el segundo (Cuadro 9).

Cada componente principal tiene un vector de variables

asociado. Este vector lo conforman los caracteres número de nudos (coeficiente = 0,422), longitud del ápice de las vainas (-0,381), vainas por planta (0,468), días a maduración fisiológica (0,427) y peso de 100 semillas (-0,413) los cuales son de mayor efecto en el primer componente en la clasificación de las variedades, en tanto que la longitud de las vainas (0,597) lo es en el segundo componente (Cuadro 10).

Con los coeficientes resultantes de las salidas de los componentes principales, se establecieron relaciones de distancia entre pares de variedades, para, luego, conformar grupos mutuamente excluyentes y hacer inferencias de similitud. En efecto, se halló una matriz de distancias euclidianas y, mediante el método de distancia promedio (UPGMA), se construyó un dendograma (Figura 2) (Chaffield y Collins, 1983).

Cuadro 9. Selección de valores característicos derivados de seis variables morfológicas con coeficientes de repetibilidad $\gamma > 1$.

Componentes principales	Valores característicos (λ)	Diferencias de Valores característicos	Proporciones de la varianza total	
			Absoluta (%)	Acumulada (%)
1	4,039	2,954	67,31	67,31
2	1,084	0,693	18,07	85,39
3	0,391	0,041	06,52	91,91
4	0,350	0,251	05,83	97,75
5	0,098	0,061	01,64	99,39
6	0,036	.	00,60	100,00

En la Figura 2, a cinco unidades de distancia euclidiana aparecen tres grupos de accesiones con discriminación, principalmente, por acervo genético andino y mesoamericano y cada uno con subgrupos. El subgrupo andino al se encuentra cercano a los mesoamericanos con hábito de crecimiento indeterminado tipos II y III, excepto la accesión L-34400 que es

determinada, pero con alta producción de vainas por planta (20,1 vainas), el cual es otro de los caracteres que discrimina a este subgrupo y a los mesoamericanos (22,8 y 27,3 vainas por planta) de los otros andinos ($a_2 = 12,4$ y $a_3 = 15$ vainas por planta) (Cuadro 11).

Cuadro 10. Vectores característicos asociados a los dos componentes principales de seis variables morfológicas cuantitativas con $\gamma > 1$.

Variables	Vectores característicos	
	1^0	2^0
Número de nudos	0,422	0,458
Longitud de las vainas	-0,321	0,597
Longitud ápice de las vainas	-0,381	0,359
Vainas por planta	0,468	0,182
Días madurez fisiológica	0,427	0,417
Peso de 100 semillas	-0,413	0,310

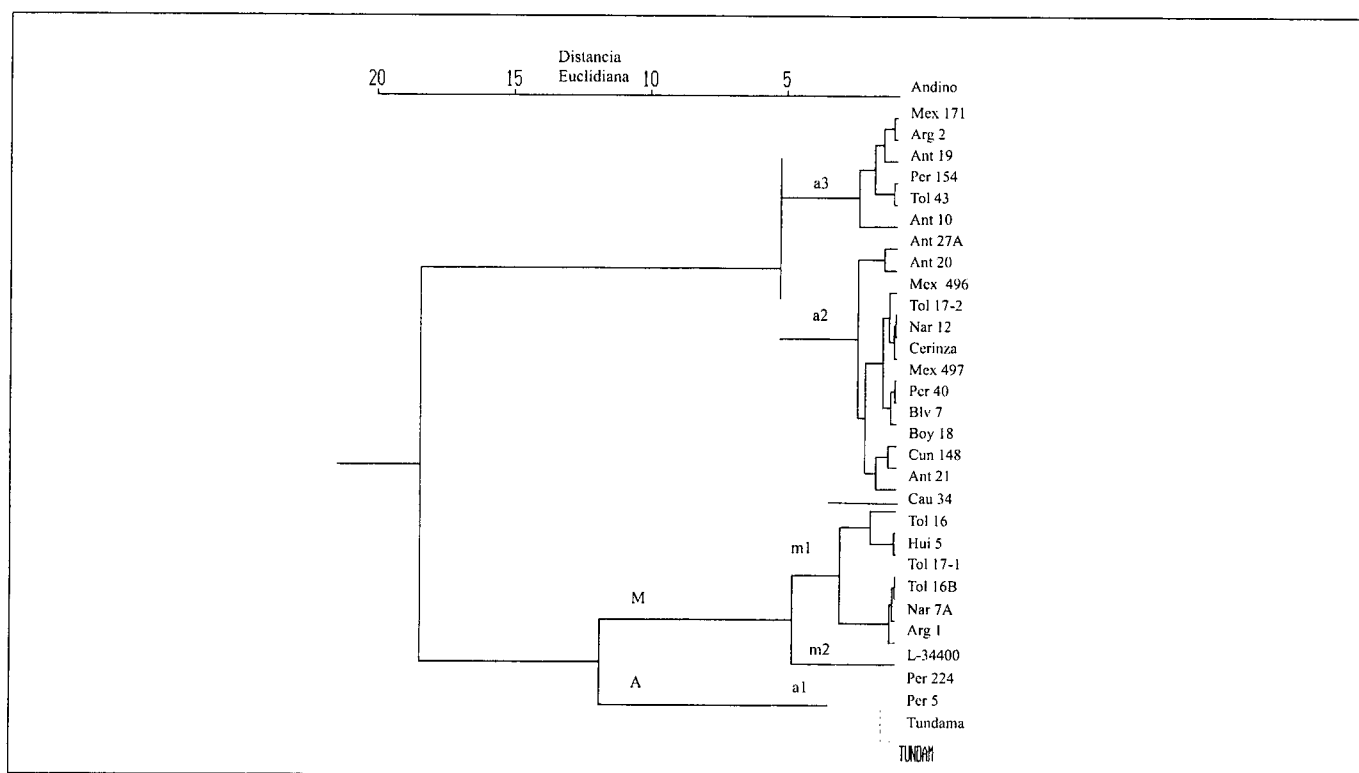


Figura 2. Dendrograma de 30 accesiones de frijol construido a partir de 6 variables cuantitativas seleccionadas usando el coeficiente de repetibilidad $\gamma > 1$. Acervos: A = andino, subgrupos a1, a2, a3, M = mesoamericano, subgrupos m1, m2.

Cuadro 11. Promedios por grupos genéticos de la principales variables cuantitativas en caracterización morfológica de frijol.1/

Variables	Andinos (A)			Mesoamericanos (M)	
	a ₁	a ₂	a ₃	m ₁	m ₂
Días a emergencia	16,1	18,1	19,6	16,8	22,5
Longitud de hipocótilo(cm)	4,5	4,6	5,4	4,1	4,5
Ancho foliolo central (cm)	6,7	6,6	6,7	5,7	6,2
Altura de cobertura (cm)	51,4	36,0	34,1	40,5	30,4
Número de nudos	12,4	6,8	8,8	11,2	10,0
Longitud de vaina (cm)	11,8	11,4	11,9	9,6	8,5
Vainas por planta	20,1	12,4	15,0	22,8	27,3
Long. ápice de vaina(cm)	1,3	1,6	1,3	1,0	0,6
Semillas por vaina	3,7	3,7	3,9	4,2	4,0
Area foliolo central (cm ²)	44,1	42,5	43,2	32,8	37,0
Rendimiento por planta (g)	21,8	14,6	15,7	16,6	14,8
Días a floración	74,0	64,0	66,0	74,0	70,0
Días a madurez fisiológica	139,0	123,0	129,0	136,0	142,0
Peso de 100 semillas	37,5	44,3	41,8	22,2	18,1
Número plantas por parcela	64,1	62,8	63,3	60,6	58,9

^{1/} Los grupos genéticos se encuentran relacionados en la Figura 2

El acervo mesoamericano tiene dos subgrupos diferenciados por el tiempo tardío de la germinación y a la madurez fisiológica; el subgrupo m₂, constituido por Argentina 1, del sur de los Andes, de hábito de crecimiento II presentó 22,5 días a emergencia y 142 días a la madurez fisiológica, mientras el subgrupo m₁, procedente del norte de los Andes, de crecimiento indeterminado tipo III, con excepción de Tolima 17-1 de hábito II, presentaron 16,8 días a emergencia y 136 días a la madurez fisiológica (Cuadro 11).

Otras variables que permitieron clasificar las accesiones por acervo y los subgrupos respectivos se relacionan en el Cuadro 11. Se destaca la altura de cobertura que fue mayor para las plantas erectas del subgrupo a₁, con valor de 51,4, superando en altura a los demás subgrupos en más de 10 cm; el número de nudos fue mayor o igual a 10 para las accesiones mesoamericanas y el subgrupo a₁ de hábitos de crecimiento II y III e inferior a 9 en los subgrupos a₂ y a₃, con predominio del hábito de crecimiento I en el acervo andino, se comprobó la mayor longitud de las vainas con valores entre 11,4 y 11,9 cm en promedio y el mesoamericano presentó como mejor promedio 9,6 cm.

El peso de 100 semillas fue inferior a 25 g en los subgrupos m₁ y m₂, entre 25 y 40 g para el subgrupo a₁ y superior a 40 g en los subgrupos de andinos a₂ y a₃, correspondiendo a semillas pequeñas, medianas y grandes, respectivamente (Muñoz *et al.*, 1993).

DISCUSIÓN

Los resultados de las estadísticas univariadas revelan la existencia de heterogeneidad entre las accesiones para la variables en estudio, lo cual se explica por la acción poligénica de los caracteres cuantitativos de los cultivares,

con diferentes grados de expresión en las evaluaciones en los siete ambientes. Para Emigh y Goodman (1985), aquellos caracteres que son altamente variables son los más utilizados para la clasificación de las accesiones, en lugar de aquéllos que tienden a ser constantes.

Los valores mínimos para rendimiento y sus componentes se presentaron, en la época de siembra, 1997B, en la localidad C.I. Tibaitatá, la cual se caracterizó por su fuerte sequía (Cuadro 1). La menor época en días a cosecha del cultivo se presentó en la localidad Calima Darién con respecto a los otros ambientes de clima frío ya que es un ambiente con temperatura media de 20°C. Una alta respuesta en rendimiento y sus componentes se observó en el ambiente C.I. Tibaitatá en la época 1997^a, con precipitación de 267 mm, adecuada para el desarrollo del ciclo de vida del cultivo. Este comportamiento refleja la variación de cada uno de los descriptores por efectos del ambiente, excepto caracteres como la longitud y el ancho de las vainas que presentaron poca plasticidad al cambio ambiental, reflejado en bajos coeficientes de variación (15,7 y 14,7%, respectivamente) y baja desviación estándar (1,7 y 0,2) (Cuadro 5).

La mayoría de las distribuciones de las variables no mostraron normalidad, posiblemente, por la gran cantidad de datos en cada prueba, la cual osciló entre 270 y 760 observaciones. Debido a que los métodos clásicos del análisis estadístico se basan en las asunciones de una distribución normal de las variables de respuesta, los datos se transformaron para determinar los componentes de varianza. Por otra parte, los análisis multivariados de componentes principales y agrupamientos tienen distribución libre que hacen posible describir la variabilidad presente en el germoplasma sobre los datos originales de los descriptores (Chatfield y Collins, 1980).

El análisis de componentes principales permitió identificar que las variables relacionadas con hábito de crecimiento, precocidad, área foliar, rendimiento por planta, y sus componentes están asociadas a los seis componentes de mayor importancia entre los 23 posibles. De igual manera, se identificaron las variables número de nudos, días a floración, tamaño de la hoja, número de semillas por vaina y rendimiento por planta como los caracteres de mayor aporte en la discriminación de los cultivares por acervo genético mesoamericano y andino.

Los anteriores resultados son semejantes a los reportados por Singh et al. (1991), quienes informan que existe fuerte asociación entre los acervos genéticos con las características consideradas en este estudio, tales como hojas y semillas grandes en el acervo andino y de tamaño pequeño en el acervo mesoamericano.

Voyses (1991) menciona que el tamaño de la semilla es uno de los caracteres de mayor utilidad en la clasificación del frijol, puesto que determina el grado de aceptabilidad de las variedades por parte del productor y consumidor.

Los subgrupos presentes en el acervo andino obedecen a las diferencias en hábito de crecimiento, con separación entre arbustivos determinados para los materiales de Colombia, México y Bolivia, Perú de hábito indeterminado y una accesión (Argentina 2) procedente del sur de los Andes con hábito de crecimiento determinado, color negro de la semilla, y características morfológicas parecidas a las del subgrupo de andinos determinados (Figura 1), que, a su vez, se diferencia de este grupo por presentar época tardía en germinación de 30 o más días, aspecto que la hace cercana a algunos materiales silvestres.

Las variantes al interior del acervo andino se deben a la presión de selección por parte del productor, quien prefiere las variedades de frijol por características fenotípicas que conlleven al predominio de ciertas variedades a nivel local o regional. No obstante, cultivares similares morfológicamente pueden ser distantes en su constitución genética.

Al realizar los análisis combinados de varianza por ambientes se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) y altamente significativas ($p < 0,01$) entre los cultivares, las localidades y para la interacción cultivar por localidad para las 23 variables de estudio, debidas a la alta variación entre las accesiones y al efecto del ambiente sobre los caracteres poligénicos. Del mismo modo, al examinar los coeficientes de repetibilidad (γ), se estableció que los valores bajos corresponden a caracteres vegetativos con evaluación en las fases V0 de germinación hasta V5, cuando la planta presentó la tercera hoja trifoliolada desplegada y a los caracteres reproductivos como rendimiento con alto efecto de ambiente para su expresión (Davis, 1985).

Como el valor del coeficiente de repetibilidad (γ) depende de la variabilidad genética entre los cultivares evaluados por ciertas variables en diferentes ambientes,

resulta viable el criterio de escoger, entre los caracteres cuáles pueden servir para hacer la clasificación de las accesiones. En este sentido, los caracteres con valores de $\gamma > 1$ conllevan a estabilidad de los cultivares en los ambientes e indican alta heredabilidad, de tal manera, que los caracteres número de nudos, longitud de las vainas, longitud del ápice de las vainas, el número de vainas por planta, la época a madurez fisiológica y el peso de 100 semillas pueden utilizarse como variables importantes para estudios de medidas de similaridad morfológica y divergencias de evolución (Goodman y Paterniani, 1969).

La consistencia en la selección de las variables por alto valor de γ para discriminar la variabilidad morfo-agronómica, se confirma por los altos coeficientes del valor absoluto de todas las variables presentes en el análisis de componentes principales (Cuadros 10 y 11), los cuales aportan 85,39% de la varianza total con los dos primeros componentes principales.

Para explicar el 85.39% de la variabilidad retenida por los dos primeros componentes principales, para las seis variables seleccionadas se elaboró el dendograma (Figura 2) que permite visualizar dos grandes grupos con separación por acervo andino y mesoamericano con los subgrupos ya relacionados en el análisis de componentes principales para las accesiones, según su comportamiento en las 23 variables cuantitativas.

La relativa cercanía entre el acervo mesoamericano con los materiales de Perú e ICA Tundama, procedente de Perú 5 se debe al hábito de crecimiento indeterminado tipos II y III predominantes en las accesiones del Perú y en las del acervo mesoamericano y principalmente, al tamaño pequeño de la semilla. De igual manera, las accesiones de frijol estudiadas del acervo mesoamericano y origen colombiano, junto con los materiales peruanos, comparten zonas geográficas comunes que ocasionan adaptaciones similares y evolución con posible paralelismo en los ciclos de domesticación.

Puede ser, también, que Colombia actuó como lugar de posible domesticación de los dos acervos ancestrales de frijol.

BIBLIOGRAFÍA

- ARGÜELLES, J. 1990. Selección de variables en cebada mediante el análisis de componentes principales. Revista ICA 25(4):355-365.
- CHALFIELD, C. & COLLINS, A.J. 1986. Introduction to multivariate analysis. 3a edition. Chapman and Hall. New York, U.S.A. 246 p.
- DAVIS, J.H.C. 1985. Conceptos básicos de genética de frijol. En: Frijol investigación y producción. M. López; F. Fernández y A. Van Schoonhoven. CIAT, Cali, Colombia. pp. 7-41.

- EMIGH, T.H. & GOODMAN, M.M. 1985. Multivariate analysis in nematode taxonomy. In: An advanced treatise on *Meloidogyne*. Vol II methodology. Barker, K.R., Carter, C.C. and Sasser, J.N. eds. Nort Carolina State University Graphics. Raleigh, N.C., p.197-204.
- FLOR, C.A. 1985. Revisión de algunos criterios sobre la recomendación de fertilizantes en frijol. En: Frijol investigación y producción. M. López; F. Fernández y A. Van Schoonhoven. CIAT, Cali, Colombia. p. 287-312.
- GOODMAN, M.M. & PATERNIANI, E. 1969. The races of maize III choices appropriate characters for racial classification. *Economic Botany* 23 : 265-273.
- HOWELER, R. & MEDINA, C.J.. 1977. La fertilización en el frijol *Phaseolus vulgaris*: elementos mayores y secundarios. En: Curso intensivo de adiestramiento en producción de frijol para investigadores de América Latina. Cali, Colombia. 29 p.
- JOHNSON, R.A. & WICHERN, D. 1988. Applied multivariate statistical analysis. 2ª. Edition. Prentice Hall, Englewood, New Jersey, U.S.A. 607 p.
- LIGARRETO, G.A. & MARTÍNEZ, O. 2000. Variabilidad genética en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.): II Análisis de marcadores morfológicos y agronómicos cualitativos y cuantitativos. En publicación .
- MANLY, B.F. 1994. Multivariate statistical methods. 2a edition. Chapman and Hall. New Zealand. 215 p.
- MUÑOZ, G.; GIRALDO, G. & FERNÁNDEZ, DE SOTO, J. 1993. Descriptores varietales: arroz, frijol, maíz, sorgo. Publicación No 177. CIAT, Cali, Colombia. 170 p.
- ONYILAGHA, J.C. 1986. Numerical analysis of variation among Nigerian *Dioscorea rotundata* accessions. *Euphytica* 35 : 413-419.
- PIELOV, E.C. 1984. The interpretation of ecological data. A primer on classification and ordination. John Wiley & sons. New York. U.S.A., p. 136-151.
- PLA, L.E. 1986. Análisis multivariado: método de componentes principales, secretaria OEA. Washington, D.C. U.S.A., 94 .
- PODANI, J. 1993. SYN-TAX. Computer programs for multivariate data analysis in ecology systematic. Version 5.0, Scientia Publishing. Budapest, Hungary. 104 p.
- ROHLF, F.J. 1998. NTSYS. Numerical taxonomy and multivariate analysis system. Version 2.0, Exeter Publ., Setauket, N.Y., U.S.A., 31 p.
- SAS INSTITUTE PROCEDURES GUIDE. 1994. Release 6.12 Edition. SAS, Institute Inc. Cary N.C., U.S.A. 1080 p.
- SCHOLOTZHAUER, S.D. & LITTELL, R.C. 1987. SAS System for elementary statistics analysis. SAS Institute, North Carolina, USA, 417 pp.
- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52:591-611.
- SINGH, S.P.; GUTIERREZ, J.A.; MOLINA, A; UREA, C. & GEPTS, P. 1991. Genetic diversity in Common beans : II Marker-based analysis morphological and agronomic traits. *Crop Science* 31 :23-49.
- STEEL, R. & TORRIE, J. 1985. Bioestadística: principios y procedimientos. 2ª editorial Mc GrawHill Latinoamericana, Bogotá, 622 p.
- TOHME, J.; JONES, P; BEEBE, S; IWANAGA, M. & TORO, O. 1993. Forming a core collection of *Phaseolus vulgaris* L. In: Phaseolus beans advanced Biotechnology Research Network. CIAT, Cali, Colombia. p. 118-122.
- VOYSEST, O. 1983. Variedades de frijol en América Latina y su origen. CIAT. Cali, Colombia. 87 p.
- VOYSEST, O. 1991. Bean Cultivars: Classes and comercial seed types. In: Common Beans: Research for crop improvement. Van Schoonhoven, A. and Voysest, O. eds. Cali, Colombia. p. 124.