

RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS FENOTÍPICAS EN *Coffea arabica* L.

Carlos Andrés Unigarro Muñoz*, Rubén Darío Medina Rivera**, Claudia Patricia Flórez Ramos**

UNIGARRO M., C.A.; MEDINAR., R.D.; FLÓREZ R., C.P. Relación entre producción y las características fenotípicas en *Coffea arabica* L. Revista Cenicafé 68 (1): 62-72. 2017

En cultivos perennes, como café, desarrollar una variedad comercial requiere de 20 a 25 años, motivo por el cual, el estudio de las relaciones entre producción y las características fenotípicas facilita los procesos de selección y avance generacional dentro del programa de mejoramiento genético. La correlación existente entre dos variables no implica necesariamente una relación causal, porque su efecto puede ser indirecto al depender de otras variables. La causalidad puede evaluarse mediante el análisis de sendero, al determinar los efectos de una correlación. En el presente estudio se determinó la relación y el efecto de algunas características fenotípicas con la producción de café cereza, durante el primer período productivo del cultivo. En la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé (Chinchiná-Caldas-Colombia), se evaluó la asociación entre siete características fenotípicas y la producción de café cereza en 18 genotipos *C. arabica*. Las relaciones se analizaron mediante correlaciones genéticas, mientras que los efectos directos e indirectos se determinaron con el análisis de sendero. Los resultados mostraron que la cantidad de flores y el área foliar tienen una asociación directa y alta con la producción de café cereza por árbol, la cual se corroboró al evaluar los efectos directos con el análisis de sendero. La altura presentó una relación inversa y baja con la producción, con efecto directo. El número de nudos con flores y el peso promedio de un fruto presentaron un efecto indirecto sobre la producción. Estos resultados validan observaciones previas y confirman la importancia del área foliar como componente de producción.

Palabras clave: Café, área foliar, flores, correlación, análisis de sendero.

RELATION BETWEEN PRODUCTION AND PHENOTYPICAL CHARACTERISTICS IN *Coffea arabica* L.

In perennial crops, such as coffee, the development of a commercial variety requires 20 to 25 years, which is why, the study of the relations between production and phenotypic characteristics facilitates selection processes and generational progress within the genetic improvement program. The correlation between two variables does not necessarily imply a causal relation because its effect may be indirect depending on other variables. Causality can be assessed using path analysis by determining the effects of a correlation. In this study, the relation and effect of some phenotypic characteristics with the production of cherry coffee during the first productive period of the crop was determined. The association between seven phenotypic characteristics and the production of cherry coffee in 18 *C. arabica* genotypes was evaluated at the Naranjal Experiment Station of Cenicafé (Chinchiná-Caldas, Colombia). The relations were analyzed by genetic correlations, while the direct and indirect effects were determined using path analysis. The results showed that the number of flowers and the leaf area had a direct and high association with the production of cherry coffee per tree, which was corroborated by evaluating the direct effects using path analysis. The height had an inverse and low relation with production, with direct effect. The number of nodes with flowers and the average weight of a cherry had an indirect effect on production. These results validate previous observations and confirm the importance of leaf area as a production component.

Keywords: Coffee, leaf area, flowers, correlation, path analysis.

* Asistente de Investigación. Disciplina de Fisiología Vegetal. Cenicafé

** Investigador Científico II y III. Disciplina de Biometría y Mejoramiento Genético, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia

El desarrollo de variedades comerciales de café en Colombia se enfoca en la obtención de materiales altamente productivos, resistentes a la roya y con altos estándares de calidad física del grano y sensorial de la bebida (1, 40, 42). En cultivos perennes, como el cafeto, el desarrollo de una variedad con estas características toma de 20 a 25 años, motivo por el cual, el estudio de las relaciones entre la producción y las características fenotípicas resulta útil para facilitar los procesos de selección y avance generacional dentro del programa de mejoramiento genético (27). Arcila (2), señala que las variables número de ramas, área de proyección de la copa, índice de ocupación, interceptación de radiación y altura del árbol son componentes de la productividad del café. De acuerdo con Carvalho *et al.* (10), las características que presentan mayor correlación fenotípica con la productividad son el diámetro del tallo, el número de ramas plagiotrópicas, la altura de la planta y el largo de las ramas plagiotrópicas. Para dilucidar las relaciones entre la producción y los caracteres fenotípicos, fisiológicos y agronómicos de *Coffea arabica* L., previamente se han utilizado las correlaciones genéticas y fenotípicas, así como el análisis de los coeficientes de sendero (6, 10, 13, 21, 28, 40, 41, 43).

La correlación mide la asociación lineal entre dos variables (26). En este contexto, la correlación fenotípica estima directamente los valores medios fenotípicos, los cuales son el resultado de las causas genéticas y ambientales. En cambio, la correlación genotípica entre dos características se explica a través de dos tipos de interacción genética: pleiotropía y ligamiento (11, 45). A pesar de su importancia, los coeficientes de correlación (cualquiera que sea su naturaleza) no indican necesariamente relaciones de causa y efecto entre dos variables. Esto puede traer como consecuencia, una equivocada interpretación

directa de sus magnitudes, puesto que una alta correlación entre dos caracteres puede ser resultado directo de una tercera variable o de un grupo de éstas (45, 51).

Wright (51) desarrolló el análisis de sendero como método estadístico para evaluar los efectos directos e indirectos de los caracteres sobre una variable principal o básica. Este tipo de análisis busca discernir las vías de influencia en un conjunto de variables, con el fin de establecer cuando una correlación implica causalidad (16, 51). Los coeficientes de sendero son obtenidos por medio de ecuaciones de regresión, en las que las variables son previamente estandarizadas (14); esto con el fin de identificar, dentro de las características de alta correlación con la variable básica (que para este caso es la producción), aquellas de mayor efecto directo en sentido favorable a la selección de la variable básica (40). Aunque la correlación sea una característica intrínseca a dos caracteres bajo una condición experimental, su descomposición depende del conjunto de caracteres estudiados, que normalmente son evaluados por el conocimiento previo de su importancia y de posibles interrelaciones expresadas en el análisis de sendero (14). La finalidad del análisis es determinar relaciones causales y no causales de correlaciones observadas.

En concordancia, el objetivo del presente estudio fue determinar la relación y el efecto de algunas características fenotípicas sobre la producción de café cereza, en diferentes genotipos de *C. arabica* L. durante el primer período de cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná, departamento

de Caldas – Colombia (04°58' N - 75°39' O), con una altitud de 1.381 m, promedio de precipitación anual de 2.795 mm, temperatura media anual de 20,9°C y humedad relativa de 76,9% (19). Las evaluaciones se realizaron sobre 18 genotipos de *C. arabica* de la Colección Colombiana de Café. Se incluyeron materiales catalogados como diversos genéticamente (12, 31), así como algunas líneas avanzadas del Programa de Mejoramiento de Cenicafe (Tabla 1). Se establecieron dos lotes experimentales de acuerdo con el porte de las plantas (Lote 1: porte alto y Lote 2: porte bajo). En cada lote, se evaluaron 15 unidades experimentales (árboles) por genotipo, bajo un diseño experimental completamente aleatorizado. De acuerdo con el porte de los genotipos en el Lote 1 la distancia de siembra fue de 2 m entre surcos y 2 m entre plantas, mientras que en el Lote 2 la distancia fue de 2 m entre surcos y 1 m entre plantas.

Las características fenotípicas evaluadas fueron: 1. Número de nudos con flores en las ramas plagiotrópicas; 2. Número de flores en las ramas plagiotrópicas; 3. Promedio del peso de un fruto (g); 4. Área foliar (m²); 5. Altura del árbol (cm); 6. Número de nudos ortotrópicos en el tallo o cruces; 7. Diámetro del tallo a 5 cm del suelo (cm); 8. Producción de

café cereza por árbol (kg). Estas variables se registraron cada 45 días, para cada unidad experimental (árbol), entre los 2,5 y 3,5 años de edad (primer período de cosecha). La variable número de flores se registró de acuerdo con la metodología establecida por Rendón *et al.* (37). El área foliar por hoja se estimó con base en la medición de su nervadura central mediante el modelo alométrico (Ecuación <1>) de Valencia (44). Para estimar el área foliar del árbol se acumularon los datos de todas las hojas presentes en la cuarta parte de las ramas presentes en el árbol y se multiplicó por cuatro.

$$\text{Área foliar (cm}^2\text{)} = 0,563983 \times \text{Longitud nervadura (cm)}^{2,02501} <1>$$

La producción de café cereza correspondió a la primera cosecha principal del ciclo productivo del cafetal. La relación entre todas las características evaluadas se analizó mediante los coeficientes de correlación genética (r_g) usando las fórmulas descritas por Falconer (17) en la Ecuación <2>, debido a que con las correlaciones de Pearson se incluyen factores tanto de naturaleza genética como ambiental (47). Con valores entre -1,00 y +1,00 el coeficiente indica el grado de relación

Tabla 1. Porte y origen de los genotipos de *C. arabica* evaluados.

Porte	Alto		Bajo		
	Origen	Etiopía	Yemen	Brasil	Colombia
Genotipo		E143	Típica	Caturra Rojo	ACL137
		E177			ACL221
		E403			ACL403
		E405			BH1247
		E577			CU1812
		ET26			CU1850
		ET42			CX2848
		ET56			NR287

lineal entre dos variables, mientras que el signo indica si la relación es directa al ser positivo o inversa la ser negativo. La magnitud del coeficiente de correlación se interpretó mediante el criterio de Hinkle *et al.* (23) (Tabla 2).

$$r_{g12} = \sigma_{g12} / \sqrt{(\sigma_{g1}) (\sigma_{ph2})} \quad <2>$$

Dónde: σ_{g12} corresponde a la covarianza genética de las dos variables, σ_{g1} es la varianza genética de la primera variable y σ_{g2} es la varianza genética de la segunda variable.

Tabla 2. Criterios para evaluar el coeficiente de correlación de acuerdo con Hinkle *et al.* (23).

Tamaño de la correlación	Interpretación
0,90 a 1,00 (-0,90 a -1,00)	Correlación positiva (negativa) muy alta
0,70 a 0,90 (-0,70 a -0,90)	Correlación positiva (negativa) alta
0,50 a 0,70 (-0,50 a -0,70)	Correlación positiva (negativa) moderada
0,30 a 0,50 (-0,30 a -0,50)	Correlación positiva (negativa) baja
0,00 a 0,30 (0,00 a -0,30)	Poca si existe la correlación o no lineal

En la presente investigación la producción de café cereza fue la variable básica, sobre la cual se realizó el análisis de sendero frente a las características fenotípicas conforme se presenta en la Figura 1.

La relación entre los coeficientes de correlación y los coeficientes de sendero se estableció usando el siguiente modelo

estadístico organizado en la notación matricial (Ecuaciones <3> y <4>):

$$R_{(n^*1)} = A_{(n^*n)} * P_{(n^*1)} \quad <3>$$

$$P_{(n^*1)} = A^{-1}_{(n^*n)} * R_{(n^*1)} \quad <4>$$

Dónde: $R_{(n^*1)}$ = matriz de correlaciones entre las n variables independientes (X) con la variable dependiente (Y); $A_{(n^*n)}$ = matriz de correlaciones entre variables independientes (X); $P_{(n^*1)}$ = matriz de efectos directos de las n variables independientes (X); $A^{-1}_{(n^*n)}$ = matriz inversa de correlaciones entre variables independientes (X).

Las correlaciones genéticas y las pruebas de t se determinaron mediante los procedimientos PROC VARCOMP y PROC TTEST del software SAS versión 9.3, respectivamente (39). Para el análisis de sendero se utilizó el paquete “agricolae” (30) bajo la plataforma del software R (34).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las correlaciones genéticas (r_g) entre las variables evaluadas se muestran en la Tabla 3. El número de flores y la producción de café presentaron una relación directa y muy alta, la cual se explica al considerar que la cantidad de flores determina en gran medida la magnitud probable de frutos al final de la fase reproductiva del cafeto (9, 36). Por su parte, el área foliar tiene una relación directa y de carácter alto con las variables número de nudos con flores, número de flores y producción de café. De acuerdo con Favarin *et al.* (18), el área foliar es un indicador de productividad cuando se expresa por unidad de superficie, dada su influencia sobre procesos como: el crecimiento vegetativo, la tasa de desarrollo, la eficiencia fotosintética y la evapotranspiración, así como en el uso de nutrientes y agua (1,

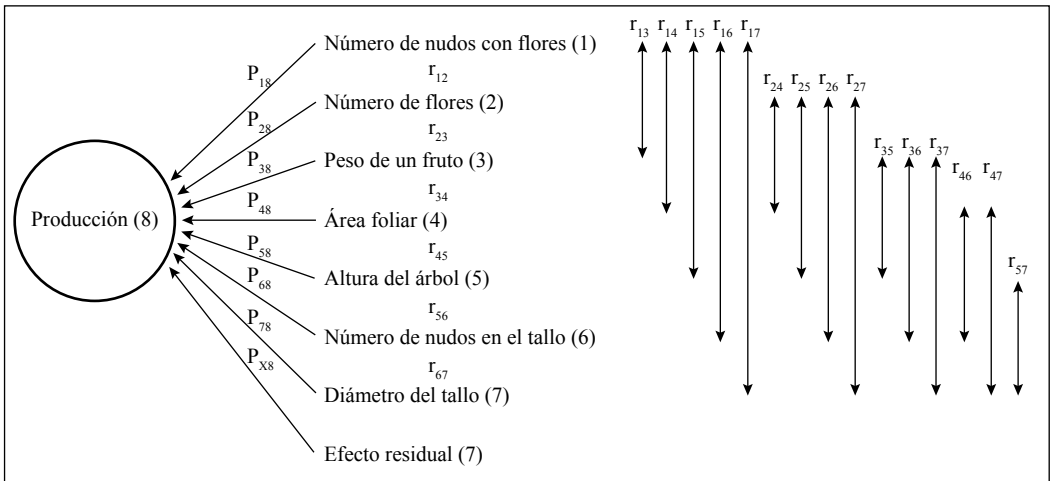


Figura 1. Diagrama de los coeficientes de sendero indicando las vías de influencia de siete características fenotípicas sobre la producción de café cereza, para 18 genotipos de *C. arabica*.

4, 20, 22, 49, 50). Adicionalmente, el área foliar brinda protección a yemas, flores y frutos, de condiciones climáticas adversas como el granizo y el exceso de radiación, entre otros (3).

Correlaciones clasificadas como moderadas y directas se observaron entre las siguientes variables: número de flores y número de nudos con flores, número de nudos en el tallo y número de nudos con flores, producción de café y número de nudos con flores, peso de un fruto y número de flores, área foliar y peso de un fruto, además de producción de café y peso de un fruto (Tabla 3). El número de nudos en el tallo se asocia con la capacidad productiva del genotipo, porque en conjunto con el número de nudos por rama, son componentes del rendimiento (29). Para Bonomo *et al.* (5) el número de nudos en las ramas está asociado con la cantidad de yemas productivas. Marandu *et al.* (27), encontraron una correlación positiva y moderada entre el número de flores por nudo, con la producción de café en clones de *Coffea canephora*. Kitila *et al.* (24) en *C.*

arabica observaron una correlación positiva y moderada, entre la producción y el peso de los frutos.

En contraste, las variables número de nudos con flores, número de flores y área foliar presentaron relaciones inversas y altas con la altura del árbol (Tabla 3). Para la producción de café esta relación fue inversa pero moderada (Tabla 3). Nacif (32), encontró que la producción de café presentó una correlación negativa con la altura de la planta, en diferentes densidades a partir de los 2,5 años, debido a la competencia entre las dos variables vegetativas por la partición de los carbohidratos en *C. arabica* cv. Catuaí. Sin embargo, autores como Carvalho *et al.* (10), Martínez *et al.* (28), Teixeira *et al.* (43), Srinivasan (41) y Walyaro y Van der Vossen (48) reportan correlaciones positivas y significativas entre la altura de la planta con la producción de frutos en *C. arabica* y *C. canephora*.

El diámetro del tallo mostró una correlación baja y positiva con la producción.

Carvalho *et al.* (10), Nacif (32) y Rodrigues *et al.* (38) también reportan correlaciones positivas y bajas, entre estas variables. Entre las demás variables se registraron correlaciones bajas y, en algunos casos, no llegaron a ser estadísticamente significativas (Tabla 3).

En la Tabla 4, se presenta el análisis de sendero con los efectos directos e indirectos de las características fenotípicas evaluadas sobre la producción de café cereza. La correlación entre el número de flores y la producción de café cereza fue predominantemente atribuida a la influencia de efecto directo del número de flores sobre la producción (Tabla 4). De igual forma, la correlación genética entre el área foliar y la producción fue determinada por su correspondiente efecto directo (Tabla 4). El peso de un fruto como determinante de la producción de café cereza es importante, dada la correlación entre estas características, sin embargo, la causa de esta relación de acuerdo con el

análisis de sendero es indirecta, porque ocurre a través de las variables número de flores y área foliar (Tabla 4).

De acuerdo con lo anterior, las dos variables de mayor peso sobre la producción durante el primer período de cosecha son el número de flores y el área foliar, porque inciden conjuntamente sobre el desarrollo y tamaño del fruto (33, 35). Según Anim-Kwapong *et al.* (1) al disminuir el área foliar se reduciría consecuentemente la tasa de asimilación de carbono, con lo cual se afectaría directamente el rendimiento de los cultivos. En *C. arabica*, de acuerdo con Cannell (8) y Vasudeva y Ratageri (46) se requieren cerca de 20 cm² de área foliar para soportar el llenado de cada fruto. De acuerdo con Cannell (7) y Kumar (25) cambios en el peso de frutos, los granos y la relación peso de granos a frutos no son los principales determinantes para la producción de café bajo condiciones normales; pero una severa defoliación sí puede causar una reducción en estas características (15).

Tabla 3. Coeficientes de correlación genética (r_g) entre ocho características agronómicas evaluadas en 18 genotipos de *C. arabica*.

Variables	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Número de nudos con flores en las ramas plagiotrópicas (#)	-							
2. Número de flores en las ramas plagiotrópicas (#)	0,56 **	-						
3. Peso promedio de un fruto (g)	0,20 **	0,59 **	-					
4. Área foliar (m ² /árbol)	0,80 **	0,80 **	0,65 **	-				
5. Altura del árbol (cm)	-0,81 **	-0,64 **	-0,10 ns	-0,60 **	-			
6. Número de nudos en el tallo (#)	0,68 **	0,34 **	0,08 ns	0,48 **	-0,21 **	-		
7. Diámetro del tallo (cm)	0,08 ns	0,25 **	0,31 **	0,46 **	-0,05 ns	-0,11 ns	-	
8. Producción de café cereza árbol (kg)	0,52 **	0,91 **	0,61 **	0,79 **	-0,51 **	0,33 **	0,40 **	-

** Significativos a P=0,01; ns estadísticamente no significativos.

Tabla 4. Análisis de los coeficientes de sendero (efectos directos e indirectos) de siete características agronómicas sobre la producción de café cereza, en 18 genotipos de *C. arabica*.

Variable	Efecto	Sendero	Valor
	Total (correlación genética r_{18})		0,52**
1	Directo vía número de nudos con flores (1)	P_{18}	-0,71
	Indirecto vía número de flores (2)	$P_{28}r_{12}$	0,28
	Indirecto vía peso de un fruto (3)	$P_{38}r_{13}$	0,02
	Indirecto vía área foliar (4)	$P_{48}r_{14}$	0,34
	Indirecto vía altura del árbol (5)	$P_{58}r_{15}$	0,34
	Indirecto vía número de nudos en el tallo (6)	$P_{68}r_{16}$	0,26
	Indirecto vía diámetro del tallo (7)	$P_{78}r_{17}$	0,01
	Total (correlación genética r_{28})		0,91**
2	Directo vía número de flores (2)	P_{28}	0,49
	Indirecto vía número de nudos con flores (1)	$P_{18}r_{12}$	-0,40
	Indirecto vía peso de un fruto (3)	$P_{38}r_{23}$	0,05
	Indirecto vía área foliar (4)	$P_{48}r_{24}$	0,34
	Indirecto vía altura del árbol (5)	$P_{58}r_{25}$	0,27
	Indirecto vía número de nudos en el tallo (6)	$P_{68}r_{26}$	0,13
	Indirecto vía diámetro del tallo (7)	$P_{78}r_{27}$	0,03
	Total (correlación genética r_{38})		0,61**
3	Directo vía peso de un fruto (3)	P_{38}	0,08
	Indirecto vía número de nudos con flores (1)	$P_{18}r_{13}$	-0,15
	Indirecto vía número de flores (2)	$P_{28}r_{23}$	0,29
	Indirecto vía área foliar (4)	$P_{48}r_{34}$	0,28
	Indirecto vía altura del árbol (5)	$P_{58}r_{35}$	0,04
	Indirecto vía número de nudos en el tallo (6)	$P_{68}r_{36}$	0,03
	Indirecto vía diámetro del tallo (7)	$P_{78}r_{37}$	0,04
	Total (correlación genética r_{48})		0,79**
4	Directo vía área foliar (4)	P_{48}	0,43
	Indirecto vía número de nudos con flores (1)	$P_{18}r_{14}$	-0,57
	Indirecto vía número de flores (2)	$P_{28}r_{24}$	0,39
	Indirecto vía peso de un fruto (3)	$P_{38}r_{34}$	0,05
	Indirecto vía altura del árbol (5)	$P_{58}r_{45}$	0,25
	Indirecto vía número de nudos en el tallo (6)	$P_{68}r_{46}$	0,18
	Indirecto vía diámetro del tallo (7)	$P_{78}r_{47}$	0,06
	Total (correlación genética r_{58})		-0,51**
5	Directo vía altura del árbol (5)	P_{58}	-0,58
	Indirecto vía número de nudos con flores (1)	$P_{18}r_{15}$	0,42
	Indirecto vía número de flores (2)	$P_{28}r_{25}$	-0,32
	Indirecto vía peso de un fruto (3)	$P_{38}r_{35}$	-0,01
	Indirecto vía área foliar (4)	$P_{48}r_{45}$	-0,26
	Indirecto vía número de nudos en el tallo (6)	$P_{68}r_{56}$	-0,08
	Indirecto vía diámetro del tallo (7)	$P_{78}r_{57}$	-0,01

Continúa...

...continuación.

Variable	Efecto	Sendero	Valor
Total (correlación genética r_{68})			0,33**
6	Directo vía número de nudos en el tallo (6)	P_{68}	0,37
	Indirecto vía número de nudos con flores (1)	$P_{18}r_{16}$	-0,49
	Indirecto vía número de flores (2)	$P_{28}r_{26}$	0,17
	Indirecto vía peso de un fruto (3)	$P_{38}r_{36}$	0,01
	Indirecto vía área foliar (4)	$P_{48}r_{46}$	0,20
	Indirecto vía altura del árbol (5)	$P_{58}r_{56}$	0,09
	Indirecto vía diámetro del tallo (7)	$P_{78}r_{67}$	-0,02
Total (correlación genética r_{78})			0,40**
7	Directo vía diámetro del tallo (7)	P_{78}	0,14
	Indirecto vía número de nudos con flores (1)	$P_{18}r_{17}$	-0,06
	Indirecto vía número de flores (2)	$P_{28}r_{27}$	0,12
	Indirecto vía peso de un fruto (3)	$P_{38}r_{37}$	0,02
	Indirecto vía área foliar (4)	$P_{48}r_{47}$	0,20
	Indirecto vía altura del árbol (5)	$P_{58}r_{57}$	0,02
	Indirecto vía número de nudos en el tallo (6)	$P_{68}r_{67}$	-0,04

Efecto residual (PX_8)=0,391; Coeficiente de determinación (R^2)=0,85; **: significativos en la prueba de *t* al 1% de significancia.

El efecto indirecto vía área foliar explicó predominantemente la correlación positiva entre el diámetro del tallo y la producción (Tabla 4). Kitila *et al.* (24) encontraron una asociación positiva y significativa entre el área foliar y el diámetro del tallo, aunque de carácter bajo. Por su parte, la baja correlación genética entre el número de nudos en el tallo con la producción se dio por el efecto indirecto vía número de nudos con flores (Tabla 4). La correlación entre la altura de la planta con la producción fue negativa y responde al efecto directo de la altura sobre la producción (Tabla 4). Esta respuesta se debe a que los genotipos de mayor altura o porte alto presentaron una menor producción, área foliar y número de flores en relación con aquellos de menor altura o porte bajo, durante la primera cosecha (Tabla 5). Severino *et al.* (40), encontraron una correlación genotípica negativa y baja entre la producción de café cereza y la altura de la planta en *C. arabica* cv. Catimor.

Tabla 5. Prueba de *t* para genotipos de café de portes alto y bajo, para cuatro características fenotípicas y la producción de café cereza, en *C. arabica*.

Porte	Media	LI	LS	Pr > t
Altura del árbol (cm)				
Alto	207,1	203,3	211	**
Bajo	179,4	177,1	181,7	
Área foliar (cm²)				
Alto	1.504,6	1.391,9	1.617,4	
Bajo	3.675,6	3.503,6	3.847,6	**
Número de flores (número)				
Alto	303,6	280,7	326,6	
Bajo	488,6	457,8	519,3	**
Producción (g)				
Alto	1.050,4	934,8	1.166,0	
Bajo	1.793,5	1.657,6	1.929,4	**

LI y LS: Límites inferior y superior para el intervalo con un coeficiente de confianza del 95%; ** significativos en la prueba de *t* al 1% de significancia.

La correlación genotípica entre el número de nudos con flores y la producción fue positiva y moderada. No obstante, el efecto directo de ésta fue negativo, lo cual indica una ausencia de causa y efecto entre estas dos características, puesto que tal correlación fue predominantemente influenciada por el efecto indirecto de las variables área foliar y altura del árbol (Tabla 4). De acuerdo con Cruz y Regazzi (14), las características que presentan una alta correlación con la variable básica, pero tienen un efecto directo de signo contrario en el análisis de sendero, resultan no ser determinantes para la variable básica, porque existen otras características que la explican mejor, aunque de manera indirecta. El coeficiente de determinación del análisis de sendero muestra que las variaciones en la variable básica fueron explicadas en un 85% por el arreglo causal propuesto (Tabla 4).

Los resultados permiten concluir que la producción de café cereza durante el primer período del ciclo productivo se asocia predominantemente con el número de flores y área foliar, debido a la alta correlación y al efecto directo encontrado entre estas variables. Características como el número de nudos con flores y el promedio del peso de un fruto, aun cuando están correlacionadas con la producción, dependen prevalentemente de los efectos indirectos vía área foliar y/o del número de flores. La altura del árbol presentó una correlación inversa y baja con la producción, pero su efecto fue directo. El diámetro del tallo y el número de nudos en el tallo presentaron una asociación baja e indirecta con la producción. Sin embargo, es necesario a futuro validar si las correlaciones encontradas se mantienen durante un ciclo reproductivo completo del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). Los autores agradecen al señor Mario Franco Arcila y al personal de apoyo de la Estación Experimental Naranjal por su valiosa colaboración.

LITERATURA CITADA

1. ANIMK., E.; ANIMK., G.J.; ADOMAKO, B. Variation and association among characters genetically related to yield and yield stability in coffee *Canephora* genotypes. *Journal of plant breeding and crop science* 3(12):311-320. 2011.
2. ARCILAP., J. Aspectos fisiológicos de la producción de café *coffea Arabica* L. p. 59-111. En: CENICAFÉ. Tecnología del cultivo del café. Manizales : CENICAFE : Comité departamental de cafeteros de Caldas, 1987. 404 p.
3. ARCILA P., J. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. p. 1-34. En: ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2007. 309 p.
4. BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. *Scientia agricola* 62(4):305-309. 2005.
5. BONOMO, P.; CRUZ, C.D.; VIANA, J.M.S.; PEREIRA, A.A.; OLIVEIRA, V.R. DE; CARNEIRO, P.C.S. Avaliação de progenies obtidas de cruzamentos de descendentes do híbrido de Timor com as cultivares Catuai vermelho e Catuai amarelo. *Bragantia* 63(2):207-219. 2004.
6. CANNELL, M.G.R. Components of fruit yield: Animal report 1970/71. Kenya : Coffee research foundation, 1971.
7. CANNELL, M.G.R. Effects of irrigation, mulch and N fertilisers on yield components of Arabica coffee in Kenya. *Experimental agriculture* 9(3):225-232. 1973.
8. CANNELL, M.G.R. Factors affecting Arabica coffee bean size in Kenya. *Journal of horticultural science* 49(1):65-76. 1974.

9. CAMAYO V., G.C.; CHAVES C., B.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. Desarrollo floral del café y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 54(1):35-49. 2003.
10. CARVALHO, A.; SCARANARI, H.J.; ANTUNES F., H.; MONACO, L.C. Melhoramento do caféiro XXII: Resultados obtidos no ensaio de seleções regionais de Campinas. *Bragantia* 20(30):711-740. 1961.
11. CARVALHO, A.M. DE; MENDES, A.N.G.; CARVALHO, G.R.; BOTELHO, C.E.; GONÇALVES, F.M.A.; FERREIRA, A.D. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. *Pesquisa agropecuária brasileira* 45(3):269-275. 2010.
12. CASTILLO Z., J.; MORENO R., L.G. La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del café. Chinchiná : Cenicafé, 1987. 169 p.
13. CEBALLOS, H. Genética cuantitativa y fitomejoramiento. Palmira : Universidad nacional de Colombia, 2003. 524 p.
14. CHAPARRO B., A.P., CRISTANCHO A., M.A., CORTINA G., H.A.; GAITÁN B., A.L. Genetic variability of *Coffea arabica* L. accessions from Ethiopia evaluated with RAPDs. *Genetic resources and crop evolution* 51(3):291-297. 2004.
15. CILAS, C.; BOUHAMONT, P.; BOCCARA, M.; ESKES, A.B.; BARADAT, P. Prediction of genetic value for coffee production in *Coffea arabica* from a half diallel with lines and hybrids. *Euphytica* 104(1):49-52. 1998.
16. CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2da ed. Viçosa : UFV, 1997. 390 p.
17. DAMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian journal of plant physiology* 19(4):485-510. 2007.
18. DEWEY, D.R.; LU, L.H. A correlation and path analysis of components of crested wheat grass seed production. *Agronomy journal* 51:515-518. 1959.
19. FALCONER, D.S.D.S. Introducción a la genética cuantitativa. México : Continental, 1986. 383 p.
20. FAVARIN, J.L.; NETO, D.D.; GARCÍA, A.G.; VILLA N., N.A.; FAVARIN, M.G.G.V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do caféiro. *Pesquisa agropecuária brasileira* 37(6):769-773. 2002.
21. FNC. CENICAFÉ. Consulta red meteorológica cafetera. Manizales : FNC, 2015.
22. FILHO, J.F.; BELTRÃO N.; PEREIRA, A. Desenvolvimento de uma régua para medidas de área foliar do algodoeiro. *Revista brasileira engenharia agrícola e ambiental* 14(7):736-741. 2010.
23. FREITAS, Z.M.T.S. DE; OLIVEIRA, F.J. DE; CARVALHO, S.P. DE; SANTOS, V.F. DOS; SANTOS, J.P.O. Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café arábica de porte baixo. *Bragantia* 66(2):267-275. 2007.
24. GOUDRIAAN, J.; VAN L., H.H. Modeling potential crop growth processes. Dordrecht : Kluwer academic, 1994. 238 p.
25. HINKLE, D.E.; WIERSMA, W.; JURTS, S.G. Applied statistics for the behavioral sciences. 5ta. ed. Massachusetts : Houghton Mifflin, 2003. 792 p.
26. HUXLEY, P.A.; ISMAIL, S.A.H. Floral atrophy and fruit set in Arabica coffee in Kenya. *Turrialba* 19(3):345-354. 1969.
27. KITILA, O.; ALAMEREW, S.; KUFA, T.; GAREDEW, W. Variability of quantitative traits in limmu coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. *International journal of agricultural research*. 6(6):482-493. 2011.
28. KUMAR, D. Investigation into some physiological aspects of high density plantings of coffee (*Coffea arabica* L.). *Kenya coffee* 43(510):263-272. 1978.
29. LI, C.C. Path analysis: A primer. 3ra. ed. California : The boxwood, 1981. 347 p.
30. MARANDU, E.F.T.; REUBEN, S.O.W.M.; MISANGU, R.N. Genotypic correlations and path of influence among components of yield in selected Robusta coffee (*Coffea canephora* L.) clones. *West african journal of applied ecology* 5(1):11-20. 2004.
31. MARTÍNEZ, H.E.P.; CRUZ, C.D.; AUGUSTO, H.S.; SAMPAIO, N.F.; PEDROSA, A.W. Crescimento vegetativo de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) e sua correlação com a produção em espaçamentos adensados: *Acta scientiarum. Agronomy* 29(4):481-489. 2007.
32. MEJÍA, J.W.; CARTAGENA, J.R.; RIAÑO, N.M. Morphometric and productive characterization of nineteen genotypes from the colombian coffee collection. *Revista facultad nacional de agronomía Medellín* 66(2):7021-7034. 2013.
33. MENDIBURU, F. Statistical procedures for agricultural research: R package versión 1.2-4. [En línea].

- Disponble en internet: <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu>. Consultado en 2016.
34. MONCADA, M.P.; MCCOUCH, S. Simple sequence repeat diversity in diploid and tetraploid coffee species. *Genome* 47(3):501-509. 2004.
 35. NACIF, A.P. Fenologia e produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Catuai, sob diferentes densidades de plantio e doses de fertilizantes no cerrado de Patrocínio-MG. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 1997. Tesis: Doctor en Fitotecnía.
 36. PHILIPS, A.L. Effect of leaf loss during harvest on subsequent yield of coffee. *Journal of agriculture of the university of Puerto Rico* 54(3):503-507. 1970.
 37. R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna : R foundation for statistical computing, 2013.
 38. RAJU, K.S.; SRINIVASAN, C.S.; VISHVESHWARA, S. Vegetative floral balance in coffee: Effect of thinning of blossom on set and bean size. *Indian coffee* 39(7/8):217-219. 1975.
 39. RAMÍREZ B., V.H.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; RENDÓN S., J.R.; CUESTAG., G.; MENZAF., H.D.; MEJÍA M., C.G.; MONTOYA, D.F.; MEJÍA M., J.W.; TORRES N., J.C.; SÁNCHEZ A., P.M.; BAUTE B., J.E.; PEÑA Q., A.J. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé* 61(2):132-158. 2010.
 40. RENDÓN S., J.R.; ARCILAP., J.; MONTOYAR., E.C. Estimación de la producción de café con base en los registros de floración. *Cenicafé* 59(3):238-259. 2008.
 41. RODRIGUES, W.P.; VIEIRA, H.D.; BARBOSA, D.H.S.G.; VITTORAZZI, C. Growth and yield of *Coffea arabica* L. in northwest Fluminense: 2nd harvest. *Ceres* 59(6):809-815. 2012.
 42. SAS INSTITUTE. The SAS system for Windows: Release 9.3. North Carolina : SAS Institute, 2010.
 43. SEVERINO, L.S.; SAKIYAMA, N.S.; PEREIRA, A.A.; MIRANDA, G.V.; ZAMBOLIM, L.; BARROS, U.V. Associações da produtividade com outras características agrônômicas de café (*coffea Arabica* L. "Catimor"). *Acta scientiarum agronomy* 24(5):1467-1471. 2002.
 44. SRINIVASAN, C.S. Correlation studies in coffee: Preliminary studies on correlation between stem girth and ripe cherry yield in some coffee selections. *Indian coffee* 33(10):318-319. 1969.
 45. SRINIVASAN, C.S. Pre-selection for yield in coffee. *Indian journal of genetics* 42(1):15-19. 1982.
 46. SURESHKUMAR, V.B.; NIKHILA, K.R.; PRAKASH, N.S.; MOHANAN, K.V. Interrelationship and association of characters in Robusta coffee (*Coffea canephora* var. Robusta). *Agriculture, forestry and fisheries* 2(2):98-104. 2013.
 47. TEIXEIRA, A.L.; GONÇALVES, F.M.A.; REZENDE, J.C. DE; CARVALHO, S.P. DE; PEREIRA, A.A.; MORAES, B.F.X. DE; TEIXEIRA, L.G.V. Seleção precoce para produção de grãos em café arábica pela avaliação de caracteres morfológicos. *Pesquisa agropecuária brasileira* 47(8):1110-1117. 2012.
 48. VALENCIA, A. Relación entre el índice de área foliar y la productividad del cafeto. *Cenicafé* 24(4):79-89. 1973.
 49. VALENCIA, R.A.; LIGARRETO, G.A. Correlación fenotípica y análisis de sendero para el rendimiento de soya (*Glycine max* L.) Merrill). *Acta agrónomica* 61(4):353-362. 2012.
 50. VASUDEVA, N.; RATAGERI, M.C. Studies on leaf to crop ratio in two comercial species of coffee grown in India. *Journal of coffee research* 11(4):129-136. 1981.
 51. VIVEROS, C.A.; GARCÍA, D.B.; SALAZAR, F.A.; LÓPEZ, L.O.; VICTORIA, J.I. Características de la caña de azúcar asociadas con toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña). *Acta agrónomica* 64(3):268-272. 2015.
 52. WALDRON, B.L.; EHLKE, N.J.; WYSE, D.L.; VELLEKSON, D.J. Genetic variation and predicted gain from selection for winterhardiness and turf quality in a perennial ryegrass topcross population. *Crop science* 38(3):817-822. 1998.
 53. WALYARO, D.J.; VAN DER VOSSEN, H.A.M. Early determination of yield potential in Arabica coffee by applying index selection. *Euphytica* 28(2):465-472. 1979.
 54. WARNOCK, R.; VALENZUELA, J.; TRUJILLO, A.; MADRID, P.; GUTIÉRREZ, M. Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota. *Agronomía tropical* 56(1):21-42. 2006.
 55. WILLIAMS, L.; MARTINSON, T.E. Nondestructive leaf area estimation of 'Niagara' and 'DeChaunac' grapevines. *Scientia horticulturae* 98(4):493-498. 2003.
 56. WRIGHT, S. Correlation and causation. *Journal of agricultural research* 20:557-585. 1921.