

Evaluación por rendimiento de 12 genotipos promisorios de frijol voluble (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo Bola roja y Reventón para las zonas frías de Colombia

Yield evaluation in 12 promissory genotypes of climbing bean (*Phaseolus vulgaris* L.) red ball and popping types for cold zones of Colombia

Jesús Edgardo López¹ y Gustavo Adolfo Ligarreto²

Resumen: El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es un alimento básico en la región Andina por ser una fuente rica en proteína y de bajo costo. La investigación para incrementar rendimientos en esta leguminosa es una opción para mejorar la competitividad en el mercado mundial. El objetivo principal de este trabajo fue evaluar por rendimiento los genotipos promisorios de frijol voluble, tipos Bola roja y Reventón, para las zonas frías de Colombia mediante el análisis de sendero. Se realizó un diseño de bloques completos al azar con tres réplicas para evaluar 10 genotipos promisorios de frijol voluble. El análisis de sendero para el rendimiento por planta y las correlaciones entre el rendimiento y sus componentes mostraron que el carácter número de vainas por planta es el de mayor importancia sobre la determinación del rendimiento, en comparación con los caracteres peso de 100 semillas y número de semillas por vaina, tanto en los genotipos de frijol voluble tipo Bola roja como tipo Reventón.

Palabras claves adicionales: análisis de sendero, componentes del rendimiento, leguminosa, frijol voluble

Abstract: The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a basic food of the Andean region and is a rich source of low-cost protein. Improvement of yield of this legume would enhance its competitiveness on the international market. The principal objective of this work was to evaluate promising genotypes of climbing bean with red seeded or popping grain types for cool high altitude zones of Colombia using path analysis. A completely randomized block design with three replicates was used to evaluate 10 genotypes of climbing bean. Path analysis for yield per plant and correlations among yield and its components showed that number of pods per plant was the most important characteristic in the determination of yield, compared with weight of 100 grains or number of grains per pod, both for red seeded or popping grain types.

Additional key words: path analysis, yield components, legumes, climbing bean

Introducción

EL FRÍJOL, ESPECIE DE ORIGEN AMERICANO, es la leguminosa alimenticia más importante del mundo y uno de los alimentos básicos en la región Andina (Ramos, 1981; López, 2005). La mayor parte de su producción y consumo se centra en países en desarrollo. En 1998, Colombia participó con 0,7% de la producción mundial de frijol seco, con una cuota de 121.118 t. En este mismo año, el rendimiento nacional se ubicó en 945 kg · ha⁻¹ y en 2000

aumentó hasta 1.076 kg · ha⁻¹ (CCI, 2001; FAO, 2004). Las importaciones de frijol seco son consecuencia del déficit en la producción nacional de frijol, por lo que los incrementos del rendimiento permitirán disminuir las importaciones de esta leguminosa. El desarrollo de variedades de frijol con incrementos del rendimiento es fundamental para mejorar la competitividad del grano y son un factor que podría mitigar el déficit nacional para suplir las necesidades alimenticias de la población con una fuente de bajo costo, rica en aminoácidos y carbohidratos.

Fecha de recepción: 13 de julio de 2006

Aceptado para publicación: 30 de noviembre de 2006

¹ Ingeniero agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: jelopezm@unal.edu.co

² Profesor asociado, Facultad Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. e-mail: galigarretom@unal.edu.co

En los últimos años la investigación en frijol en el país ha sido continua e importante. Muestra de ello son los trabajos realizados por Vargas (1993), Rojas (1995), Cerrón (1996), Valderrama (1997), Aceros y Pineda (1997), Quevedo (1998), Ligarreto (2001), López (2005), Gallego (2005) y Melo (2005), que han desarrollado diferentes temas de investigación relacionados con enfermedades, fisiología, densidades, sequía, calidad nutricional del grano y características bioquímicas, moleculares y morfoagronómicas; dentro de estas últimas se encuentran el rendimiento y sus componentes.

El rendimiento está relacionado con el producto de la interacción entre el genotipo y el ambiente, que se manifiesta a través de procesos fisiológicos (Vargas, 1993). Precisamente Quevedo (1998), en la evaluación fisiológica y de la producción de frijol arbustivo en condiciones de la Sabana de Bogotá, encontró que el área foliar específica (AFE), la duración del área foliar (DAF) y la razón de peso foliar (RPF) son los índices morfológicos de crecimiento que mejor expresaron los cambios en el rendimiento agronómico del frijol.

La selección en frijol por incremento de rendimiento agronómico y sus componentes es difícil por la baja heredabilidad y los efectos ambientales sobre su expresión (Quevedo, 1998). El rendimiento en frijol es una variable compleja que depende de factores directos e indirectos. Entre los factores directos los de mayor peso son el número de vainas por planta, el número de semillas por vaina y el peso del grano.

Se pueden usar las correlaciones fenotípicas, genéticas y ambientales para evaluar la asociación entre los caracteres de interés en el mejoramiento genético de plantas. La correlación fenotípica se estima directamente de los valores medios fenotípicos de campo, es decir, de causas genéticas y ambientales. La correlación genotípica, en cambio, corresponde a la porción genética de la correlación fenotípica y es empleada para orientar programas de mejoramiento (Ceballos, 2003; Cruz y Regazzi, 1997; Falconer y Makay, 1996; Vencovsky y Barriga, 1992 y Hallauer y Miranda, 1981).

A través del tiempo, las correlaciones se han utilizado en el campo del fitomejoramiento para varios objetivos, entre los que se destaca la obtención de información básica para realizar el análisis de sendero o ruta (*path analysis*, en inglés). Para la determinación de relaciones en variables complejas como el rendimiento se puede emplear parámetros como el coeficiente de correlación.

Sin embargo, Singh y Chaudhary (1977), Cruz y Regazzi (1997) y Vencovsky y Barriga (1992, citado por Espitia, 2005), señalan que los coeficientes de correlación, a pesar de ser de gran utilidad en la cuantificación de la magnitud y dirección de las influencias de factores en la determinación de caracteres complejos, no le dan una importancia exacta a los efectos directos e indirectos de esos factores. Para solucionar ese problema se desarrolló el análisis de sendero.

El análisis de sendero consiste en desdoblar el coeficiente de correlación –fenotípico, genético y ambiental– en los efectos directos e indirectos de varios caracteres –causas– sobre una variable básica compleja –efecto–. A pesar de que una correlación es una característica intrínseca a dos caracteres en una condición experimental dada, su descomposición es dependiente del conjunto de caracteres estudiados, que normalmente es evaluado por el conocimiento previo del investigador basado en su importancia y las posibles interrelaciones (Cruz y Regazzi, 1997; Singh y Chaudhary, 1977 y Vencovsky y Barriga, 1992, citado por Espitia, 2005).

El estimador dentro del análisis de sendero que mide las relaciones causa-efecto entre caracteres es llamado coeficiente de sendero (*path coefficient*, en inglés), que mide la influencia directa de una variable sobre otra, independientemente de las demás. Es este estadístico el que permite desagregar los coeficientes de correlación simples en sus efectos directos e indirectos. Según Cruz y Regazzi (1997) y Vencovsky y Barriga (1992), un análisis de sendero es en esencia un estudio que permite evaluar si una relación entre dos variables es de causa-efecto o es determinada por la influencia de otras variables. Un análisis de sendero puede realizarse a partir de correlaciones fenotípicas, genéticas y ambientales.

La literatura reportada para *P. vulgaris* es escasa en este tema. Por ello, la descomposición de las correlaciones en efectos directos e indirectos entre los caracteres agronómicos del rendimiento es fundamental en programas de mejoramiento genético de esta especie, que en el entorno nacional se siembra tradicionalmente en promedio en una área de 150.000 ha, de las cuales cerca a 70% corresponden a frijoles volubles, con predominio de los tipos Bola roja para mercado como grano fresco o seco, mientras que el frijol tipo Reventón aún es desconocido por los productores y consumidores, pero es una alternativa promisoría para nuevos mercados en la modalidad de pasabocas.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar por rendimiento a genotipos promisorios de frijol voluble tipos Bola roja y Reventón para las zonas frías de Colombia, mediante el análisis de sendero para el rendimiento por planta, en función del número de vainas por planta, número de semillas por vaina y peso de 100 semillas, utilizando las correlaciones genotípicas y fenotípicas entre estos caracteres.

Materiales y métodos

Se hizo una evaluación de 12 genotipos promisorios de frijol voluble tipos Bola roja y Reventón sobre el rendimiento y sus componentes primarios: número de vainas por planta, número de semillas por vaina, peso de 100 semillas. El estudio se realizó en invernaderos de la Universidad Nacional de Colombia, en Bogotá, durante 2005. El área está localizada a 2.556 msnm y tiene humedad relativa de 80% y brillo solar de 4,5 h · d⁻¹ (Vargas, 2001).

En la tabla 1 aparecen las accesiones en estudio: ocho son frijoles tipo Bola roja, para los que se utilizó la variedad Bola rojo de Cabrera como testigo, y cuatro fueron tipo Reventón, con frijol 'Pava' como testigo. Los genotipos Bola roja son accesiones del Banco de germoplasma de Corpoica (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria) en Mosquera, Cundinamarca. Los genotipos reventones son accesiones del Banco de germoplasma del CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) en Palmira y originarios de Perú y Bolivia. Así, el experimento tuvo en total 12 tratamientos,

repetidos cada uno tres veces, en los que la unidad experimental estuvo conformada por una parcela de 20 plantas, con un arreglo de bloques completos al azar. Cada parcela o unidad experimental comprendió una longitud de 2,0 m, en la que se sembraron semillas de frijol a 0,1 m, para un total de 20 semillas por unidad experimental; la distancia entre surcos fue 1,2 m.

Los genotipos se evaluaron tomando como referencia las variables: número de vainas por planta, número de semillas por vaina, peso de 100 semillas y rendimiento por parcela. El rendimiento por planta se obtuvo del rendimiento por parcela dividido por el número de plantas cosechadas en la parcela.

Para determinar el número de vainas por planta se cosechó toda la parcela y se calculó la relación entre el número de vainas total y el número de plantas total en la unidad experimental. En la variable número de semillas por vaina se colectaron de cada parcela al azar 10 vainas formadas y se contó su número de semillas para calcular un promedio. La variable peso de 100 semillas se determinó mediante el peso de 100 semillas, tomadas al azar de cada parcela, con 14% de humedad y el hábito de crecimiento, de acuerdo con los descriptores del CIAT (1987).

Resultados y discusión

Correlaciones fenotípicas, genéticas y ambientales

Rendimiento por planta y vainas por planta

Para los dos tipos de frijol evaluados se presentó una correlación fenotípica, genotípica y ambiental positiva entre el número de vainas por planta (VPP) y el rendimiento por planta (RPP), siendo estos efectos significativos para los genotipos de frijol tipo Bola roja. Sin embargo, cabe resaltar que, en cualquiera de los tres tipos de asociación –fenotípica, genotípica y ambiental– entre el RPP y VPP para los genotipos reventones, los coeficientes de correlación fueron todos superiores a 0,70. Estos resultados son similares a los encontrados por Valderrama (1997), quien determinó el coeficiente de correlación de Spearman entre las variables VPP y RPP, hallando una correlación fenotípica positiva y significativa (0,43) para 26 líneas de frijol caraota (*P. vulgaris*). De acuerdo a lo anterior, el número de vainas por planta sería el principal componente de rendimiento entre los evaluados.

Tabla 1. Accesiones evaluadas de frijol voluble (*P. vulgaris*).

Número de orden	Accesión	Tipo de frijol
1	100303158	Bola rojo
2	100303160	Bola rojo
3	100303161	Bola rojo
4	100303164	Bola rojo
5	100303165	Bola rojo
6	100303166	Bola rojo
7	100303198	Bola rojo
8	Cabrera (testigo)	Bola rojo
9	G 12575	Reventón
10	G 12589	Reventón
11	G 23715	Reventón
12	G 23729 Pava (testigo)	Reventón

Rendimiento por planta y semillas por vaina

Para las accesiones de frijol Bola roja, la asociación entre el RPP y semillas por vaina (SPV) (tabla 2) mostró una correlación positiva en los coeficientes fenotípico y genotípico y una correlación negativa para el coeficiente ambiental, pero por los valores tan bajos ninguna de las tres relaciones fue significativa; esto indica que el RPP en frijol voluble tipo Bola roja depende sólo en una magnitud pequeña del carácter SPV.

Tabla 2. Correlaciones fenotípicas (r_F), genéticas (r_G) y ambientales (r_A) para componentes primarios del rendimiento en frijol Bola roja (diagonal hacia arriba) y Reventón (diagonal hacia abajo).

Variables	r	RPP	VPP	SPV	PCS
RPP	r_F		0,88 **	0,096 ns	0,48 ns
	r_G	1	0,80 *	0,17 ns	0,68 ns
	r_A		0,98 **	-0,16 ns	-0,040 ns
VPP	r_F	0,70 ns		-0,31 ns	0,19 ns
	r_G	0,71 ns	1	-0,38 ns	0,28 ns
	r_A	0,81 ns		-0,18 ns	-0,14 ns
SPV	r_F	-0,50 ns	-0,97 *		0,21 ns
	r_G	-0,52 ns	-0,97 *	1	0,24 ns
	r_A	0,49 ns	0,16 ns		-0,43 ns
PCS	r_F	-0,23 ns	-0,85 ns	0,96 *	
	r_G	-0,22 ns	-0,85 ns	0,96 *	1
	r_A	-0,52 ns	-0,64 ns	0,023 ns	

**altamente significativa ($\alpha = 0,01$).

*significativa ($\alpha = 0,05$).

ns: no significativa.

RPP, rendimiento por planta; VPP, número de vainas por planta; SPV, número de semillas por vaina; PCS, peso de 100 semillas.

Cabe mencionar que el valor negativo del coeficiente de correlación ambiental entre las variables RPP y SPV se presenta sólo cuando el ambiente favorece un carácter en detrimento del otro (Espitia, 2005), es decir, que el ambiente bien pudo afectar positivamente al RPP disminuyendo el carácter SPV o que el ambiente afectó positivamente a los SPV y negativamente al carácter RPP.

En las entradas evaluadas de frijol Reventón, la relación entre el RPP y SPV fue negativa para las correlaciones fenotípica y genotípica y positiva en la correlación ambiental; sin embargo, en ninguno de los tres coeficientes la asociación fue significativa (tabla 2). Las correlaciones entre el RPP y el SPV en los genotipos de frijol Reventón, en contraste con las accesiones de frijol tipo Bola roja, fueron totalmente

contrarias. Así, el RPP en frijol Reventón está asociado negativamente con el carácter SPV y se expresa mejor en la correlación genotípica que en la correlación fenotípica, debido a que en la correlación genotípica se eliminan los efectos ambientales y genéticos no aditivos (Espitia *et al.*, 2005).

El coeficiente de correlación ambiental positivo entre el RPP y el SPV para el frijol tipo Reventón sugiere que los dos caracteres son beneficiados o perjudicados por las mismas variaciones ambientales (Falconer, 1972). En general, las correlaciones genéticas y ambientales deberían presentar el mismo signo, mientras que los casos en que esto no ocurre indicarían que las causas de variación genética y ambiental influyen los caracteres por medio de diferentes mecanismos fisiológicos (Espitia, 2005), lo que evidencia que tales mecanismos fisiológicos se presentaron entre las variables RPP y SPV para las accesiones de frijol tipo Reventón.

Rendimiento por planta y peso de 100 semillas

En la tabla 2 se observa que el RPP en frijol tipo Bola roja presentó una correlación positiva para los coeficientes fenotípico y genotípico con relación al peso de 100 semillas (PCS), no obstante que las correlaciones no fueron significativas por su valor. Pero a pesar de esto, se nota que la correlación genotípica entre RPP y PCS en frijol Bola roja se expresa mejor por las causas arriba mencionadas. El coeficiente de correlación ambiental negativo entre RPP y PCS se explica por el efecto inverso del ambiente sobre los dos caracteres (Espitia, 2005).

Las accesiones de frijol tipo Reventón contrastan con los genotipos tipo Bola roja en la comparación de las correlaciones entre las variables RPP y PCS. Por ello, los coeficientes de correlación entre el RPP y PCS en los frijoles reventones fueron negativos aunque no significativos, pero tales coeficientes fenotípico y genotípico sí sugieren que la tendencia que se presenta es un aumento del rendimiento ligado a una ligera disminución en el carácter PCS.

Valderrama (1997), en la zona de vega del río Arauca, encontró en la evaluación del rendimiento y de algunos parámetros fisiológicos en 26 líneas de frijol Caraota la misma tendencia hallada en el frijol Reventón al correlacionar las variables RPP vs PCS, determinando un coeficiente de asociación de Spearman de -0,14 a partir de datos fenotípicos de campo.

Vainas por planta y semillas por vaina

De la tabla 2 se puede inferir que para los genotipos de fríjol Bola roja la correlación entre el carácter VPP y el SPV fue negativa pero no significativa, en los tres tipos de correlación, a pesar de presentarse un valor mayor para la correlación genotípica, que maximiza los verdaderos efectos de las dos variables asociadas. Pero los coeficientes de correlación fenotípica y genotípica son de interés para explicar que, en las accesiones de fríjol voluble tipo Bola roja, un aumento en la variable VPP puede traer como respuesta una leve disminución en el carácter SPV.

Para los genotipos de fríjol tipo Reventón, las correlaciones fenotípica y genotípica entre las variables VPP vs SPV fue negativa y significativa, lo que permite deducir que en estas accesiones de fríjol se presenta una disminución en el carácter SPV a medida que aumenta el carácter VPP.

Vainas por planta y peso de 100 semillas

En los genotipos de fríjol tipo Bola roja, las correlaciones fenotípica y genotípica entre las variables VPP y PCS fueron positivas, más no significativas. Ello significa que la correlación lineal entre VPP y PCS en fríjoles Bola roja es muy baja, pero que, a pesar de esto, la correlación es superior al analizar sólo los efectos genéticos entre los dos caracteres.

Para las accesiones de fríjol Reventón, se observa en la tabla 2 que las correlaciones de interés –fenotípica y genotípica– entre las variables VPP y PCS fueron negativas, pero no significativas. Sin embargo, esta asociación inversa sugiere que genotipos reventones, en los que se quiera mejorar el rendimiento por medio de un aumento en el carácter VPP, serían accesiones que presentarían bajo valor para el carácter PCS.

Semillas por vaina y el peso de 100 semillas

En genotipos de fríjol Bola roja no se presentó una correlación fenotípica y genotípica significativa entre SPV y PCS. No obstante, es de anotar que tanto las correlaciones fenotípica como genotípica fueron positivas, entre las variables SPV y PCS. Una correlación fenotípica inferior que la genotípica implica una correlación ambiental con efecto negativo (Espitia, 2005); por consiguiente, el efecto de los factores ambientales en los genotipos Bola roja para las variables SPV y PCS fueron detrimentales

y se expresaron por medio de la correlación fenotípica entre los mismos caracteres SPV vs. PCS.

En las accesiones de fríjol Reventón evaluadas, las correlaciones fenotípica y genotípica fueron positivas y significativas, indicando que en estos tipos de fríjol voluble se presenta un mayor peso del grano para las accesiones que tienen el mayor número de semillas por vaina. Esto se puede observar en la accesión de fríjol Reventón conocido como pava, que posee el mayor número de semillas por vaina y además reportó el mejor peso de grano con respecto al resto de genotipos reventones.

Análisis de sendero para el rendimiento por planta

Fríjol voluble tipo Bola roja

En la tabla 3 se muestran los resultados de dos análisis de sendero –fenotípico y genotípico–, con los que se desdoblaron las correlaciones fenotípicas y genotípicas para el RPP en sus efectos directos (diagonal en negritas) e indirectos (filas) para ocho genotipos de fríjol voluble tipo Bola roja.

Tabla 3. Análisis de sendero para el rendimiento por planta (RPP) en fríjol voluble Bola roja, en función del número de vainas por planta (VPP), número de semillas por vaina (SPV) y peso de 100 semillas (PCS).

Variables	Correlaciones fenotípicas				Correlaciones genéticas			
	VPP	SPV	PCS	RPP	VPP	SPV	PCS	RPP
VPP	0,940	-0,102	0,045	0,883	0,866	-0,159	0,093	0,800
SPV	-0,286	0,333	0,049	0,096	-0,328	0,420	0,079	0,171
PCS	0,176	0,069	0,239	0,484	0,240	0,100	0,335	0,675
$r^2 = 0,97$ $h = 0,150$					$r^2 = 0,99$ $h = 0,097$			

R^2 , coeficiente de determinación; h , efecto residual.

El modelo tiene un ajuste excelente, tanto en las descomposición de las correlaciones fenotípicas ($R^2 = 0,97$) como en las genotípicas ($R^2 = 0,99$) para el RPP (variable efecto), en fríjol voluble tipo Bola roja en función de VPP, SPV y PCS (variables causa). Tanto los coeficientes de determinación (R^2) como los efectos residuales (h) para cada modelo –fenotípico y genotípico– (tabla 3) permitieron concluir que las variables evaluadas sí explican el RPP en fríjol voluble tipo Bola roja.

Este modelo, a su vez, indica la importancia de los componentes primarios del rendimiento en la expli-

cación del rendimiento mismo por planta en frijol voluble Bola roja. Se observa precisión mayor en la explicación del modelo cuando se usan las correlaciones genotípicas a cambio de las fenotípicas. Esta situación posiblemente se explique porque en las correlaciones fenotípicas existen efectos de los factores ambientales y los factores genéticos no aditivos, mientras que en las correlaciones genotípicas estos efectos de factores ambientales y genéticos no aditivos no se consideran, maximizándose la relación entre las variables causa (VPP, SPV, PCS) y la variable efecto o compleja (RPP) del modelo planteado (Espitia *et al.*, 2005).

Los resultados obtenidos en ambos modelos –fenotípico y genotípico– para los genotipos de frijol voluble tipo Bola roja son similares al analizar la relación existente entre los efectos directos sobre los indirectos en valor absoluto. Todos los efectos directos determinados en los dos análisis de sendero fueron positivos y son los que explican primordialmente el grado de asociación entre los tres caracteres VPP, SPV y PCS con el RPP del frijol voluble tipo Bola roja.

Los efectos indirectos para los dos modelos fueron todos inferiores, con respecto a los efectos directos; además, los mismos efectos indirectos fueron negativos en los análisis de sendero fenotípico y genotípico para el carácter SPV, cuando se analizó el efecto directo de la variable VPP, y para el carácter VPP, cuando se analizó el efecto directo del parámetro SPV, confirmando así la asociación inversa entre VPP y SPV (tabla 2).

La relación o cociente entre los efectos directos sobre los efectos indirectos encontrados para los genotipos de frijol voluble Bola roja en el análisis de sendero fenotípico fue, en valor absoluto, 16,5 para VPP, 1,41 para SPV y 0,98 para PCS; para el análisis de sendero genotípico los valores fueron 13,1 para VPP, 1,69 para SPV y 0,98 para PCS. Esto significa que ambos análisis de sendero fueron similares en sus resultados y que la variable VPP, en comparación a las variables SPV y PCS, fue la que mejor explica el RPP para los genotipos de frijol voluble Bola roja. En contraste, la variable PCS, con respecto a VPP y SPV, fue el carácter que tuvo el efecto directo menor sobre el RPP para los dos análisis de sendero.

Los efectos directos de la variable VPP sobre el RPP en los genotipos de frijol voluble Bola roja evaluados fueron 6,3 y 8,9 veces el efecto residual para las correlaciones fenotípica y genotípica, respectivamente, en tanto

que los efectos directos de la variable SPV sobre el RPP fueron 2,2 veces el efecto residual para la correlación fenotípica y 4,3 veces el efecto residual para la genotípica. En cuanto a la tercera variable causa evaluada en el modelo (PCS), sus efectos directos sobre el RPP fueron 1,6 veces el efecto residual para la correlación fenotípica y 3,4 veces el efecto residual para la genotípica.

Con lo anterior se confirma nuevamente que el orden de importancia para las variables causa es VPP, SPV y PCS sobre la variable efecto RPP del frijol voluble Bola roja; estos mismos resultados permiten inferir que con el análisis de sendero genotípico se mejora la precisión del modelo en la explicación de los efectos directos con relación a los efectos residuales para los caracteres VPP, SPV y PCS sobre el RPP, en comparación con el análisis de sendero fenotípico, por la influencia menor de los factores ambientales sobre la estimación de los efectos directos. En las correlaciones genéticas estos factores ambientales no se incluyen, maximizándose la determinación de los efectos directos reales de las variables explicativas sobre la variable compleja (Espitia *et al.*, 2005).

Frijol tipo Reventón

En la tabla 4 se muestran los resultados de los análisis de sendero fenotípico y genotípico con que se fraccionaron las correlaciones fenotípicas y genotípicas para el RPP en sus efectos directos (diagonal en negrillas) e indirectos (filas) para cuatro genotipos de frijol voluble tipo Reventón.

Al igual que para frijol voluble tipo Bola roja, el modelo tiene un excelente ajuste, tanto en las descomposición de las correlaciones fenotípicas ($R^2 = 0,99$) como en las genotípicas ($R^2 = 0,99$) para el RPP (variable compleja) en función de las variables causa VPP, SPV y PCS. Se pue-

Tabla 4. Análisis de sendero para el rendimiento por planta (RPP) en frijol Reventón, en función del número de vainas por planta (VPP), número de semillas por vaina (SPV) y peso de 100 semillas (PCS).

Variables	Correlaciones fenotípicas				Correlaciones genéticas			
	VPP	SPV	PCS	RPP	VPP	SPV	PCS	RPP
VPP	0,548	2,241	-2,085	0,704	2,369	-0,872	-0,791	0,706
SPV	-0,529	-2,319	2,345	-0,503	-2,307	0,895	0,893	-0,519
PCS	-0,465	-2,215	2,455	-0,225	-2,014	0,859	0,931	-0,224
$r^2 = 0,99$	$h = 0,019$				$r^2 = 0,99$	$h = 0,027$		

R^2 , coeficiente de determinación; h , efecto residual.

de observar en la tabla 4 que, tanto los coeficientes de determinación (R^2) como los efectos residuales (h) para cada uno de los dos modelos –fenotípico y genotípico– permitieron concluir que las variables causa evaluadas efectivamente sí explican el RPP en frijol voluble tipo Reventón. Los dos análisis de sendero indican la importancia de los componentes elementales del rendimiento en la explicación del rendimiento mismo por planta en frijol voluble Reventón.

Los resultados obtenidos en ambos modelos –fenotípico y genotípico– para las accesiones de frijol voluble tipo Reventón son similares al analizarse la relación existente entre los efectos directos y los indirectos en valor absoluto para la variable VPP, y diferentes para las variables SPV y PCS. Con excepción de la variable SPV en el análisis de sendero fenotípico, todos los demás efectos directos determinados en los dos análisis de sendero anteriores fueron positivos y son los que primordialmente explican el grado de asociación entre los tres caracteres VPP, SPV y PCS con el RPP del frijol voluble tipo Reventón.

Los efectos indirectos fueron negativos en los análisis de sendero fenotípico y genotípico para la variable PCS, cuando se analizó el efecto directo de VPP, y para la variable VPP, cuando se analizó el efecto directo de

Tabla 5. Principales caracteres evaluados en accesiones de frijol voluble Bola roja.

Accesión	Hab	RPP (g)	VPP (#)	SPV (#)	PCS (g)
100303158	IVa	77,8	19,1	5,9	70,9
100303160	IVa	78,2	17,1	6,0	82,8
100303161	IVb	66,4	16,1	5,8	80,1
100303164	IVb	86,0	22,0	5,1	83,7
100303165	IVa	55,9	12,1	5,9	81,7
100303166	IVa	70,1	16,2	5,9	80,7
100303198	IVa	82,3	19,3	5,5	79,0
Cabrera testigo	IVa	103,7	20,9	6,3	90,9
Promedio	---	77,6	17,8	5,8	81,2
Significancia entre accesiones	---	ns	ns	**	**
Cabrera vs resto	---	ns	ns	**	*
cv (%)	---	21,49	20,21	2,76	2,21
r^2	---	0,56	0,59	0,90	0,94

ns: no significativo.

*significativo ($\alpha = 0,05$).

**altamente significativo ($\alpha = 0,01$).

cv, coeficiente de variación; R^2 , coeficiente de determinación; Hab, hábito de crecimiento; RPP, rendimiento por planta; VPP, número de vainas por planta; SPV, número de semillas por vaina; PCS, peso de 100 semillas.

Tabla 6. Principales caracteres evaluados en accesiones de frijol voluble Reventón.

Accesión	Hab	PRV (%)	RPP (g)	VPP (#)	SPV (#)	PCS (g)
G12575	IVa	73,3	77,2	41,4	4,7	41,5
G12589	IVa	93,3	75,7	32,3	5,0	48,1
G23715	IVa	100,0	103,2	65,3	4,1	35,4
G23729 'pava testigo'	IVa	91,7	88,9	26,4	5,5	65,3
Promedio	---	89,6	86,3	41,4	4,8	47,6
Significancia entre accesiones	---	**	**	**	**	**
Pava vs. resto	---	ns	ns	**	**	**
cv (%)	---	6,77	4,32	5,54	1,72	2,16
r^2	---	0,84	0,95	0,99	0,98	0,99

ns: no significativo.

*significativo ($\alpha = 0,05$).

**altamente significativo ($\alpha = 0,01$).

cv, coeficiente de variación; R^2 , coeficiente de determinación; Hab, hábito de crecimiento; RPP, rendimiento por planta; VPP, número de vainas por planta; SPV, número de semillas por vaina; PCS, peso de 100 semillas.

PCS, confirmando así la asociación inversa entre VPP y PCS. También los efectos indirectos fueron negativos en el análisis de sendero genotípico para la variable VPP, cuando se analizó el efecto directo de SPV. Los mismos resultados se encuentran al observar el efecto indirecto negativo en el análisis de sendero genotípico para la variable SPV, cuando se analizó el efecto directo de la variable VPP; así se ratifica una relación inversa entre VPP y SPV, asociación que puede ser observada en la tabla 2.

La relación o cociente entre los efectos directos sobre los efectos indirectos encontrados en valor absoluto en el análisis de sendero fenotípico para los genotipos de frijol voluble Reventón fueron 3,51 para VPP, 1,28 para SPV y 0,92 para PCS. Para el análisis de sendero genotípico estos valores fueron 1,42 para VPP, 0,63 para SPV y 0,81 para PCS. Esta información indica que en los dos análisis de sendero hay diferencia para las variables SPV y PCS.

La variable VPP en ambos modelos presentó resultados similares, en comparación con las variables SPV y PCS. En el caso del análisis de sendero fenotípico, las variables en orden de importancia descendente en la explicación del RPP fueron, en segundo y tercer lugar respectivamente, SPV y PCS, mientras que en el análisis de sendero genotípico fueron PCS y SPV.

Esto representa efectos positivos de factores ambientales para la variable SPV, lo que sustenta la explicación del RPP en el análisis de sendero fenotípico. Sin embargo, es de resaltar que las relaciones de interés para el fitomejorador son las de tipo genético (Espitia, 2005), por

lo que el orden de importancia para la explicación del RPP en frijol voluble tipo Reventón se fundamenta, en proporción decreciente, en las variables VPP, PCS y SPV.

Los efectos directos de la variable VPP sobre el RPP en los genotipos de frijol voluble Reventón evaluados fueron 28,8 y 87,7 veces el efecto residual para las correlaciones fenotípica y genotípica, respectivamente, en tanto que los efectos directos de la variable SPV sobre el RPP fueron 122,1 veces el efecto residual para la correlación fenotípica y 33,2 veces el efecto residual para la genotípica. Para la variable causa PCS, sus efectos directos sobre el RPP fueron 129,2 veces el efecto residual para la correlación fenotípica y 34,5 veces el efecto residual para la genotípica.

En consecuencia, y teniendo en cuenta el análisis de sendero genotípico, que excluye los efectos ambientales y genéticos no aditivos, se confirma que el orden de importancia descendente para las variables causa es VPP, PCS y SPV, sobre la variable efecto RPP del frijol voluble Reventón. Información similar se encontró en la determinación de la relación entre efectos directos e indirectos para el modelo de RPP planteado en las mismas accesiones para el análisis de sendero genotípico.

Así, se puede inferir que con el análisis de sendero genotípico se mejora la precisión del modelo en la explicación de los efectos directos con relación a los efectos residuales para el carácter VPP sobre el RPP, en comparación al análisis de sendero fenotípico, por la influencia menor de los factores ambientales sobre la estimación de los efectos directos en las correlaciones genéticas (Espitia *et al.*, 2005).

Al analizar la variable VPP en los dos modelos, se observa que los factores ambientales tuvieron un efecto negativo en la correlación fenotípica, lo que enmascaró el verdadero efecto directo de esta variable sobre la determinación del RPP. Pero la correlación genotípica corrigió tal error y mostró la significancia real del carácter VPP sobre el RPP en frijol voluble tipo Reventón, mejorando así la determinación de los efectos directos reales de las variables explicativas sobre la variable compleja.

Conclusiones

El carácter vainas por planta tiene un valor alto en el desarrollo de nuevas variedades de frijol para el país y, por lo tanto, debe primar sobre el mejoramiento del número de semillas por vaina. También es de resaltar

el uso de las correlaciones genotípicas sobre las fenotípicas para el análisis de sendero, ya que en el análisis de sendero genotípico en ambos grupos de frijol evaluados se expresó la influencia de los componentes del rendimiento sobre la producción por planta.

La asociación entre el rendimiento y sus componentes se expresó mejor en el análisis de correlación genotípica, por eliminar los efectos de factores ambientales y genéticos no aditivos, maximizando la asociación real entre las variables evaluadas e indicando la importancia del empleo de las correlaciones genotípicas sobre las fenotípicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología 'Francisco José de Caldas' (Colciencias) por la financiación en la realización de este trabajo.

Literatura citada

- Aceros, O.P. y A.E. Pineda. 1997. Efecto de extractos vegetales sobre el crecimiento *in vitro* de *Colletotrichum lindemuthianum* y sobre la severidad de la antracnosis y los componentes de rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en dos regiones del departamento de Santander. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 62 p.
- Ceballos, H. 2003. Genética cuantitativa y fitomejoramiento. Documento escrito. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 524 p.
- Cerón, M. 1996. Caracterización morfoagronómica de 22 colectas de frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris* L.) para clima frío. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 147 p.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical [CIAT]. 1987. Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. Van Shonhoven, A. y M.A. Pastor (comps.). Cali, Colombia. 56 p.
- Corporación Colombia Internacional (CCI). 2001. Perfil del productor: frijol. En: www.cci.org.co/publicaciones; consulta: septiembre 2005.
- Cruz, C.D. y A.J. Regazzi. 1997. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Segunda edición. Editora UFV, Brasil. 390 p.
- Espitia, M., A. Vallejo y D. Baena. 2005. Análisis de sendero para el rendimiento por planta en zapallo (*Cucurbita moschata* Duch. Ex Poir). Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 18 p. (en proceso de publicación).
- Espitia, M. 2005. Correlaciones fenotípicas, genéticas, ambientales y análisis de sendero. Capítulo 8: Trabajo parcial de tesis de doctorado. Departamento de Agronomía y Desarrollo Rural, Universidad de Córdoba, Montería. 27 p. (en proceso de publicación).
- Falconer, D.S. y T. Mackay. 1996. Introduction to quantitative genetics. 4th edition. Prentice Hall. 464 p.
- Falconer, D.S. 1972. Introducción a la genética cuantitativa. Traducción: Fidel Márquez Sánchez. Tercera impresión. Oliver and Boyd Ltd., Edinburgh and London. 430 p.

- FAO. 2004. Faostat agricultural data. Agricultural production. En: www.fao.org; consulta: agosto 2005.
- 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*). Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 37 p.
- Hallauer, A.R. y J.B. Miranda. 1981. Quantitative genetics in maize breeding. Iowa State University Press, Ames. 468 p.
- Ligarreto, G.A. 2001. Variabilidad genética en germoplasma de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) determinada por características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y moleculares. Tesis de doctorado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- López, L. 2005. Evaluación de la tolerancia a sequía en genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo condiciones de invernadero. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Melo, I. 2005. Evaluación de características agronómicas y químicas de 20 accesiones de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo Reventón. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 32 p.
- Quevedo, E. 1998. Evaluación fisiológica y de la producción en tres genotipos de frijol arbustivo indeterminado en la Sabana de Bogotá. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 153 p.
- Ramos, F. 1981. Herencia de tres diferentes tipos de reacción a roya (*Uromyces phaseoli*) en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 54 p.
- Rojas, C. 1995. Efecto de la sequía en tres etapas de desarrollo sobre las características morfofisiológicas y componentes del rendimiento en dos genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) arbustivo tipo I y II. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 212 p.
- Singh, R.K. y B.D. Chaudhary. 1977. Biometrical methods in quantitative genetic analysis. Kallani Publishers, New Delhi. 304 p.
- Valderrama, S.Y. 1997. Evaluación de rendimiento y algunos parámetros fisiológicos en 26 líneas de frijol Caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) en la zona de vega del río Arauca. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 54 p.
- Vargas, C. 2001. Estudio de las necesidades de riego del cultivo de cebollín (*Allium schoenoprasum*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Vargas, G. 1993. Efecto de la densidad de la población en la plasticidad fenotípica de frijol arbustivo determinado (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 130 p.
- Vencovsky, R. y P. Barriga. 1992. Genética biométrica no fitomelhramento. Sociedad Brasileira de Genética. 496 p.