

Estructura del dosel y coeficientes de extinción teóricos en genotipos de café arábico en Colombia

Canopy structure and theoretical coefficient of extinction in genotypes of arabic coffee in Colombia

Carlos Andrés Unigarro Muñoz*, Alvaro Jaramillo Robledo, Lizardo Norbey Ibarra Ruales y Claudia Patricia Flórez Ramos

Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Chinchiná, Caldas- Colombia.

*Autor para correspondencia: carlos.unigarro@cafedecolombia.com

Rec.: 15.07.2015 Acep.: 05.10.2015

Resumen

La estructura del dosel tiene un marcado efecto sobre la interceptación de la radiación y la fotosíntesis de la planta, además de otros procesos. El estudio se llevó a cabo en la Estación Central Naranjal de CENICAFÉ (Centro Nacional de Investigaciones de Café – Chinchiná, Caldas, Colombia) sobre 25 genotipos de *Coffea arabica* L., divididos en dos grupos. El primer grupo, con plantas de porte alto (3.6 años) y el segundo con plantas de porte bajo (2.6 años), ambos sembrados a una densidad de 5000 plantas.ha⁻¹. La distribución de los ángulos de las hojas y las ramas en el dosel se caracterizaron en los diferentes genotipos evaluados, así mismo los coeficientes de extinción teóricos de la radiación solar directa y difusa fueron estimados. En los genotipos de porte alto predominaron las distribuciones foliares plagiófila y esférica, mientras que en los de porte bajo fue la planófila. El parámetro x representa a la distribución elipsoidal de los ángulos foliares, este valor varió entre 0.09 y 2.21 para los genotipos de porte alto (verticales y esféricos) y entre 1.90 y 3.98 para los de porte bajo (horizontales). Los coeficientes de extinción teóricos para la radiación directa derivados del parámetro x variaron entre 0.63 a 0.83 para el grupo de porte alto, mientras que en el porte bajo mostraron valores entre 0.84 a 0.93. Para la radiación difusa, los coeficientes presentaron la misma tendencia, pero con valores menores. En cuanto al ángulo de inclinación de las ramas, se caracterizó por ser predominantemente planófilo.

Palabras clave: *Coffea arabica* L., distribución de los ángulos foliares, ángulo de inclinación de las ramas, radiación solar directa y difusa.

Abstract

The canopy structure has a marked effect on the interception of the solar radiation and the plant photosynthesis, in addition to other processes that in their group, are the result of the plant-environment interaction. The present research was carried out at the Central Station Naranjal of CENICAFÉ (National Coffee Research Center - Chinchiná, Caldas, Colombia) in 25 genotypes of *Coffea arabica* L. which were divided in two groups. The first one with tall aspect plants (3.6 years old) and the second one, with short plant aspect (2.6 years old) both planted in a density of 5000 plants.ha⁻¹. The leaf and branches angles distribution in the canopy were characterized in the different assessed genotypes, also the theoretical extinction coefficients for direct and diffuse solar radiation were estimated. In genotypes of high aspect, the plagiophile and spherical leaf distribution predominated, as in the ones of short aspect the planophile did. The parameter x , represents the ellipsoidal distribution of the leaf angles, which varied between 0.09 and 2.21 for genotypes of high aspect (vertical and spherical) and between 1.90 and 3.98 for the ones of short aspect (horizontal). The theoretical coefficients of extinction for the direct radiation derived of the parameter x varied between 0.63 to 0.83 for the group of high aspect, and the short one, showed values between 0.84 to 0.93, for the diffuse radiation the coefficients showed the same trend but with minor values. As regards the inclination angles of the branches was characterized for being planophile predominant.

Keywords: *Coffea arabica* L., leaf angles distribution, branch inclination angles, direct and diffuse solar radiation.

Introducción

La descripción estructural del dosel es esencial para comprender los procesos de la planta asociados con la radiación solar, dada la profunda influencia en los cambios de masa y energía que ésta interacción causa. Así mismo, esta interacción puede ser el reflejo de procesos evolutivos como la adaptación a factores físicos, químicos o biológicos, al mostrar la actividad vital del organismo o peculiaridades en su crecimiento y desarrollo (Norman & Campbell, 1989). La estructura del dosel es un punto base para la simulación de procesos como la fotosíntesis, porque al relacionarse con la radiación, proporciona una herramienta útil para la predicción del crecimiento de los cultivos (Clayton *et al.* 1993; Johnson & Lakso, 1991).

La estructura del dosel se puede definir por el tamaño, forma, orientación y distribución posicional de varios órganos vegetales superficiales (hojas, tallos, ramas, flores y frutos). La forma directa de obtener los datos de la estructura del dosel es midiendo el área, los ángulos o posiciones de los órganos (Norman & Campbell, 1989). Sin embargo, la edad de la planta y por ende su tamaño, afectan las características estructurales de las hojas, tallos y los niveles del dosel (Niinemets, 2010), haciendo que las descripciones cuantitativas de las características geométricas del dosel sean difíciles, dada su variabilidad espacial y temporal (Norman & Campbell, 1989). También existen métodos indirectos que mediante un proceso matemático de inversión permiten estimar la estructura del dosel con base en la teoría de transferencia de la radiación (Norman & Campbell, 1989).

La orientación de la hoja está dada por la dirección de sus ángulos de inclinación y de los ángulos de azimutales. Este parámetro es importante por dos razones: primero, la irradiancia sobre la hoja depende del ángulo entre la normal de la hoja -dirección del rayo directo-, y segundo este ángulo determina el área proyectada por los elementos del follaje en un plano horizontal (capacidad interceptación de la radiación) (Sinoquet & Andrieu, 1993; Jaramillo *et al.* 2006). En la mayoría de doseles, la distribución de las hojas se aproximan a una simetría azimutal, por lo tanto, sus posiciones pueden caracterizarse mediante la distribución de las frecuencias acumuladas de los ángulos foliares (Goudriaan, 1988; Goudriaan & Monteith, 1990).

Las cuatro distribuciones estandarizadas que describen las tendencias en la orientación del follaje son: planófila, erectófila, plagiófila y extremófila. Otras dos distribuciones que comúnmente se usan son: la distribución uniforme (sin un ángulo de inclinación predominante) y la

esférica (los elementos del área están inclinados todos como una esfera) (Sinoquet & Andrieu, 1993). La distribución esférica es una distribución erectófila, que supone la igualdad entre la frecuencia relativa de las inclinaciones foliares con la frecuencia relativa de los elementos de la superficie de una esfera. Cuando no se cuenta con información suficiente sobre la distribución de un dosel, puede asumirse que su distribución es esférica (Goudriaan, 1988). De las distribuciones con función elipsoidal puede derivarse teóricamente el coeficiente de extinción (K), el cual representa al área de la sombra emitida sobre una superficie horizontal por el dosel y dividida por el área de las hojas del dosel (Campbell, 1989).

Para *C. arabica*, se describen dos tipos de arquitectura (planófila y erectófila) según el ángulo de inclinación de las ramas en relación al tallo principal. El tipo planófila se observa en la variedad Caturra de *C. arabica* (Castillo *et al.* 1996) y en 24 progenies F5 de Caturra x Híbrido de Timor candidatas a ser componentes de la variedad Castillo® (Alvarado & Ochoa, 2006).

El objetivo de la presente investigación fue el de caracterizar el dosel de 25 genotipos de *C. arabica* L. de la Colección Colombiana de Café, mediante tres métodos de distribución de los ángulos foliares y evaluar los coeficientes de extinción teóricos para la radiación solar directa y difusa.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en la Estación Central Naranjal de Cenicafe, ubicada en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas - Colombia, en las coordenadas 04°58' N y 75°39' O, con una altitud de 1,381 m.s.n.m, precipitación promedio anual de 2,795 mm, temperatura media anual de 20.9 °C y humedad relativa de 76.9%. Las evaluaciones se realizaron sobre 25 genotipos de *Coffea arabica* L., de la Colección Colombiana de Café. Éstos se dividieron en dos grupos: el primero de porte alto (GRUPO 1) conformado por accesiones Etiopes (E039, E054, E057, E069, E070, E114, E286, E291, E318, E338, E428, E464, E501, E510, E546 y E554) y por variedades cultivadas (Maragogipe, Tabi y Típica) con una edad de 3.6 años; y el segundo (GRUPO 2) conformado por líneas componentes de la variedad Castillo® (CU1815, CU1990, CX2197, CX2720 y CX2848) con 2.6 años de edad, ambos sembrados a una densidad de 5000 plantas.ha⁻¹ (2 m entre surcos * 1 m entre plantas). Cada grupo de genotipos se distribuyó en campo bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, un árbol representativo por parcela se consideró como la unidad experimental.

Para medir los ángulos foliares se utilizó un compás-transportador similar al descrito por Norman & Campbell (1989), este dispositivo marca el grado de inclinación de la hoja al medir el ángulo formado entre una línea perpendicular y la superficie en el centro de la hoja. El ángulo de inserción de las ramas se midió con el mismo principio e instrumento. Estas mediciones se realizaron en la cuarta parte de las ramas presentes en un árbol, y a 10 de las hojas presentes en cada una de las ramas. Por cada genotipo, se realizó un análisis de frecuencia sobre el número de hojas en cada ángulo, determinando así su correspondiente distribución de ángulo foliar. De forma similar, los ángulos de inserción de ramas también serían clasificados (Tabla 1); el ángulo de ramas se obtuvo por el promedio de las mediciones. Adicionalmente se relacionó la frecuencia acumulada en cada ángulo foliar con las distribuciones teóricas propuestas por Goudriaan (1988) (Tabla 2).

Con la información por genotipo de los ángulos foliares, también se estimó el parámetro de distribución elipsoidal de los ángulos foliares (x o ELADP); como el número de hojas horizontales ($>$ a 45°) dividido por el número de hojas verticales ($<$ a 45°) multiplicado por $\pi/2$ (ecuación 1) (Campbell & Norman, 1988). Los valores de x están entre el rango de 0.1 (distribución vertical) a 10 (distribución horizontal) y son una forma de caracterizar la tendencia horizontal o vertical de hojas en el dosel, la distribución esférica tiene un valor de 1.0 (Campbell & Norman, 1988; Wang & Jarvis, 1988). El ángulo medio de la hoja ($\bar{\alpha}$) por genotipo se derivó con base en x , mediante las ecuaciones 2 y 3 propuestas por Wang & Jarvis (1988). Para la distribución esférica ($x=1.0$) el ángulo medio de la hoja es 57.4° .

$$x = \frac{\pi * N_h}{2 * N_v} \quad (1)$$

En donde: N_h es el número de hojas horizontales; N_v es el número de hojas verticales.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{0.0066x + 0.0107} \quad (x \leq 1) \quad (2)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{0.0103x + 0.0053} \quad (x \leq 1) \quad (3)$$

En donde: $\bar{\alpha}$, es el ángulo medio de la hoja; x , es el parámetro de distribución elipsoidal de los ángulos foliares.

Los coeficientes de extinción (K_i) teóricos por genotipo, se determinaron usando la metodología propuesta por Campbell (1989), la cual lo deriva del parámetro x y del ángulo cenital mediante la ecuación 4, que asume a todos los elementos del dosel completamente oscuros y aleatoriamente distribuidos. Al variar el ángulo cenital (0 a 90°) en la ecuación 4 y promediar los valores K_i , se obtiene el coeficiente de extinción para la radiación directa (K_{dir}) (Castillo *et al.* 1996). El coeficiente de extinción para la radiación difusa

Tabla 1. Distribución de ángulos foliares y de ramas en el dosel

Distribución de ángulos foliares	
Planófila	El arreglo foliar de las hojas es en su mayoría horizontal, con la mayor frecuencia de datos entre 0-30°.
Plagiófila	El arreglo foliar de las hojas tiene su mayor frecuencia de datos entre 31-60°.
Erectófila	El arreglo foliar de las hojas es predominantemente vertical, con la mayor frecuencia de datos entre 61-90°.
Extremófila	Presenta un doble pico de ángulos de inclinación foliar con máximos en 0° y 90°.
Distribución de ángulos en ramas	
Planófila	La mayor frecuencia de datos presenta ramas con ángulos de inserción entre 45-90° en relación al tallo principal (ramificación plagiogeotrópica)
Erectófila	La mayor frecuencia de datos presenta ramas con ángulos de inserción entre 0-45° en relación al tallo principal (ramificación ortogeotrópica)

Tabla 2. Distribuciones teóricas según Goudriaan (1988), de los ángulos foliares para el dosel

Inclinación (°)	Teórica			Acumulada		
	Planófila	Esférica	Erectófila	Planófila	Esférica	Erectófila
0-10	0.148	0.015	0.007	0.148	0.015	0.007
10-20	0.250	0.045	0.024	0.398	0.060	0.031
20-30	0.217	0.074	0.045	0.615	0.134	0.076
30-40	0.156	0.100	0.070	0.771	0.234	0.146
40-50	0.101	0.123	0.100	0.872	0.357	0.246
50-50	0.061	0.143	0.133	0.933	0.500	0.379
60-70	0.036	0.158	0.169	0.969	0.658	0.548
70-80	0.020	0.168	0.207	0.989	0.826	0.755
80-90	0.011	0.174	0.245	1.000	1.000	1.000
>90	-	-	-	-	-	-

extinción (K_{dif}) se calculó con la ecuación 5. En el presente trabajo, análisis, cálculos y gráficas, se realizaron con el software Microsoft Office Professional 2010™.

$$K_i = K(\theta_i, x) = \frac{(x + \tan^2 \theta)^{1/2}}{x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}} \quad (4)$$

En donde: x es el parámetro de distribución elipsoidal de los ángulos foliares; θ es el ángulo cenital de un rayo directo.

$$K_{dif} = K_{dir} (1 - \sigma)^{0.5} \quad (5)$$

En donde: σ es el coeficiente de dispersión que para la mayoría de las hojas es 0.20.

Resultados y discusión

En la Tabla 3, se aprecia la clasificación de los 25 genotipos de *C. arabica* según tres conceptos de distribución foliar. La mayoría de los genotipos presentan una distribución plagiófila, con la excepción de E054, E069, E546 y Maragogipe

de distribución erectófila (Tabla 3). Mejía *et al.* (2013), encontraron que 11 (BA-36, Blue Mountain, Caturra, CU-1812, Dilla Alghe, E-87, Harrar R2, KF-03, Mundo Novo, SL-28 y Típica Rojo) de los 19 genotipos evaluados en su estudio fueron clasificados como plantas plagiófilas, al presentar un alto número de hojas con ángulos entre los 31 y 60°. Alvarado & Ochoa (2006), clasificaron 24 progenies de la variedad Castillo® con tres y cuatro años de edad como plantas planófilas, al tener ángulos foliares con valores medios entre 33° y 34°, dentro de estas progenies se encontraban CU1815 y CX2720, genotipos de este estudio, a diferencia del autor citado fueron plagiófilos (Tabla 3). En este sentido, es posible que respuesta se haya obtenido por la menor edad de los árboles de los 25 genotipos evaluados (2.6 años). Según Niinemets (2010) la edad de la planta y su tamaño afectan las características estructurales de la hoja, el tallo y los niveles del dosel.

En la distribución esférica los elementos del área están inclinados como los de una esfera (sin una predominante dirección normal de la hoja), lo cual es deseable porque la sombra emitida

Tabla 3. Tipos de distribución de los ángulos foliares de acuerdo a tres metodologías y coeficientes de extinción teóricos para radiación solar directa y difusa, basados en la distribución elipsoidal de los ángulos foliares de 25 genotipos de *C. arabica* L.

Genotipo	Frecuencias observadas para ángulos foliares				De Wit (1965)	Goudriaan (1988)	x	$\bar{\alpha}$	Campbell y Norman (1988)	K_{dir}	K_{dif}
	0-30°	31-60°	61-90°	>90°							
GRUPO 1 (porte alto)											
Bourbon	0.19	0.44	0.35	0.01	Plagiófila	Esférica	1.14	58.7	Esférica	0.77	0.61
E039	0.08	0.46	0.45	0.01	Plagiófila	Esférica	0.61	68.0	Esférica	0.70	0.56
E054	0.03	0.43	0.47	0.07	Erectófila	Erectófila	0.32	78.1	Vertical	0.66	0.53
E057	0.07	0.56	0.37	0.00	Plagiófila	Esférica	0.62	67.5	Esférica	0.70	0.56
E069	0.09	0.37	0.47	0.07	Erectófila	Esférica	0.51	71.0	Vertical	0.69	0.55
E070	0.11	0.53	0.34	0.02	Plagiófila	Esférica	0.84	61.5	Esférica	0.73	0.59
E114	0.13	0.55	0.31	0.01	Plagiófila	Esférica	1.06	61.5	Esférica	0.76	0.61
E286	0.10	0.44	0.43	0.03	Plagiófila	Esférica	0.58	68.7	Esférica	0.70	0.56
E291	0.08	0.45	0.44	0.03	Plagiófila	Esférica	0.64	66.9	Esférica	0.71	0.57
E318	0.08	0.46	0.44	0.01	Plagiófila	Esférica	0.62	67.7	Esférica	0.70	0.56
E338	0.13	0.43	0.43	0.01	Plagiófila	Esférica	0.82	62.0	Esférica	0.73	0.58
E428	0.19	0.65	0.16	0.00	Plagiófila	Esférica	2.21	35.6	Horizontal	0.86	0.68
E464	0.18	0.48	0.32	0.01	Plagiófila	Esférica	1.14	58.6	Esférica	0.77	0.62
E501	0.15	0.59	0.25	0.01	Plagiófila	Esférica	1.12	59.5	Esférica	0.77	0.61
E510	0.10	0.48	0.41	0.01	Plagiófila	Esférica	0.71	65.0	Esférica	0.72	0.57
E546	0.12	0.43	0.45	0.01	Erectófila	Esférica	0.67	66.2	Esférica	0.71	0.57
E554	0.13	0.51	0.34	0.01	Plagiófila	Esférica	0.91	59.9	Esférica	0.74	0.59
Maragogipe	0.04	0.16	0.73	0.07	Erectófila	Erectófila	0.09	88.3	Vertical	0.63	0.50
Tabi	0.09	0.45	0.42	0.04	Plagiófila	Esférica	0.81	62.3	Esférica	0.73	0.58
Típica	0.13	0.43	0.41	0.03	Plagiófila	Esférica	0.75	63.9	Esférica	0.72	0.58
GRUPO 2 (porte bajo)											
CU1815	0.36	0.50	0.14	0.01	Plagiófila	Planófila	3.19	26.2	Horizontal	0.90	0.72
CU1990	0.31	0.38	0.29	0.02	Plagiófila	Esférica	1.91	40.1	Horizontal	0.84	0.67
CX2197	0.38	0.48	0.13	0.01	Plagiófila	Planófila	3.98	21.6	Horizontal	0.92	0.74
CX2720	0.32	0.58	0.10	0.00	Plagiófila	Planófila	3.86	22.2	Horizontal	0.92	0.74
CX2848	0.33	0.46	0.21	0.00	Plagiófila	Planófila	2.68	30.4	Horizontal	0.88	0.70

por una esfera en un plano perpendicular a la dirección de un rayo no depende de su dirección, haciendo que los cálculos de interceptación sean simples (Sinoquet & Andrieu, 1993). Este modelo de distribución de la inclinación foliar es el punto de referencia para el método de Goudriaan (1988), mediante el cual se compararon las frecuencias acumuladas medidas en los genotipos de café evaluados respecto a los valores teóricos de la Tabla 2, como resultado de este procedimiento, CU1815, CX2197, CX2720 y CX2848 se clasificaron como doseles planófilos, E054 y Maragogipe como erectófilos y el resto de los genotipos como esféricos (Tabla 3). Castillo *et al.* (1996), observó que *C. arabica* var. Colombia presentó una distribución planófila usando la clasificación de Goudriaan (1988). Doseles con hojas predominantemente horizontales (planófilos) podrían limitar la fotosíntesis en los estratos inferiores de muchas plantas, al interceptar la mayor parte de la radiación en los estratos superiores, lo cual atenúa el régimen de irradiancia y con ello la temperatura al interior de la planta (Castillo *et al.* 1997). No obstante, esta característica podría estar asociada con la adaptación de la planta cuando se expone directamente a la radiación solar (Castillo *et al.* 1996) como mecanismo de protección.

Para una hoja de café, la irradiancia saturante es relativamente baja, con valores entre los 300 a 700 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Fahl *et al.* 1994). Al interior del dosel de árboles adultos de café, muchas hojas están parcial o completamente sombreadas, interceptando tan solo el 1.5% de la radiación solar total, lo cual sugiere que la fotosíntesis del dosel, podría saturarse cuando la irradiancia es mayor a los 600-700 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (DaMatta *et al.* 2007). Ésta podría ser una adaptación en los doseles planófilos para evitar saturarse con irradiancias relativamente altas, como las presentes cuando el cultivo se siembra a libre exposición. En contraste, los doseles erectófilos permiten una mayor penetración de la irradiancia de forma más uniforme. Un dosel erectófilo solo es más ventajoso que uno planófilo si tiene altos índices de área foliar (IAF), porque en un dosel con distribución erectófila y bajo IAF, la irradiancia podría no ser interceptada con eficiencia por los niveles del dosel y llegar en mayores proporciones al suelo.

El parámetro x representa a la distribución elipsoidal de los ángulos foliares, la cual es la tasa entre los ejes verticales y los ejes horizontales asumiendo una distribución elipsoidal (Sinoquet & Andrieu, 1993). En particular la distribución esférica es una distribución elipsoidal con un $x=1$ (Campbell & Norman, 1988). En el presente trabajo los genotipos Bourbon, E039, E057, E070, E114, E286, E291, E318, E338, E464, E501,

E510, E546, E554, Tabi y Típica con un parámetro x entre 0.58 y 1.14 se clasificaron como esféricos; E054 ($x=0.32$), E069 ($x=0.51$) y Maragogipe ($x=0.09$) como verticales, finalmente E428, CU1815, CU1990, CX2197, CX2720 y CX2848 como horizontales con valores de x mayores a 1.90 (Tabla 3). Solo para los genotipos E069, E428 y CU1990 la clasificación realizada con el criterio de Goudriaan (1988), no fue concordante con la realizada mediante el parámetro x , en relación a la tendencia de los ángulos (Tabla 3).

Niinemets (2010), presenta evidencia experimental en muchas especies vegetales que demuestra cómo las distribuciones de tipo planófila están más asociadas a doseles de porte bajo. En este contexto, todos los genotipos del grupo 2 tienen un porte bajo y fueron clasificados como horizontales bajo los criterios de la distribución elipsoidal (Tabla 3). Contrario a estas observaciones, los ángulos de inclinación pueden ser relativamente insensibles y esencialmente esféricos a lo largo del dosel en algunas coníferas intolerantes a la sombra, lo cual muestra la plasticidad en el manejo de la luz entre especies (Niinemets *et al.* 2002; Niinemets, 2010).

En la Tabla 3, se aprecia que los K_{dir} teóricos para los genotipos caracterizados como esféricos y horizontales según los criterios de Campbell & Norman (1988), tienen valores entre 0.69 a 0.92 y de K_{dif} entre 0.55 a 0.74. En contraste, los genotipos verticales presentaron menores valores de K_{dir} (entre 0.63 a 0.66) y de K_{dif} (entre 0.50 a 0.53) (Tabla 3). La tasa de absorción de energía debida al follaje o K , tiende a ser mayor en especies de hoja ancha y con ángulos foliares relativamente horizontales (K entre 0.6 y 0.9) y a presentar menores valores en especies de hojas pequeñas y con ángulos foliares erectos (K entre 0.3 y 0.5) (Jaramillo, 2005). Castillo *et al.* (1996) al calcular el K_{dir} y el K_{dif} para *C. arabica* var. Colombia (planófila), se obtuvieron valores de 0.931 y 0.833, respectivamente. Estos valores son cercanos a los reportados para el Grupo 2, de distribución planófila (CU1815, CX2197, CX2720 y CX2848) según la calificación de Goudriaan (1988).

En la Tabla 4, se observa que solo el genotipo E017 fue erectófilo, mientras que para el resto de genotipos evaluados fue planófilo. El ángulo de inserción de las ramas influencia la arquitectura del dosel, el traslape entre ramas y hojas vecinas y la distribución de la radiación al interior del mismo (Alvarado & Ochoa, 2006). De acuerdo con Arcila (2007), plantas con una arquitectura planófila son aparentemente más productivas que las erectófilas. Las futuras investigaciones deben enfocarse en comparar la producción de café cereza procedente diversos genotipos con estas arquitecturas, en el presente trabajo con solo un genotipo erectófilo, la información es

Tabla 4. Distribución de los ángulos de inclinación en ramas para 25 genotipos de *C. arabica* L.

Genotipo	Ángulo medio de ramas (°)	Frecuencias observadas para ángulos de ramas		Tipo de distribución
		0-45°	46-90°	
GRUPO 1 (porte alto)				
Bourbon	63.3	0.00	1.00	Planófila
E039	51.8	0.26	0.74	Planófila
E054	62.7	0.00	1.00	Planófila
E057	51.2	0.26	0.74	Planófila
E069	53.6	0.19	0.81	Planófila
E070	54.8	0.67	0.33	Erectófila
E114	55.4	0.15	0.85	Planófila
E286	53.4	0.15	0.85	Planófila
E291	51.7	0.19	0.81	Planófila
E318	59.4	0.07	0.93	Planófila
E338	47.3	0.37	0.63	Planófila
E428	56.9	0.00	1.00	Planófila
E464	58.1	0.00	1.00	Planófila
E501	51.2	0.22	0.78	Planófila
E510	56.9	0.11	0.89	Planófila
E546	52.4	0.15	0.85	Planófila
E554	48.8	0.33	0.67	Planófila
Maragogipe	73.9	0.00	1.00	Planófila
Tabi	61.1	0.00	1.00	Planófila
Tipica	68.4	0.00	1.00	Planófila
GRUPO 2 (porte bajo)				
CU1815	54.9	0.00	1.00	Planófila
CU1990	65.0	0.00	1.00	Planófila
CX2197	55.0	0.13	0.87	Planófila
CX2720	50.7	0.08	0.92	Planófila
CX2848	47.6	0.29	0.71	Planófila

insuficiente para hacer mayores inferencias en cuanto a la asociación de esta característica con la producción.

Conclusiones

De los 25 genotipos evaluados en la presente investigación, los de porte alto presentaron en su mayoría una distribución de los ángulos foliares del tipo plagiófila fueron del tipo esférica (Goudriaan, 1988; Campbell & Norman, 1989). E054 y Maragogipe, presentaron una distribución foliar del tipo erectófila en dos de los métodos evaluados. En el caso de los genotipos de porte bajo la distribución predominante fue la planófila, según la clasificación de Goudriaan (1988). El parámetro x varió entre 0.09 y 2.21 para los genotipos de porte alto (verticales y esféricos) y entre 1.90 y 3.98 para los de porte bajo (horizontales). Los K_{dir} teóricos derivados del parámetro x por la ecuación de Campbell (1989), oscilaron entre 0.63 a 0.83 para el grupo de porte alto, mientras que en el porte bajo mostraron valores entre 0.84 a 0.93. En cuanto al ángulo de inclinación de las ramas se caracterizó por ser predominantemente pla-

nófilo, tanto en los genotipos de porte alto como en los de porte bajo, siendo el genotipo E070 con una inclinación erectófila la única excepción.

Agradecimientos

A la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y al Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). Los autores agradecen a Mario Franco Arcila, auxiliar técnico de Cenicafé por su valiosa colaboración en el registro de la información en campo.

Referencias

- Alvarado G. & Ochoa H.E. (2006). Características fenotípicas de componentes de Variedad Castillo® en dos ambientes. *Cenicafé*, 57(2), 100-121.
- Arcila J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. p. 33. En: Arcila. J. Farfán. F. Moreno. A. Salazar. L. Hincapié. E. Sistemas de producción de café en Colombia. Cenicafé, Chinchiná. 309 p.
- Campbell C.S. & Norman J.M. (1988). The description and measurement of plant canopy structure. In *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function* (ed. C. Russell), Society for Experimental Biology, Seminar Series 29, Cambridge University Press, New York. 179 p.
- Castillo E. Arcila J. Jaramillo A. & Sanabria R.J. (1996). Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en café *Coffea arabica* L., var. Colombia. *Cenicafé*, 47(1), 4-15.
- Castillo E. Arcila J. Jaramillo A. & Sanabria J. (1997). Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica* L. *Cenicafé*, 48(3), 182-194.
- Clayton G. Reynolds J. & Ferree D.C. (1993). Influence of orchard management on leaf angle and leaf orientation in apple trees. *J Hort Sci*, 68(5), 679-687. doi: 10.1080/00221589.1993.11516400.
- DaMatta F.M. Ronchi C.P. Maestri M. & Barros R.S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz J Plant Physiol*, 19(4), 485-510. doi: 10.1590/S1677-04202007000400014.
- Fahl J.I. Carelli M.L.C. Veja J. & Magalhães A.C. (1994). Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). *J Hort Sci*, 69(1), 161-169. doi:10.1080/14620316.1994.11515262.
- Goudriaan J. (1988). The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agr Forest Meteorol*, 43(2), 155-169. doi: 10.1016/0168-1923(88)90089-5.
- Goudriaan J. & Monteith J.L. (1990). A mathematical function for growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann Bot*, 66(6), 695-701.
- Jaramillo A. (2005). La redistribución de la radiación solar y de la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Rev Acad Colomb Cienc*, 29 (112), 371-382.
- Jaramillo A. Arcila J. Montoya E.C. & Quiroga F. (2006). La radiación solar, consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Meteorología Colombiana*, 10, 12-22.

- Johnson R.S. & Lakso A. (1991). Approaches to modeling light interception in orchards. *Hortscience*, 26(8), 1002-1004.
- Mejía J.W. Cartagena J.R. & Riaño N.M. (2013). Morphometric and productive characterization of nineteen genotypes from the Colombian coffee collection. *Rev Fac Nal Agr Medellín*, 66(2), 7021-7034.
- Niinemets U. Cescatti A. Lukjanova A. Tobias M. & Truus L. (2002). Modification of light-acclimation of *Pinus sylvestris* shoot architecture by site fertility. *Agr Forest Meteorol*, 111(2), 121-140. doi: 10.1016/S0168-1923(02)00011-4.
- Niinemets U. (2010). A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research*, 25(4), 693-714. doi: 10.1007/s11284-010-0712-4.
- Norman J.M. & Campbell G.S. (1989). Canopy structure. In: Pearcy, R. W. (ed). *Plant physiological ecology; field methods and instrumentation*. Chapman and Hall (U.K.). p. 302-325.
- Sinoquet H. & Andrieu B. (1993). The geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurements methods. In: Varlet-Grancher, C. et al. (eds). *Crop structure and light microclimate characterization and applications*. INRA (Francia). p. 131-158.
- Wang Y.P. & Jarvis P.G. (1988). Mean leaf angles for the ellipsoidal inclination angle distribution. *Agr Forest Meteorol*, 43 (3-4), 319-321. doi: 10.1016/0168-1923(88)90057-3.