

ESTRUCTURA DEL DOSEL E INTERCEPTACION DE LA RADIACION SOLAR EN *Coffea arabica* L. VAR. COLOMBIA¹

Esperanza Castillo Rodríguez *, Jaime Arcila Pulgarín **, Alvaro Jaramillo Robledo ***,
Joaquín Sanabria Rodríguez ****

RESUMEN

CASTILLO R., E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA R., J. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en *Coffea arabica* L var. Colombia. Cenicafé. 47(1): 5-15. 1996

Se estudió la distribución foliar del cafeto, *Coffea arabica* L., en una plantación sembrada a una densidad de 5000 plantas.ha⁻¹, con dos disposiciones de las plantas en el campo: cuadrado y rectángulo. Se encontró que el mayor porcentaje de las hojas se encuentra en el rango de ángulos de 0°- 30°, lo cual es típico de las plantas con una distribución foliar planófila. Con base en la distribución foliar obtenida se definieron los coeficientes de extinción teóricos para la radiación directa (k dir=0,93) y difusa (k dif=0,83), así como el factor de conglomeración (fc=0,57), los cuales permiten estimar los niveles de radiación directa y difusa dentro del árbol necesarios para estimar las tasas de asimilación a nivel de toda la planta.

Palabras claves: Café, *Coffea arabica*, distribución foliar, ángulos foliares, radiación solar, coeficientes de extinción, factor de conglomeración.

ABSTRACT

The foliar distribution of the coffee plant, *Coffea arabica* L., was studied in a coffee field planted at a density of 5000 plants.ha⁻¹ with two types of arrangement of the plants: square and rectangular. The highest percentage of the leaves have inclination angles in the range 0°-30° which is characteristic of plants with a planophile leaf distribution. Upon this basis, the theoretical extinction coefficients for direct (k dir=0.93) and diffuse (k dif=0.83) radiation and the conglomeration factor were determined (fc=0.57). This information is necessary for the estimation of the direct and diffuse radiation regime inside the canopy so that the photosynthesis of the entire plant can be estimated.

Keywords: *Coffea arabica* L., foliar distribution, leaf inclination, solar radiation, extinction coefficients, conglomeration factor.

¹ Adaptado de la tesis «Interceptación de la radiación solar en cafetales», presentada por el primer autor para optar al título de Magister en Fitotecnia. Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá.

* Bióloga M. Sc. Disciplina Fisiología Vegetal. CENICAFÉ, Chinchiná, Caldas.

** Investigador Principal I. Disciplina Fisiología Vegetal. CENICAFÉ, Chinchiná, Caldas.

*** Investigador Científico II. Disciplina Agroclimatología. CENICAFÉ, Chinchiná, Caldas.

**** Ingeniero Agrónomo. Estadístico. CORPOICA. Santafé de Bogotá.

El conocimiento de la estructura del dosel, así como de su interacción con el ambiente de radiación solar, constituye la base de la simulación de la fotosíntesis en la planta. Estos modelos, en combinación con aquellos relacionados con la interceptación de radiación, proporcionan una herramienta muy útil para el entendimiento y predicción del crecimiento de los cultivos (4, 8, 14, 16).

La descripción de la estructura del dosel es también esencial para entender los procesos de la planta debido al profundo efecto que ésta tiene sobre los intercambios de masa y energía en aspectos como la interceptación de radiación, temperatura del aire y de la hoja, humedad atmosférica, evaporación del suelo por debajo del dosel, almacenamiento de calor por el suelo, interceptación de la lluvia y duración de la humedad foliar, entre otros (17, 18, 20, 27).

La estructura del dosel se puede definir por el tamaño, forma, orientación y distribución posicional de los diferentes órganos como hojas, tallos, ramas, flores y frutos. La forma más simple de obtener información sobre la estructura del dosel es mediante la medición directa de estos órganos incluyendo área, forma, ángulos o posiciones. También se pueden hacer determinaciones indirectas como por ejemplo, midiendo la radiación dentro y fuera del dosel y luego, mediante la aplicación de la teoría de transferencia de radiación se obtienen estimativos de la estructura del dosel a partir de un procedimiento matemático de inversión (6, 20).

La orientación del follaje es otra de las características del dosel que se encuentra en estrecha relación con la interceptación de la radiación y por consiguiente ejerce una marcada influencia sobre la fotosíntesis del cultivo, puesto que entre otros factores, la radiación recibida por un dosel depende de la posición de las hojas en el espacio (30).

La distribución de los ángulos foliares es definida por Norman y Campbell (20) como la distribución de los ángulos de inclinación (ángulo entre la perpendicular a la superficie de la hoja y la vertical) a un plano horizontal de referencia) de las hojas y sus ángulos de azimut (ángulo formado entre una proyección horizontal a la hoja y el Norte). Sin embargo, como las hojas de un dosel en general no tienen dirección azimutal preferida (30) sus posiciones están completamente caracterizadas por la distribución de frecuencia acumulada de la inclinación de las hojas.

Wit (30) establece cuatro clases de distribución del dosel, de acuerdo a la inclinación foliar:

- Distribución planófila. El arreglo foliar de las hojas es en su mayoría horizontal, es decir, cerca a los 0° .
- Distribución erectófila. El arreglo foliar es predominantemente vertical, cerca a los 90° .
- Distribución plagiófila. El arreglo foliar con orientación foliar predominante de 45° .
- Distribución extremófila. Presenta un doble pico de ángulos de inclinación foliar con máximos en 0° y 90° .

La distribución esférica es una distribución erectófila que es obtenida suponiendo que la frecuencia relativa de las inclinaciones foliares es igual a la frecuencia relativa de las inclinaciones de los elementos de la superficie de una esfera (30). Según Goudriaan (11) este tipo de distribución puede ser asumida para la mayoría de cultivos cuando no se cuenta con ningún tipo de información al respecto.

De acuerdo con Shibles (26), los modelos de productividad predicen que la tasa de fotosínte-

sis neta del dosel y la producción podrían ser incrementados sustancialmente con un arreglo más erectófilo en los cultivos, el cual permita una mayor penetración y una distribución más uniforme de la radiación fotosintéticamente activa. Según Wit (30) un dosel erectófilo funciona relativamente mejor en días claros y sólo resulta más ventajoso que el dosel planófilo si se tienen índices de área foliar altos; en un cultivo con distribución erectófila y con una IAF bajo, se puede presentar una considerable pérdida de radiación.

Son muy pocos los trabajos relacionados con la estructura del dosel en café y éstos hacen referencia principalmente al ángulo de inserción de las ramas, desarrollo y distribución del área foliar (2, 5, 13, 17, 21, 22, 27, 28); pero no se conocen estudios sobre la distribución, orientación y ángulos foliares.

Arcila (1) y Orozco (21) registran para *Coffea arabica* dos tipos de arquitectura con relación a la disposición de las ramas, que pueden ser de interés desde el punto de vista de interceptación de radiación y de producción de materia seca: El tipo planófila, con ramificación predominantemente plagiogeotrópica (ángulos entre 45° y 90° en relación al tallo principal), como ocurre en la variedad Caturra y el tipo erectófila con ramificación predominantemente ortogeotrópica (con crecimiento vertical) como en la variedad Erecta. En el tipo planófila las ramas se insertan en un ángulo aproximado de 80-90° con relación al tallo y las hojas también se insertan en ángulo. En el tipo erectófila las ramas se insertan en el tallo en un ángulo de 30-40° y las hojas son casi horizontales.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de la distribución de los ángulos foliares y una estimación de los coeficientes de extinción teóricos para la radiación directa y difusa en la planta de café.

Localización. La investigación se llevó a cabo en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas, en las coordenadas 04° 59' Latitud Norte y 75° 39' longitud oeste, con una altura de 1400 msnm., precipitación promedio anual de 2656 mm, temperatura media de 20,8 °C y brillo solar de 1817 horas/año.

Parcela experimental. El estudio se realizó en predios de un ensayo de densidades de siembra de *Coffea arabica* L var. Colombia de tres años y medio de edad, establecido por Cenicafé (9). El ensayo constaba de 10 tratamientos, correspondientes a la combinación de cinco densidades de siembra y dos disposiciones de las plantas en el terreno, distribuidos bajo un diseño de bloques completamente al azar y cuatro repeticiones. La disposición estuvo determinada por la relación 1:1 (cuadrado) y 2:1 (rectángulo) entre la longitud y el ancho de la distancia de siembra.

De este ensayo se utilizó la densidad de 5000 plantas.ha⁻¹ y como unidad experimental se tomaron tres plantas al azar de cada tratamiento y en cada repetición.

Medición de los ángulos foliares. En cada planta se establecieron cuatro estratos, obtenidos por división del número total de nudos del tallo principal en cuatro partes iguales. Para la medición de los ángulos foliares se utilizó un transportador al que le fue adaptado un soporte para señalar la perpendicular a la superficie en el centro de la hoja y una pequeña cuerda con una plomada que al desplazarse sobre el transportador marca el grado de inclinación de la hoja (20). Estas medidas fueron tomadas en todas las hojas de tres ramas de cada estrato, para lograr así un muestreo representativo de los ángulos foliares.

Distribución de los ángulos foliares. Se determinó mediante un análisis de distribución de la frecuencia acumulada del número de hojas en cada ángulo. Esta frecuencia se relacionó gráficamente con los respectivos ángulos foliares con el fin de obtener la función de distribución foliar. A partir de la hipótesis de que la distribución de los ángulos foliares en café es esférica, se aplicaron pruebas de Chi-cuadrado para establecer si realmente las frecuencias observadas se ajustan a las frecuencias teóricas de ésta distribución. En la misma forma se efectuaron pruebas para las distribuciones planófila y erectófila (7).

Conceptualización y naturaleza del coeficiente de extinción (k) teórico del cafeto de acuerdo a su distribución foliar. El cálculo del coeficiente de extinción se realizó de acuerdo a la metodología propuesta por Ross (23, 24), según la cual, el valor del coeficiente de extinción (k) para un rayo directo de radiación está relacionado al coseno medio de su ángulo de incidencia (Θ), en las superficies foliares. Para una hoja, el coseno Θ del ángulo de incidencia, está descrito por el ángulo de inclinación foliar Θ_L , la elevación solar β y la diferencia en orientación azimutal « α » entre la normal de la hoja y el sol, de la siguiente forma:

$$\text{Cos}\Theta = \text{sen } \beta * \text{Cos}\Theta_L + \text{Cos } \beta * \text{sen}\Theta_L * \text{Cos}\alpha$$

Si se asume que las orientaciones foliares no tienen preferencia azimutal la distribución de Θ es uniforme en el rango $-\pi$ a 0; estos resultados permiten calcular Θ que es el promedio del ángulo de las proyecciones de las hojas en la dirección del rayo solar y el cual se denominará en adelante como ϕ .

Cuando el valor de ϕ se conoce, la interceptación y consecuente extinción de la radiación pueden derivarse ya que el coeficiente de extinción es: $K = \phi \cdot (\text{sen}\beta)^{-1}$.

RESULTADOS Y DISCUSION

Distribución de los ángulos foliares. En la Tabla 1 se presenta la distribución porcentual de los ángulos de inclinación foliar, agrupados en cuatro clases (de 0° a 30°; de 30° a 60°; de 60° a 90° y >90°), en los diferentes estratos de cada disposición. En todos los casos el mayor porcentaje de hojas se encuentra en el rango de ángulos de 0° a 30°, lo cual es típico de las plantas que poseen una distribución planófila.

De los cuatro estratos, el segundo es el que posee en promedio, menor porcentaje de hojas en la clase de ángulos de 0° a 30° (34,8%) y mayores en las clases de 60° a 90° (21,9%) y >90° (10,2%); esto se debe a que la localización de una alta proporción de frutos en esta zona produce cambios en los ángulos de inclinación de las hojas, por la presión que ejercen sobre los pecíolos, como lo sugiere Arcila (1). La presencia de una cantidad importante de hojas más inclinadas (erectas) a este nivel es favorable ya que permite la transmisión de irradiancia hacia los estratos más bajos y se constituye así en una característica de mucho interés en la planta de café.

La Figura 1 muestra las distribuciones de frecuencia acumulada de los ángulos foliares correspondientes a los diferentes estratos en el perfil de la planta. En general, las curvas generadas para cada uno de los estratos en las dos disposiciones muestran el mismo patrón, con una predominancia de ángulos foliares entre 0° y 30°, principalmente en los estratos 3 y 4.

Blackman (3), propuso que uno de los arreglos del dosel más eficientes para la producción de materia seca es aquel que posee hojas bastante erectas en las capas superiores y llega a ser progresivamente más horizontal con la profundidad. Igualmente, Nobel y Long (19) establecen que, cuando el índice de área foliar es mayor de 3, los doseles con hojas erectas en la parte

Tabla 1. Distribución de frecuencia porcentual (%) de los ángulos foliares en *Coffea arabica* L. var. Colombia (5000 plantas.ha⁻¹) en el perfil de la planta. Naranjal - Cenicafé. 1993.

| ESTRATO | ANGULOS (GRADOS) | DISPOSICION | | |
|-----------------------|---------------------|-------------|------------|----------|
| | | CUADRADO | RECTANGULO | PROMEDIO |
| 1 (Superior) | 0-30 | 42,70 | 46,68 | 44,69 |
| | 30-60 | 37,62 | 31,29 | 34,45 |
| | 60-90 | 17,39 | 14,90 | 16,15 |
| | >90 | 2,29 | 7,13 | 4,71 |
| 2 (Medio Superior) | 0-30 | 37,94 | 31,69 | 34,81 |
| | 30-60 | 35,54 | 30,75 | 33,15 |
| | 60-90 | 20,33 | 23,37 | 21,85 |
| | >90 | 6,19 | 14,19 | 10,19 |
| 3 (Medio Inferior) | 0-30 | 47,14 | 48,76 | 47,95 |
| | 30-60 | 36,77 | 37,09 | 36,93 |
| | 60-90 | 14,14 | 10,97 | 12,55 |
| | >90 | 1,95 | 3,18 | 2,57 |
| 4 (Inferior) | 0-30 | 46,66 | 51,54 | 49,10 |
| | 30-60 | 37,21 | 34,07 | 35,64 |
| | 60-90 | 13,41 | 11,54 | 12,48 |
| | >90 | 2,72 | 2,85 | 2,78 |

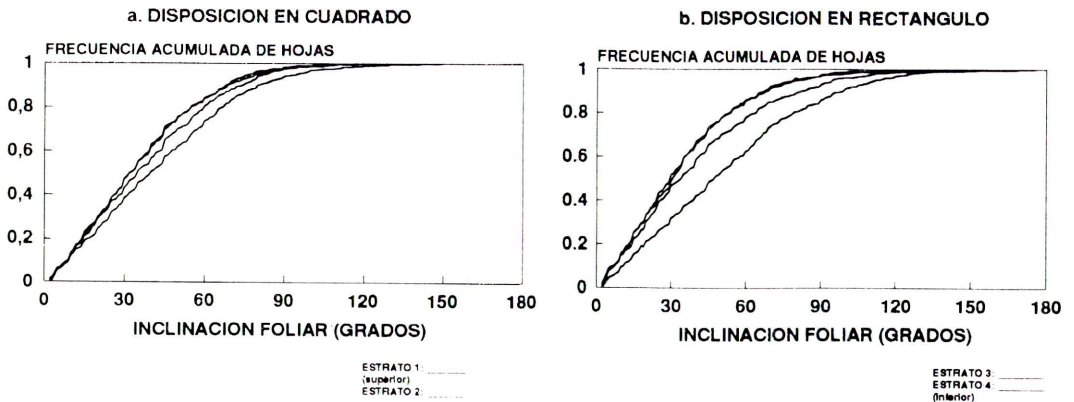


Figura 1. Distribución de los ángulos foliares en *Coffea arabica* L. var. Colombia, según el estrato en el perfil de la planta, en la densidad de 5000 plantas.ha⁻¹ y en dos disposiciones de siembra. Naranjal - Cenicafé. 1993.

superior y horizontales hacia la base, tienden a tener mayores productividades que doseles con inclinaciones de hojas al azar o uniformes; esto ocurre gracias a que este tipo de arquitectura maximiza la disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa para la fotosíntesis, a través del perfil de la planta.

Dentro de los cultivos con hojas erectófilas en la parte superior del dosel y que tienden a ser más horizontales (planófilas) hacia la base, Nobel y Long (19) citan la remolacha azucarera (*Beta vulgaris*), el agave (*Agave americana*) y la piña (*Ananas sativus*). Por su parte, Verhagen *et al.* (29) reportan para manzano hojas más horizontales en las capas internas del dosel comparadas con las ubicadas en la parte externa.

Salazar (25) en un estudio sobre las características morfológicas relacionadas con la producción de café encontró que bajo las mismas condiciones de cultivo, las plantas de ramificación tipo plagiogeotrópica (planófila) como la variedad Caturra eran más productivas que las de tipo ortogeotrópica (erectófila).

En la Figura 2 se presenta la distribución de frecuencia de los ángulos foliares de acuerdo a

la disposición y en la planta total, sin discriminar por estrato. No se encontraron diferencias al comparar las dos disposiciones (Figura 2a).

En la Figura 2b se observa la distribución general de los ángulos de inclinación foliar, sin tener en cuenta la disposición, y en la Tabla 2 y la Figura 3 se presenta la fracción de hojas encontradas en las diferentes clases de ángulos, comparada con los valores correspondientes a las distribuciones teóricas propuestas por Goudriaan (12). La prueba de Chi-cuadrado permitió establecer que no existen diferencias significativas ($p < 0,01$) entre las frecuencias observadas y las teóricas de la distribución planófila, mientras que con las demás distribuciones se presentaron diferencias significativas.

En un dosel con hojas predominantemente horizontales, como en el caso de la distribución planófila, la radiación es interceptada rápidamente en los estratos superiores; esta rápida interceptación contribuye a que el régimen de irradiancia sea atenuado y, por consiguiente, de la temperatura dentro de la planta, lo cual puede constituir un factor limitativo para el proceso de fotosíntesis en los estratos inferiores de muchas

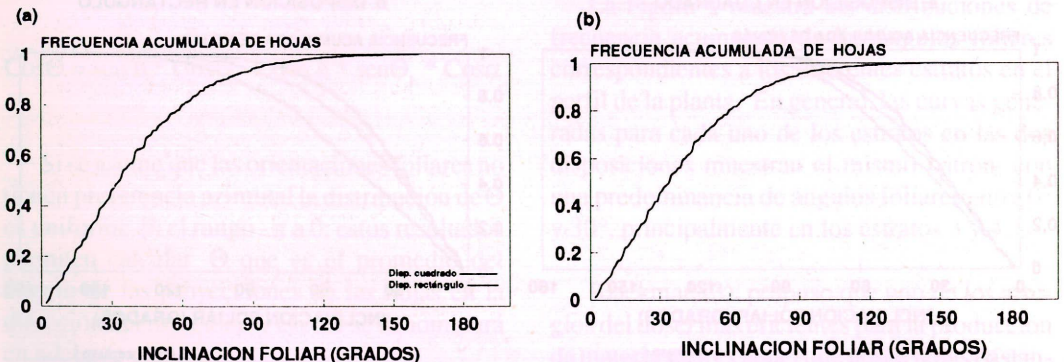


Figura 2. Distribución de los ángulos foliares en *Coffea arabica* L. var. Colombia, según el estrato en el perfil de la planta, en la densidad de 5000 plantas.ha⁻¹, según la disposición (a) y total de la planta (b).

Tabla 2. Distribución de los ángulos foliares en *Coffea arabica* var. Colombia de 3,5 años de edad, comparada con las distribuciones teóricas de Goudriaan (11).

| INCLINACION (Grados) | OBSERVADA | TEORICA | | |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|------------|
| | | PLANOFILA | ESFERICA | ERECTOFILA |
| 0-10 | 0,133 | 0,148 | 0,015 | 0,007 |
| 10-20 | 0,160 | 0,250 | 0,045 | 0,024 |
| 20-30 | 0,159 | 0,217 | 0,074 | 0,045 |
| 30-40 | 0,142 | 0,156 | 0,100 | 0,070 |
| 40-50 | 0,119 | 0,101 | 0,123 | 0,100 |
| 50-60 | 0,090 | 0,061 | 0,143 | 0,133 |
| 60-70 | 0,073 | 0,036 | 0,158 | 0,169 |
| 70-80 | 0,046 | 0,020 | 0,168 | 0,207 |
| 80-90 | 0,032 | 0,011 | 0,174 | 0,245 |
| >90 | 0,046 | - | - | - |
| 0-30 | 0,452 | 0,615 | 0,134 | 0,076 |
| 30-60 | 0,351 | 0,318 | 0,366 | 0,303 |
| 60-90 | 0,151 | 0,067 | 0,500 | 0,621 |
| >90 | 0,046 | - | - | - |

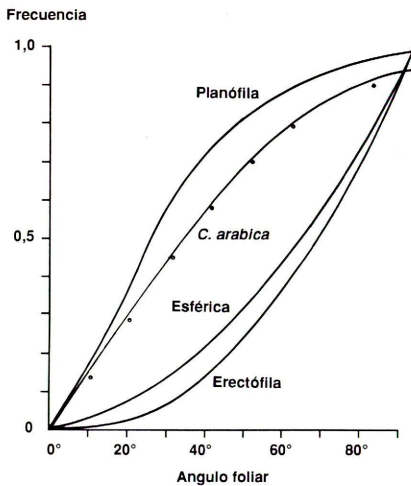


Figura 3. Comparación entre la distribución de los ángulos foliares en *C. arabica* var. Colombia y las distribuciones teóricas. Cenicafé 1993.

plantas. Sin embargo, como el cafeto aparentemente se originó en condiciones de sombra (5), la distribución planófila del follaje podría estar relacionada con la adaptación de la planta a una plena exposición solar que, junto con los factores señalados por Arcila (1) como la atenuación de la radiación incidente por la nubosidad y el mutuo sombrío, permite obtener altas producciones bajo estas condiciones.

Arcila (1) registra además que con el peso de la cosecha y a mayor edad, las ramas se doblan presentándose en la misma planta dos tipos de arquitectura: La original inmodificada en la parte superior de la planta y la modificada predominantemente plagiogeotrópica, en la parte inferior, lo cual puede facilitar la penetración de la luz al interior del dosel.

Por otra parte, la rápida interceptación de radiación en los estratos superiores puede estar compensada, en las densidades de siembra bajas, por la forma semicónica del cafeto que favorece la penetración de luz a las capas más internas, especialmente a la parte inferior en donde la densidad del follaje es mayor. A medida que se incrementa la densidad, la cantidad de hojas en las capas inferiores disminuye hasta prácticamente la ausencia total y la interceptación estará limitada a los estratos superiores de la planta.

Según Arcila (1), dados los altos índices de área foliar del cafeto en densidades de siembra altas (IAF=8 a 10) el ángulo de las ramas, el tamaño y el ángulo de inserción de las hojas podrían modificarse para buscar una óptima captación de luz. Sería interesante establecer si la distribución de los ángulos foliares cambia con el incremento en la densidad de población y con la edad del cultivo.

Coefficientes de extinción (k) teórico para la planta de café. El coeficiente de extinción (k) determina la tasa a la cual la radiación solar es absorbida por unidad de área foliar. Existen diferentes coeficientes de extinción para la radiación directa y difusa.

Los coeficientes de extinción para una distribución foliar planófila como es el caso del cafeto, se pueden estimar con la metodología propuesta por Ross (24).

Inicialmente se calcula X_L , que es un índice de caracterización de la distribución de la inclinación foliar, de acuerdo a la siguiente expresión (24):

$$X_L = \pm \frac{1}{2} \left[\begin{array}{c} \left| \begin{array}{cc} 30^\circ & 30^\circ \\ \sum DTe & - \sum Dc \\ 0 & 0 \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cc} 60^\circ & 60^\circ \\ \sum DTe & - \sum Dc \\ 30^\circ & 30^\circ \end{array} \right| \\ + \left| \begin{array}{cc} 90^\circ & 90^\circ \\ \sum DTe & - \sum Dc \\ 60^\circ & 60^\circ \end{array} \right| \end{array} \right] \dots \ll 1 \gg$$

en donde:

X_L : Índice de caracterización de la distribución de la inclinación foliar.

DTe : Frecuencia de la distribución teórica para la esférica según Goudriaan (12, 13) para diferentes ángulos foliares.

Dc : Frecuencia de la distribución observada en café para diferentes ángulos, determinada por Castillo (7).

Los intervalos (0° a 30°), (30° a 60°) y (60° a 90°) corresponden a las clases de las frecuencias de los ángulos foliares.

Resolviendo la ecuación [1] para la distribución foliar observada en café se obtiene lo siguiente:

$$X_L = \pm \frac{1}{2} \left[\left| 0,134 - 0,452 \right| + \left| 0,366 - 0,351 \right| + \left| 0,500 - 0,151 \right| \right]$$

$X_L = +0,341$, su signo es positivo por ser el último término de la expresión de este signo.

Según Ross (24) cuando el follaje tiene una distribución uniforme, $X_L = 0$; si el follaje tiene solamente hojas horizontales, $X_L = +1$; si tiene solamente hojas verticales, $X_L = -1$. Los valores de X_L para muchos cultivos varía entre -0,11 en centeno y +0,57 en trébol blanco.

Según Goudriaan (10, 11), el promedio de la proyección de las hojas (ϕ) se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\phi = 0,5 - 0,633 X_L - 0,33 X_L^2,$$

(válida para $-0,4 < X_L < 0,6$) ... «2»

Para el café se obtiene un valor de $\phi = 0,2458$

Conocido el valor de ϕ se puede conocer el valor de $\phi\beta$ que es el ángulo promedio de las proyecciones de las hojas para cada elevación solar (β), así:

$$\phi\beta = \phi + 0,877 (1 - 2 \phi) \text{ sen}\beta \quad \dots \text{«3»}$$

$$\phi\beta = 0,2458 + 0,4459 \text{ sen}\beta \quad \dots \text{«4»}$$

Coefficientes de extinción para radiación directa y difusa. El coeficiente de extinción para radiación directa (K_{dir}) calculado para una planta de café con distribución planófila, es el siguiente:

$$K_{dir} = \phi\beta \cdot (\text{sen}\beta)^{-1} \quad \dots \text{«5»}$$

$$K_{dir} \text{ café} = (0,2458 + 0,4459 \text{ sen}\beta) \cdot (\text{sen}\beta)^{-1} \quad \dots \text{«6»}$$

El coeficiente de extinción para radiación difusa (K_{dif}) es el siguiente:

$$K_{dif} = a (1 - \angle)^{0,5} \quad \dots \text{«7»}$$

En donde:

a = Constante

\angle = Coeficiente de dispersión para la mayoría de las hojas (0,20).

Si se varía el ángulo β y se calcula el promedio de $K_{dir}(\beta)$ se obtiene el coeficiente a de la ecuación (7), Tabla 3.

El coeficiente de extinción para la radiación difusa y ajustado a la distribución planófila del café será:

$$K_{difusa} = 0,9314 * (1 - \angle)^{0,5}$$

$$K_{difusa} \text{ para café} = 0,833$$

Tabla 3. Cálculo de K_{dir} en *C. arabica* por variación del ángulo de elevación solar β , para una distribución planófila.

| β | $a = K_{dir}(\beta)$ |
|-----------|----------------------|
| 10° | 1,8614 |
| 20° | 1,1646 |
| 30° | 0,9375 |
| 40° | 0,8283 |
| 50° | 0,7668 |
| 60° | 0,7297 |
| 70° | 0,7075 |
| 80° | 0,6955 |
| 90° | 0,6917 |
| \bar{X} | 0,9314 |

La Tabla 3 implica que cuando la orientación foliar es constante, el coeficiente de extinción cambia con la elevación solar; ésta variación es mucho mayor para plantas con hojas verticales y muy pequeño para plantas con hojas horizontales. En el caso específico del café, el coeficiente de extinción varía entre 1,86 para una elevación solar de 10° y 0,69 para 90° con un valor promedio de 0,93.

Como los coeficientes de extinción observados experimentalmente se desvían de los valores teóricos debido a que las hojas pueden aglomerarse y apartarse de la distribución aleatoria, es necesario un factor de ajuste denominado Factor de Conglomeración (fc):

$$fc = \frac{K_{directa} \text{ medido}}{K_{directa} \text{ teórico}}$$

Para café el K dir medido por Castillo (7) fue de 0,53 y el K dir teórico hallado en el presente trabajo es de 0,931 resultando un factor de conglomeración de 0,57.

Estos coeficientes de extinción teóricos, así como el factor de conglomeración, ajustados para la distribución planófila son necesarios para estimar los niveles de radiación directa y difusa y las correspondientes tasas de asimilación dentro del dosel del café.

LITERATURA CITADA

1. ARCILA P.J. Productividad potencial del café en Colombia. *In*: FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. CENICAFE. 50 años de investigación en café: Conferencias Conmemorativas. Chinchiná, Cenicafé 1992. pp. 105-119.
2. ARCILA P.J.; CHAVES, C.B. Desarrollo foliar del café en tres densidades de siembra. *Cenicafé* 46(1): 5-20 1995.
3. BLACKMAN, V.H. The compound interest law and plant growth. *In*: LIETH, H.F.H. Patterns of primary production in the biosphere Dowden, Hutchinson and Ross, 1978. pp. 231-238 (Benchmark papers in ecology No. 18).
4. BOOTE, K. K.; LOOMIS, R.S. The prediction of canopy assimilation. *In*: MODELING Crop Photosynthesis - from biochemistry to canopy. Madison, Crop Science Society of America, 1991. pp 109-140.
5. CANNELL, M.G.R. Physiology of the coffee crop. *In*: CLIFFORD, M.N. and WILSON, F.C. Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage. West Port, Avi Publishing Company, 1985. pp. 108-134.
6. CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. The description and measurement of plant canopy structure. *In*: RUSSELL, G; MARSHALL, B; JARVIS, P.G. Plant Canopies: Their growth, form and function. Cambridge, Cambridge University Press, 1989. pp. 1-19.
7. CASTILLO, R.E. Interceptación de la radiación solar en cafetales. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, 1995. 108 p. (Tesis Magister Science).
8. CLAYTON, G.; REYNOLDS J.; FERREE, D.C. Influence of orchard management on leaf angle and leaf orientation in apple trees. *Journal of Horticultural Science*, 68:679-687 1993.
9. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. CENICAFE. Proyecto fase reproductiva del café. Experimento FIT 0409. Efecto de la densidad de siembra en la producción de la variedad Colombia. Chinchiná, Cenicafé, Disciplina de Fitotecnia, 1990. 9p. (mecanografiado).
10. GOUDRIAAN, J. Crop micrometeorology: a simulation study. Wageningen (Holanda), Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1977. 249 p. (Simulation Monographs).
11. GOUDRIAAN, J. The bare bones of leaf - angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 43:155-169. 1988.
12. JARAMILLO R., A. Flujos de radiación solar y de energía en cafetales. *Atmósfera* 11:13-24. 1986.
13. JARAMILLO R., A.; RIAÑO, H. N.; ARCILA, P.J.; CHAVES, C. B. Interceptación de la radiación solar en cafetales. *Atmósfera* 18:77-80. 1993.
14. JOHNSON, R.S.; LAKSO, A. Approaches to modeling light interception in Orchards. *Hortscience* 26(8):1002-1004. 1991.
15. LANG, A.R.G.; XIANG, Y. Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 37:229-243. 1986
16. LAKSO, A.N.; MUSSELMAN, R.C. Effects of cloudiness on interior diffuse light in apple trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 101(6):624-644. 1976.
17. MONACO, L.C. Contribuicao dos estudos fisiologicos da producao ao melhoramento. *Ciencia e cultura* 25(3):226-229. 1973.
18. MONTEITH, J.L. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany* 29(113): 17-37 1965.

19. NOBEL, P.S.; LONG, S.P. Canopy structure and light interception. *In*: COOMBS, J.; HALL, D.O.; LONG, S.P. SCURLOCK, J.M. Techniques in bioproductivity and photosynthesis. 2 ed. London, Pergamon Press, 1986. pp 41-49.
20. NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. *In*: PEARCY, R.W; EHLERINGER, J.R; MODNEY, H.A.; RUNDEL, P.W. Plant physiological ecology field methods and instrumentation. London, Chapman and Hall, 1989. pp. 301-325.
21. OROZCO, C.F.J. Estudio genético del carácter erecta en plantas de la variedad caturra *C. arabica* L. *Cenicafé*. 28(3):75-81. 1977.
22. REFFYE, P DE; SNOECK, J.; JAEGER, M. Modelisation et simulation de la croissance et de L'architecture du cafeier. *In*: COLLOQUE Scientifique International sur de café, 13. Paipa (Colombia), Auot 21-25, 1989 Paris, Association Scientifique International du café - ASIC, 1989. pp. 523-554.
23. ROSS, J. Radiative transfer in plant communities *In*: MONTEITH J.L. Vegetation and the atmosphere. Vol. 1, London Academy Press, 1975. pp. 13-55.
24. ROSS, J. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk Publishers, The Hague, 1981. 391 p. (Tasks for Vegetation Sciences No. 3).
25. SALAZAR, A.N. Análisis de factores morfológicos relacionados con la producción en cinco variedades de café de porte bajo. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1988. 98p. (Tesis Magister Scientiae).
26. SHIBLES, R. Crop physiology. Iowa, Iowa State University IDWA, 1983.
27. SNOECK, D. Simulation de la croissance de cinq cultivars *Coffea arabica* L. par l'analyse des cimes. *Cafe, Cacao, Thé* 35 (3): 117-1990. 1991.
28. VALENCIA, A.G. Relaciones entre el índice de área foliar (IAF) y la productividad del cafeto. *Cenicafé*, 24(4):79-89. 1973.
29. VERHAGEN, A.M.W.; WILSON, J.H.; BRITTEN, E.J. Plant production in relation to foliage illumination. *Annals of Botany*, 27(108):627-640. 1963.
30. WIT, C.T. DE Photosynthesis of leaf canopies Agric. Wageningen, Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1965. 57 p.