

DESARROLLO FOLIAR DEL CAFETO EN TRES DENSIDADES DE SIEMBRA

Jaime Arcila-Pulgarín * ; Bernardo Chaves-Córdoba **

RESUMEN

ARCILA P., J.; CHAVES C., B. Desarrollo foliar del cafeto en tres densidades de siembra. *Cenicafé (Colombia)* 46(1): 5 - 20. 1995.

En Cenicafé, Chinchiná, Colombia se observó el desarrollo foliar de *Coffea arabica* L. var. Colombia en densidades de 2.500, 5.000 y 10.000 pl.ha⁻¹, durante 19 trimestres, con base en el Número de Hojas (NH), Área Foliar (AF) y las variables derivadas, Índice de Área Foliar (IAF), y duración del área foliar (DAF). La función logística describió mejor el comportamiento de estas variables en función de la edad y del tiempo térmico. Los máximos valores de área foliar alcanzados fueron 23,4; 19,6 y 9,1 m² a los 56, 53 y 43 meses, respectivamente para las tres densidades. El tamaño promedio de las hojas disminuyó con la edad. El índice de área foliar varió con la edad y la densidad; se observaron valores máximos de 9,8; 9,1 y 5,8 respectivamente para 5.000, 10.000 y 2.500 pl.ha⁻¹. El desarrollo foliar descrito en función del tiempo térmico mostró tendencias similares y las máximas tasas brutas de crecimiento del AF y del IAF se obtuvieron con 9.302, 8.859 y 7.079 grados días acumulados, respectivamente, para las densidades 2.500, 5.000 y 10.000 pl.ha⁻¹. La máxima duración del área foliar correspondió a la densidad de 5.000 pl.ha⁻¹. No hubo correlación significativa entre el desarrollo foliar y la producción de café cereza.

Palabras claves: *Coffea arabica* L., fisiología, área foliar, índice de área foliar, duración de área foliar, grados-día, tiempo térmico, logística.

ABSTRACT

Foliage development of *Coffea arabica* L. var. Colombia in planting densities of 2.500, 5.000 and 10.000 trees.ha⁻¹, was observed quarterly during 57 months, in Chinchiná, Colombia. The evaluations included number of leaves (LN), Leaf Area (LA) and the derived variables Leaf Area Index (LAI) and Leaf Area Duration (LAD). The logistic function described adequately the behavior of these variables in relation to age and thermal time. The maximum values of LA obtained were 23.4, 19.6 and 9.1 m² and the time required to reach these maxima was 56, 53 and 43 months respectively for the three densities. The average LA decreased with age at all densities. LAI varied with age and planting density and reached values of 9.8, 9.11 and 5.84 respectively, for the 5000, 10000 and 2500 pl.ha⁻¹ densities. Foliar development in relation to thermal time followed similar tendencies. The maximum absolute growth rates of LA and LAI were obtained when 9302, 8859 and 7079 degree days had accumulated, respectively for 2.500, 5.000 and 10.000 pl.ha⁻¹. Maximum LAD was observed at a density of the 5.000 tree.ha⁻¹. There was no significant correlation between LA, LAI and coffee berry yield.

Keywords: *Coffea arabica* L., Leaf Area, Leaf Area Index, Leaf Area Duration, Degree-days, thermal time, logistic.

* Investigador Principal I. Fisiología Vegetal. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná Caldas, Colombia.

** Investigador Científico II. Biometría. Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

El potencial de producción de la planta está determinado fundamentalmente por la superficie foliar disponible para la asimilación del carbono a través de su ciclo de vida. La cosecha obtenida es el resultado del tamaño, eficiencia y duración de esta superficie fotosintética, y de la redistribución de los fotosintetizados.

Son pocos los estudios sobre el desarrollo foliar del café. En plantas jóvenes, los aspectos considerados comprenden seguimientos de la tasa de crecimiento de hojas individuales, de la tasa de aparición de hojas en ramas individuales o crecimiento del área foliar (9,13). El desarrollo foliar de plantas adultas ha sido el menos estudiado especialmente en relación con la edad de la planta, ya que en la mayoría de los casos, este sólo se ha considerado puntualmente o para períodos muy cortos (2,5,7,9,13, 17,18,21,24,29,30,31). En Colombia, Valencia (29) estudió el desarrollo foliar en *C. arabica* L. variedad Caturra, en tres densidades de siembra durante 4 años y encontró que éste era mayor en las menores densidades y viceversa.

El Índice de Área Foliar (IAF) es un importante indicador del desarrollo del cultivo, el uso de agua y la productividad. Es una medida que se deriva del conocimiento del desarrollo foliar y se define como el área de la superficie fotosintética que cubre un área dada de terreno, determinada generalmente por la distancia de siembra. La producción de materia seca aumenta con el IAF hasta un óptimo, por encima del cual se produce autosombreamiento, con reducción de la tasa fotosintética y de la tasa de asimilación neta (3,14,22).

Las investigaciones sobre el IAF en plantaciones adultas de café adolecen de las mismas limitaciones anotadas para el desarrollo del área foliar. Algunos estudios permiten sugerir que el café puede alcanzar valores de IAF cercanos a 10 (13,18), aunque no existe claridad acerca de los valores óptimos y máximos de IAF, debido a que las investigaciones realiza-

das hasta el momento no han tenido la suficiente duración para definirlos. Según Valencia (29), el IAF óptimo para *C. arabica* variedad Caturra es de 8, el cual puede ser alcanzado a los tres años después de la siembra con 10.000 plantas por hectárea, o a los cuatro años con 5.000 plantas por hectárea.

Cuando se integran los valores del IAF sobre un período de tiempo se obtiene la variable Duración del Área Foliar (DAF), un índice de la extensión y duración del sistema de interceptación de luz de la planta, desde sus primeros estados de desarrollo hasta que se alcanza el máximo IAF (12). Este aspecto ha sido también muy poco estudiado en la planta de café.

La modelación de la dinámica del desarrollo foliar de los cultivos es esencial para el desarrollo de modelos de predicción de la producción. La dinámica foliar está controlada por factores genotípicos y ambientales (6,11,20). Sin embargo, en las condiciones colombianas, predomina un genotipo específico y puede decirse que el desarrollo foliar está influenciado principalmente por las condiciones ambientales.

Bajo condiciones óptimas, la luz y la temperatura son los factores del medio ambiente que influyen directamente sobre las tasas de crecimiento foliar. La intensidad de la luz determina la tasa de fotosíntesis y por consiguiente el suministro de asimilados para la hoja. La temperatura afecta las tasas de división y expansión celular. Desde el punto de vista de modelación es importante expresar el desarrollo foliar en función del tiempo térmico, lo cual permite separar el efecto de la temperatura sobre el crecimiento foliar en el campo, donde ésta y otros factores varían simultáneamente (20).

Conocer los diferentes aspectos del desarrollo foliar a través del tiempo en cultivos perennes como el café, permite determinar el poten-

cial de producción y estructura del dosel que interviene en la interceptación de luz, la fotosíntesis y la modelación del cultivo. Asimismo, el IAF es una variable indispensable en estudios sobre los procesos físicos y biológicos del dosel para determinar las condiciones de manejo más adecuadas del cultivo, desde el punto de vista de interceptación de luz y eficiencia fotosintética (6,11,14,19,22,32).

En este estudio se presentan los resultados sobre la evolución del desarrollo foliar y el IAF en *C. arabica* L. variedad Colombia y se propone el modelo logístico para modelar su comportamiento con la edad y también en función del tiempo térmico.

MATERIALES Y METODOS

Localización. El estudio se realizó en la Estación Central Naranjal de Cenicafé, localizada a 04° 58' Lat. N., 75° 42' Long. Oeste, 1400 m.s.n.m., con un promedio de precipitación de 2.700 mm anuales, temperaturas de 26,8°C máxima, 20,6°C media y 16,2°C mínima; humedad relativa 75% y brillo solar de aproximadamente 1.866 horas - año. Con suelos derivados de ceniza volcánica, typic dystrandep (10,16).

Material Vegetal. Se utilizaron plantas de *Coffea arabica* L. variedad Colombia sembradas en Febrero de 1985 en parcelas con las siguientes distancias de siembra entre plantas y surcos: 2 x 2m, 1,42 x 1,42m y 1 x 1m, que corresponden a densidades de 2.500, 5.000 y 10.000 plantas.ha⁻¹, respectivamente. En estas parcelas se escogieron 4 surcos de 8 plantas y en cada surco se señaló una planta para hacer las mediciones.

Evaluación de las variables de la planta. Durante 19 trimestres, se contó el Número de Hojas (NH) y se midió el Área Foliar (AF) en las 4 plantas señaladas en cada una de las distancias de siembra. El área foliar se midió directamente en el campo mediante una regla diseñada

con base en la fórmula desarrollada por Valencia (29):

$$\log A = 2,02501 \log L - 0,57278$$

en donde :

A = Área de la hoja

L = Longitud de la hoja.

Para obtener el área foliar total de la planta se midió el área de las hojas de un lado de todas las ramas de la planta, incluyendo las secundarias y terciarias, y se multiplicó por 2 este valor, excepto en aquellos casos donde solo existía una hoja, (29).

A partir de las mediciones de área foliar se derivó la variable Índice de Área Foliar (IAF) la cual se define como el cociente entre el área foliar de la planta en un momento dado y el área de terreno destinada a la misma y que a su vez está determinada por la distancia de siembra.

Otra variable derivada fue la duración del área foliar (DAF) que es el valor integrado del IAF sobre un período de tiempo (t). Se calculó mediante la siguiente expresión (12):

$$DAF = \int_1^{19} \frac{A}{(1 + B e^{-Cx})} dt$$

en donde :

A, B, C = Corresponden a los parámetros de la función logística que se presentan en Resultados y Discusión.

Se llevaron además registros de producción de las 8 plantas de cada surco.

Evaluación de las variables del clima. Para el tiempo térmico se consideraron los registros de temperatura de la estación climatológica ubicada a 100 m del sitio experimental.

El tiempo térmico se calculó mediante la siguiente función (20):

$$TT = \sum_{i=1}^{19} (T_m - T_b)$$

en donde :

- $(T_m - T_b)$ = Unidad Térmica (UT).
- T_m = Temperatura media diaria
- T_b = Temperatura base (mínimo de temperatura donde no crece la planta, 10°C para café)

Análisis. Para determinar el comportamiento del desarrollo foliar en función del tiempo cronológico o de las unidades térmicas acumuladas, a los datos sobre el Número de Hojas (NH) y el Área Foliar (AF) observados y aquellos derivados como el Índice de Área Foliar (IAF) y duración del Área Foliar (DAF) se les ajustó la función logística (25):

$$Y_t = \frac{A}{1 + B e^{-Ct}} + e_t$$

en donde :

- Y_t = Número de hojas, área foliar o índice de área foliar en el tiempo t
- A = Máximo desarrollo foliar (capacidad o población máxima)
- B = Constante de integración
- C = Tasa promedio de crecimiento
- e_t = Errores aleatorios en el tiempo t
- t = Tiempo

Para el análisis con el tiempo térmico, basta reemplazar la variable t de la función logística

por el número de unidades térmicas acumuladas (TT) en cada punto de observación.

En general, esta función se ajustó mejor a los datos que las de Von Verthalanfi, Gompertz y logística generalizada ya que presentó menor error cuadrático medio, razón por la cual fue utilizada para la descripción de las observaciones.

Las tasas brutas de crecimiento se obtuvieron mediante la expresión:

$$TB = \frac{C}{A} (AY - Y^2)$$

en donde,

- C, A = Coeficientes de la función logística
- Y = Valor de la variable NH, AF ó IAF

RESULTADOS Y DISCUSION

Número de Hojas. En la Figura 1A se observa el número de hojas en función del tiempo, en cada una de las densidades. Al ajustar la curva logística de crecimiento se obtuvieron los valores estimados de los coeficientes de la función que se muestran en la Tabla 1.

En las plantas, desde los estados iniciales de desarrollo hasta los 18 meses, se observa un crecimiento lento del número de hojas, similar para todas las distancias. A partir de este momento el desarrollo foliar es exponencial y cambia de acuerdo a la densidad, encontrándose un menor número de hojas para la densidad de 10.000 plantas.ha⁻¹, intermedio para 5.000 plantas.ha⁻¹ y mayor para la densidad de 2.500 plantas.ha⁻¹. Las edades en que se presentaron los puntos de inflexión en las curvas fueron diferentes en las tres densidades de siembra: 34,

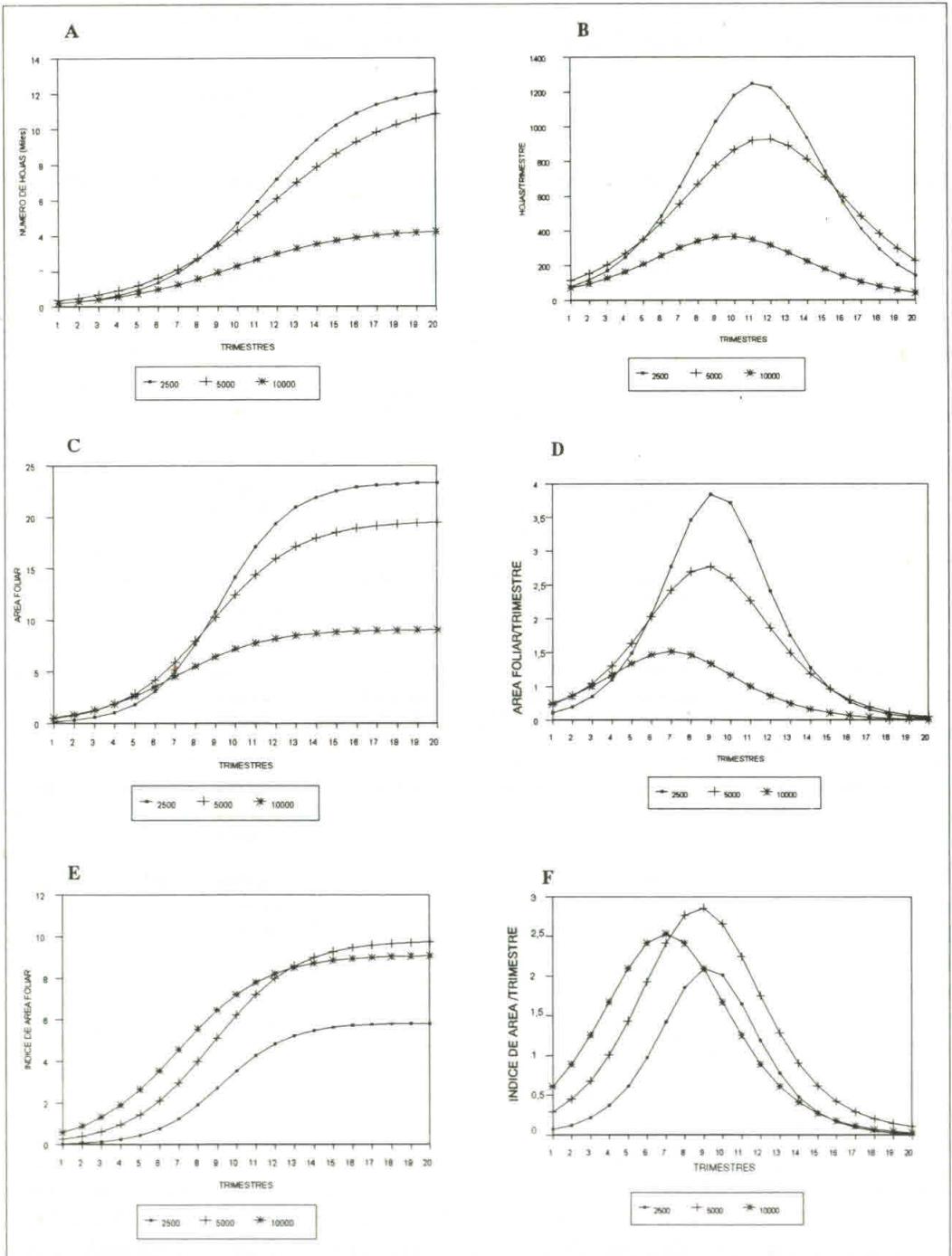


Figura 1. Comportamiento del número de hojas (A), el área foliar (C), el índice de área foliar, (E) y tasas brutas de crecimiento (B,D,F) de estas variables, en tres distancias de siembra según la edad de la planta.

TABLA 1. Parámetros estimados de la función logística para las variables número de hojas, área foliar e índice de área foliar según la edad de la planta. Cenicafé, Chinchiná, Caldas.

Variable	Densidad Pl.ha ⁻¹	Parámetros Estimados	Interv. de Confianza 95%		Error Estandar Asimptótico	R ²	RCME			
			Lím. Inferior	Lím Superior						
N. H.	2.500	A	124845,3300	11548,6600	13422,0033	441,8469	0,9962	471,1403		
		B	90,9563	32,4440	149,4686	27,6015				
		C	0,4013	0,3321	0,4706	0,0326				
	5.000	A	11603,7286	10342,3887	12865,0684	595,0011			0,9956	437,6184
		B	42,2507	21,1459	63,3556	9,9556				
		C	0,3206	0,2605	0,3807	0,0283				
	10.000	A	4371,2531	3900,3511	4842,1550	222,1346			0,9910	295,2276
		B	18,7039	6,0024	31,4054	5,9916				
		C	0,3378	0,2412	0,4344	0,0456				
A. F.	2.500	A	23,4016	22,1949	24,6082	0,5692	0,9955	1,1463		
		B	204,6671	-7,5689	416,9031	100,1163				
		C	0,5750	0,4566	0,6933	0,0558				
	5.000	A	19,5990	18,9510	20,2469	0,3056			0,9985	0,5534
		B	58,8398	33,6304	84,0492	11,8918				
		C	0,4632	0,4099	0,5164	0,0251				
	10.000	A	9,1081	8,4167	9,7995	0,3261			0,9911	0,6901
		B	22,4815	3,0287	41,9344	9,1763				
		C	0,4448	0,3117	0,5778	0,0627				
I.A.F.	2.500	A	5,8404	5,5406	6,1403	0,1414	0,9955	0,2858		
		B	207,5179	-7,8707	422,9065	101,6034				
		C	0,5770	0,4583	0,6956	0,0560				
	5.000	A	9,8000	9,4759	10,1240	0,1529			0,9985	0,2767
		B	58,8256	33,6232	84,0281	11,8885				
		C	0,4631	0,4099	0,5164	0,0251				
	10.000	A	9,1081	8,4167	9,7995	0,3261			0,9911	0,6901
		B	22,4862	3,0296	41,9427	9,1781				
		C	0,4448	0,3118	0,5778	0,0628				

A=Máximo desarrollo foliar o asíntota, B=Constante de integración; C=Tasa de crecimiento; RCME=Raíz cuadrada del cuadrado medio del error. N.H.= Número de Hojas ; A.F.= Área Foliar ; I.A.F.= Índice de Área Foliar

35 y 26 meses para 2.500, 5.000 y 10.000 plantas. ha⁻¹ respectivamente.

Al analizar los valores de la asíntota (A), Tabla 1, se observa que estos cambian según la distancia de siembra y el mayor valor se

encuentra para la densidad de 2.500 plantas, el intermedio para 5.000 plantas y el menor para la densidad de 10.000 plantas. Estas diferencias en desarrollo foliar se deben al efecto de la densidad de siembra sobre la tasa de crecimiento del número de hojas, Figura 1B; en esta

Figura se observa que al aumentar la densidad de siembra, la tasa de crecimiento foliar por árbol disminuye y que al inicio y al final de las evaluaciones, la tasa de crecimiento es menor que en las evaluaciones intermedias debido a que logra su valor máximo en el tiempo en que se presenta el punto de inflexión.

En la Tabla 2 se muestra el máximo desarrollo foliar teórico que se obtendría en una hectárea de café y que se estaría logrando con densidades entre 5.000 y 10.000 plantas.ha⁻¹.

El desarrollo foliar medido por el número de hojas tiene limitaciones desde el punto de vista fisiológico al no considerar las variaciones en tamaño de la hoja que se presentan en la planta por diferencias en edad y exposición a la luz solar (12,14).

Area Foliar. El desarrollo del área foliar (m²) en cada densidad se presenta en la Figura 1C y 1D. De igual manera que con el número de hojas, se ajustó el modelo de la función logística a la información y se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla 1. Este desarrollo presenta tres etapas características; durante los primeros 18 meses el desarrollo es lento, entre los 18 y 36 meses hay un incremento exponencial del área foliar y a partir de los 36 meses el desarrollo es lento de nuevo, hasta alcanzar un valor máximo de estabilización.

TABLA 2. Desarrollo foliar estimado de una hectárea de café. Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia.

Densidad Plantas.ha ⁻¹	Número de Hojas	
	Planta	ha
2.500	12.521	31.302.500
5.000	11.623	58.115.000
10.000	4.365	43.650.000

Este comportamiento fue similar para las tres densidades y en la densidad de 10.000 plantas.ha⁻¹ el desarrollo del área foliar fue más lento.

Al considerar los puntos de inflexión, se observa un aumento en la tasa de desarrollo del área foliar hasta los 35, 29 y 14 meses respectivamente, para las densidades de 2.500, 5.000 y 10.000 plantas.ha⁻¹. A partir de estos, la tasa de crecimiento disminuye, y los tiempos en los cuales se presentaron los puntos de inflexión fueron menores a los encontrados para el número de hojas, debido a que la variable área de la hoja involucra varios tamaños, correspondientes a diferentes edades y exposiciones a la luz. Estas condiciones se presentan en la planta en todo momento (2,15).

Durante los primeros 18 meses, el desarrollo foliar fue similar en las tres densidades de siembra, Figura 1C. Posteriormente, durante la fase lineal de crecimiento ocurre un cambio en el desarrollo del área foliar, el cual resulta mayor en la densidad de 2.500 plantas.ha⁻¹, menor en la densidad de 5.000 e inferior en la densidad de 10.000. Es decir, que al aumentar la densidad de siembra, el desarrollo foliar disminuye, de manera similar al comportamiento de la producción por planta, con relación a la distancia de siembra (27,28). Como resultado de estas diferencias en las tasas de crecimiento del área foliar según la distancia de siembra, se obtienen variaciones en el área foliar máxima que alcanzan las plantas, Figura 1C. Los máximos valores de área foliar obtenidos, indicados por la asíntota, fueron 23,4; 19,6 y 9,1 m² para las densidades de 2.500, 5.000 y 10.000 plantas respectivamente. Este desarrollo foliar máximo se presenta a los 56, 53 y 43 meses.

La presente información permite sugerir la existencia de dos tipos de competencia en las plantaciones de café. Una competencia dentro de la planta, debido a la arquitectura del dosel

y otra entre plantas. En condiciones de cultivo, se presenta el primer tipo o una interacción entre las dos, dependiendo de la distancia de siembra. En densidades por debajo de 5.000 plantas.ha⁻¹, con igual distancia entre surcos y entre plantas, predomina la competencia interna en la planta. Por encima de 5.000 plantas, independientemente de la distancia de siembra, se presentará la interacción entre los dos tipos de competencia que trae como resultado limitaciones en el desarrollo foliar y por consiguiente en el potencial de producción de la planta (12,14,19).

Sin embargo, en la práctica y a corto plazo, esta limitación en el desarrollo foliar se compensa con el mayor número de plantas por hectárea, como lo sugieren los datos de la Tabla 2. A largo plazo esta competencia implica una menor duración del cultivo (12,14,32).

La competencia dentro de la planta se pone de manifiesto a partir del punto de inflexión, cuando la tasa de crecimiento pasa a ser decreciente debido posiblemente, a un proceso de autocompetencia por luz (12,14,15) el cual va limitando el desarrollo foliar posterior hasta alcanzar un umbral de equilibrio.

Otros procesos de desarrollo de la planta que compiten por elementos fotosintetizados como la fructificación, formación de raíces, elongación y maduración de ramas y tallos, también juegan un papel importante en este fenómeno (1,2,5,15).

La competencia entre plantas está determinada fundamentalmente por la densidad de siembra y la edad de la plantación (4,12,27,28). Durante los primeros 18 meses el desarrollo foliar fue similar en las tres densidades de siembra. A partir de este momento, la competencia, especialmente en la densidad de 10.000 plantas. ha⁻¹, es más acentuada. El efecto de este fenómeno de competencia se manifiesta principalmente como una disminución del va-

lor en el punto de inflexión de la curva, en la disminución de las tasas de crecimiento, la menor duración de la fase lineal de la curva, un menor desarrollo foliar y el deterioro rápido del cultivo.

Debido a que en la densidad de 2.500 pl. ha⁻¹ sólo se presenta la competencia dentro de la planta, el mayor desarrollo foliar observado en la densidad de 2.500 plantas puede considerarse como el máximo potencial de la planta de café para variedades de porte bajo tipo "caturra" y en las condiciones del estudio, las cuales son calificadas en Colombia como óptimas para el crecimiento del cafeto. En la densidad de 5.000 plantas se alcanza un máximo de hojas inferior en un 16,2% al de la densidad de 2.500, lo cual sugiere que, con esta distancia de siembra ya se presenta competencia de cierto grado entre las plantas. En la densidad de 10.000 plantas, el menor desarrollo foliar por planta alcanzado en el punto máximo, un 53,5% menos que en 5.000 y 61% menos que en 2.500, confirma la presencia de un grado alto de competencia entre las plantas.

Variación del área promedio de la hoja con la edad. El tamaño promedio alcanzado por las hojas para cada distancia de siembra se presenta en la Figura 2. El análisis de regresión simple de estos datos mostró una tendencia lineal, altamente significativa a la disminución del tamaño promedio de la hoja con la edad de la planta. Los coeficientes de determinación fueron de 0,86; 0,97 y 0,96 respectivamente, para las densidades de 2.500, 5.000 y 10.000 plantas. El promedio máximo observado estuvo entre 29 y 32 cm².hoja⁻¹ y el mínimo entre 19 y 22 cm².hoja⁻¹.

En la densidad de 10.000 plantas por hectárea la disminución del tamaño fue menor que en las otras dos distancias. Para los 19 trimestres de observación se encontró un promedio de reducción del tamaño de la hoja entre 30 y 35% aproximadamente, aunque esta reducción del

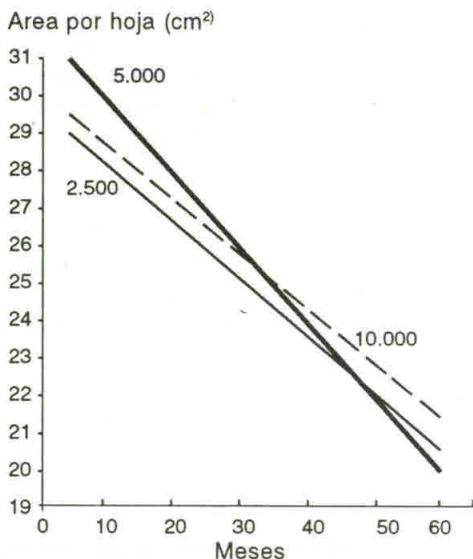


Figura 2. Área promedio (cm²) de las hojas según la edad y la distancia de siembra.

tamaño puede ser compensada por el número de hojas. La disminución del tamaño de la hoja con la edad de la planta, puede explicarse por el efecto de competencia del crecimiento reproductivo y de los tejidos senescentes (ramas, tallo) de la planta.

Índice de Área Foliar (IAF). El área foliar es un indicador del desarrollo del follaje de la planta y de su potencial de producción; sin embargo, desde el punto de vista de productividad del cultivo, es también de importancia conocer el grado de cobertura del terreno con hojas, que permita la mayor interceptación de luz, para lo cual el Índice de Área Foliar (IAF) es el mejor indicador. El IAF es una medida derivada a partir del área foliar y en este estudio se ha definido como el cociente entre el área foliar de la planta y el área de terreno destinada a esa planta, dada por la distancia de siembra.

En la Figura 1E se presenta la evolución del IAF a través del tiempo, en cada una de las distancias de siembra. Como en el caso del área foliar, la función logística permite una descripción adecuada del comportamiento de esta va-

riable, Tabla 1. Se observa inicialmente una evolución lenta del IAF, seguida de una fase de crecimiento exponencial y luego por una fase de crecimiento decreciente, hasta alcanzar un punto de estabilización.

En la Tabla 1 se presentan los valores estimados de los parámetros de la función logística. Desde el comienzo de las evaluaciones hasta los 36 meses se observa una variación del IAF de acuerdo con la densidad de siembra y se obtiene que a mayor densidad de siembra corresponde un mayor IAF. A partir de este punto, el IAF en la densidad de 5.000 fue mayor que en la densidad de 10.000. El IAF en la densidad de 2.500 plantas.ha⁻¹ fue siempre inferior con relación a las otras densidades. Los puntos de inflexión son los mismos que para la variable AF ya que el IAF es función lineal del AF.

Los valores de la asíntota muestran que el máximo IAF de 9,80 se obtuvo con la densidad de 5.000 plantas.ha⁻¹, seguido por la densidad de 10.000 plantas.ha⁻¹ con 9,11. En la densidad de 2.500 plantas.ha⁻¹, se observó el menor IAF con un valor de 5,84. Estos valores se diferencian de los reportados por Valencia (29) para la variedad Caturra en la misma localidad. En esta variedad el máximo IAF fue 8 y para la densidad de 10.000 plantas, a los tres años.

Al examinar la tasa de crecimiento del IAF, Figura 1F, se observa que la mayor tasa de crecimiento del IAF se logra con 5.000 plantas.ha⁻¹ seguido por la densidad de 10.000 y luego por la 2.500 plantas.ha⁻¹. Con la densidad de 10.000 plantas.ha⁻¹ se logra más rápidamente el máximo de la tasa de crecimiento del IAF pero éste no es el de la mayor magnitud.

En la Figura 3 se presenta la variación del IAF máximo con relación a la densidad. El análisis de esta información permite visualizar dos comportamientos del IAF del cafeto. En una primera fase la planta crece libremente, sin competencia, alcanza un desarrollo foliar máxi-

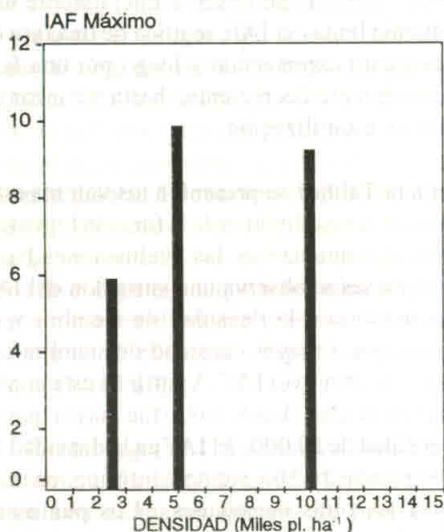


Figura 3. Comportamiento del IAF máximo según la densidad de siembra.

mo y por consiguiente un IAF máximo de acuerdo al área de terreno destinada a ésta. Para variedades de porte bajo como Caturra y Colombia este valor puede obtenerse con densidades entre 5.000 y 10.000 plantas.ha⁻¹. A partir de este punto se tiene una segunda fase, determinada por el grado de competencia interna y externa que tenga la planta y en la cual el IAF máximo tiende a disminuir con el incremento de la densidad.

Los valores máximos de IAF no corresponden necesariamente a una máxima producción de materia seca porque se puede presentar competencia por luz. Según Ballare *et al* (4) una planta individual puede detectar la presencia de plantas vecinas aún antes de que se produzca sombreamiento. Varios autores (12,32) han propuesto el concepto de Índice de Área Foliar Óptimo, como el punto en el cual la tasa de asimilación neta es máxima y cada hoja de la planta contribuye positivamente a incrementos en el peso seco. Este IAF óptimo es inferior al IAF máximo. Los valores de IAF, en otros cultivos, generalmente se presenta en el

rango entre 1 y 12, con valores típicos de 3 a 4 para especies con distribución foliar planofila y mucho más altos, de 5 a 10 para especies con distribuciones foliares de tendencia erectófila o muy conglomeradas (23). Los valores máximos de IAF obtenidos en este estudio y en el de Valencia (29) son altos y sugieren una distribución foliar del segundo tipo. Existe la necesidad de complementar estos estudios, especialmente con referencia a la interceptación de luz en función del IAF.

Desde el punto de vista fisiológico el ideal sería mantener un IAF óptimo en el que predomine la competencia debida a la arquitectura del dosel y sea mínima la competencia entre plantas, como ocurriría en el caso en que se tengan densidades alrededor de 5.000 plantas.ha⁻¹. De esta manera se lograría una mayor duración de la superficie fotosintética y del cultivo, debido a que todas las hojas estarían fotosintetizando para suplir sus propios requerimientos y los de la planta.

Duración del Área Foliar (DAF). Esta variable es una medida de la persistencia de la superficie asimilatoria; no tiene valores instantáneos y se deriva de la integración del IAF sobre todo el período de observación (19 trimestres). En la Tabla 3 se presentan los valores de la DAF, hasta el momento en que ocurre la

TABLA 3. Duración del Área Foliar (DAF) para tres densidades de siembra hasta el punto de máxima tasa de desarrollo (inflexión) y el máximo desarrollo de follaje (asíntota). Cenicafé, Chinchiná, Caldas.

Densidad	DAF (meses) hasta el punto de inflexión	DAF (meses) hasta la asíntota
2.500	7,25	54,55
5.000	14,35	86,01
10.000	13,72	65,72

máxima tasa de crecimiento (punto de inflexión) y hasta el máximo desarrollo del follaje (asíntota). En ambos casos se observa que la mayor duración del área foliar se consigue en la distancia de siembra de 1,42m x 1,42m, confirmando así la hipótesis anterior que alrededor de estas distancias de siembra podría obtenerse el mejor equilibrio de follaje para una mayor duración del cultivo. Si se conoce la tasa media de asimilación neta (TAN), se puede obtener una aproximación de la producción total ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) de materia seca, la cual es el producto de DAF x TAN.

Las tasas máximas de producción de materia seca se obtienen cuando el IAF máximo coincide con una TAN promedio máxima.

Desarrollo foliar en función del tiempo térmico. Se estudió la relación entre las variables número de hojas, área foliar e índice de área foliar y el acumulado de unidades térmicas o tiempo térmico durante el período de estudio. La función logística permite una descripción adecuada de la información, Figura 4.

En la Tabla 4 se presentan los parámetros estimados de la función logística para las variables, en función del tiempo térmico. El comportamiento es similar, Figura 4A, 4C, y 4D, al observado con la edad de la planta, Figura 1.

Las tasas de crecimiento del número de hojas variaron entre 0,1 y 1,3 hojas por grado-día y para el área foliar y el IAF entre $4,6 \times 10^{-4}$ y $5,8 \times 10^{-4}$ unidades por grado-día.

Las máximas tasas brutas de crecimiento del área foliar y del índice de área foliar se obtuvieron cuando se habían acumulado 9,302; 8,859 y 7,079 grados -día respectivamente para 2.500, 5.000 y 10.000 $\text{pl}\cdot\text{ha}^{-1}$, Figuras 4D y 4F.

En términos de IAF, se observa un mayor aprovechamiento de la energía térmica entre

las densidades de 5.000 y 10.000 $\text{pl}\cdot\text{ha}^{-1}$ y menor en la densidad de 2.500 $\text{plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$.

En la Tabla 5 se muestra el máximo desarrollo foliar alcanzado por planta y por hectárea, y el tiempo y grados-día acumulados durante el período del estudio. Aunque en la planta existe una tendencia a que se presente una mayor acumulación de follaje por grado día a medida que disminuye la densidad, esta tendencia se invierte al considerar el IAF y muestra que con altos índices de área foliar hay mayor utilización de la energía.

En condiciones ambientales donde se tiene un adecuado suministro de agua, el desarrollo foliar de la planta puede ser mejor explicado, cuando se considera el tiempo térmico en vez del tiempo cronológico, ya que el crecimiento está directamente relacionado con la disponibilidad de energía (6,11,20). En la localidad donde se realizó el estudio se cumple esta condición y esto explica en parte la correlación alta encontrada entre el desarrollo foliar y los grados-día acumulados. La expresión del desarrollo foliar en función del tiempo térmico, es además de gran utilidad para la simulación del desarrollo foliar y su validación en diferentes ambientes, al permitir relacionar la energía térmica disponible en cada ambiente con el desarrollo de la planta, en ese ambiente particular.

Relación Follaje - Producción. Para el análisis de la relación entre la cantidad de follaje y la producción, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones.

- En las condiciones de la zona donde se realizó el estudio, hay formación de hojas durante todo el año, con dos períodos de mayor intensidad de crecimiento: Marzo - Abril y Septiembre - Octubre (1,10,16).
- En el área de estudio se presentan dos períodos importantes de floración: Enero-Marzo

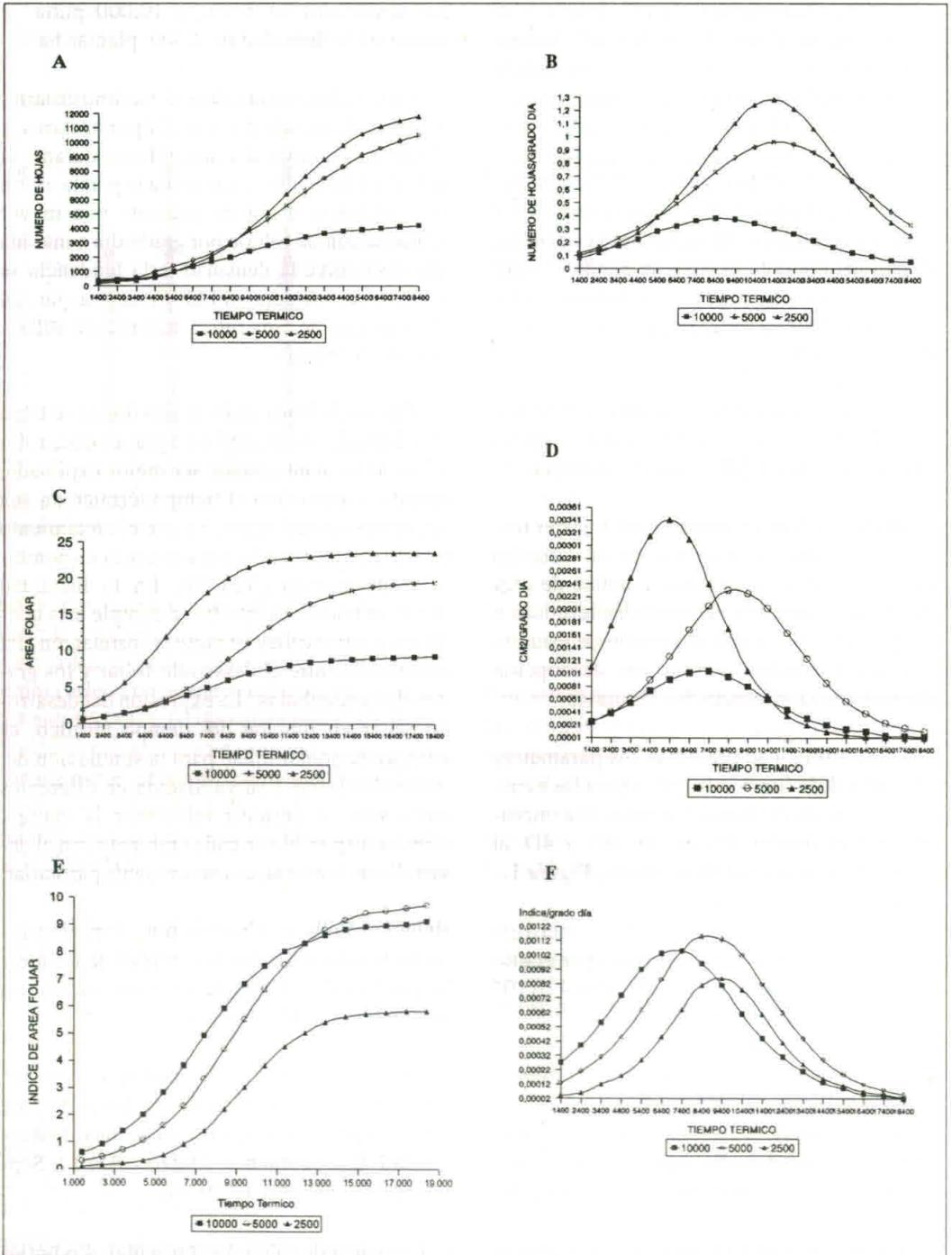


Figura 4. Evolución y tasas de crecimiento del número de hojas (A y B), el área foliar (C y D) y el índice de área foliar (E y F) en función del tiempo térmico y según la distancia de siembra.

TABLA 4. Parámetros estimados de la función logística del número de hojas, área foliar e índice de área foliar en función del tiempo térmico. Cenicafé, Chinchiná, Caldas.

Variable	Densidad Pl.ha ⁻¹	Parámetros Estimados	Intervalos de Confianza 95 %		Error Estandar Asimptótico	R ²	RCME	
			Lím. Inferior	Lím. Superior				
N.H.	2.500	A	12484,54441	11540,80680	13428,28190	445,181300	0,9962	472,0600
		B	10,51076	34,12990	170,89150	32,256700		
		C	0,00041	0,00034	0,00048	0,000034		
	5.000	A	11622,32376	10316,74660	12927,90090	615,868800	0,9955	445,9400
		B	46,37500	22,06220	70,68770	11,468800		
		C	0,00033	0,00027	0,00039	0,000030		
	10.000	A	4361,75380	3890,36850	4833,13920	222,362600	0,9908	298,2300
		B	20,91430	5,98970	35,83890	7,040300		
		C	0,00035	0,00025	0,00045	0,000047		
A.F.	2.500	A	23,4254000	22,2321000	24,6188000	0,562900	0,9957	1,1237
		B	229,2248000	-6,5760000	464,5072000	110,987800		
		C	0,0005837	0,0004671	0,0007000	0,000055		
	5.000	A	19,6029000	18,9541000	20,2519000	0,306100	0,9985	0,5519
		B	66,3012000	37,7152000	94,8872000	13,484600		
		C	0,0004734	0,0004199	0,0005270	0,000025		
	10.000	A	9,0826000	8,3975000	9,7677000	0,323200	0,9911	0,6928
		B	26,5885000	2,2750000	50,9021000	11,460100		
		C	0,0004634	0,0003240	0,0006026	0,000066		
I.A.F.	2.500	A	5,8462000	5,5497000	6,1428000	0,139900	0,9957	0,2806
		B	232,5634000	-6,0254700	471,1522000	112,547500		
		C	0,0005858	0,0004689	0,0007027	0,000055		
	5.000	A	9,8021000	9,4776000	10,1265000	0,153000	0,9985	0,2760
		B	66,2747000	37,6958000	94,8535000	13,4081200		
		C	0,0004734	0,0004198	0,0005270	0,000026		
	10.000	A	9,0829000	8,3977000	9,7683000	0,323300	0,9911	0,6901
		B	26,5726000	2,2784000	50,8667000	11,460100		
		C	0,0004633	0,0003240	0,0006024	0,000066		

A = Máximo desarrollo foliar o asíntota, B=Constante de integración; C=Tasa de crecimiento;

RCME = Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

N.H. = Número de Hojas ; A.F.= Área Foliar; I.A.F.= Índice de Área Foliar

TABLA 5. Desarrollo foliar máximo de cafetos de la variedad Colombia (*Coffea arabica*), en Chinchiná, Caldas, Colombia.

Densidad Pl.ha ⁻¹	Area Foliar Máxima	Indice de Area Foliar Máximo	Tiempo (Meses)	Grados Día Acumulados (Tiemp. térm.)
2.500	23,4	5,8	56,0	17.908
5.000	19,6	9,8	53,0	17.038
10.000	9,1	9,1	43,0	13.593

(80 - 85%) y Agosto-Septiembre (20% ó menos), aunque durante el año se siguen presentando floraciones esporádicas y de pequeña magnitud (1, 26).

- De la floración a cosecha transcurren 8 meses en promedio (10).
- Por las características de floración, en el sitio de estudio se cosecha café prácticamente durante todos los meses del año, y corresponde un porcentaje menor del 20% al primer semestre y un 80% ó más al segundo. (8).
- En cualquier punto del ciclo de vida de la planta se encuentra una cantidad variable de hojas asociada a un número variable de frutos en diferentes estados de desarrollo (1, 26).

Si se tienen en cuenta las anteriores consideraciones, puede verse la dificultad para relacionar el follaje presente en un momento dado y la producción. Sin embargo, se intentaron varias relaciones que se describen a continuación:

En la Figura 5 se muestran las producciones semestrales promedio por planta, obtenidas con cada distancia de siembra.

Al realizar un análisis de correlación lineal simple entre el área foliar y la producción, durante períodos trimestrales, ésta no fue signifi-

ficativa y el coeficiente, de correlación fue menor del 50%. La correlación entre el desarrollo foliar y la producción acumulada tampoco fue significativa.

También se estudió la relación entre el promedio de área foliar y el IAF por planta en el período comprendido entre Marzo-Septiembre y la producción de Agosto-Diciembre del mismo año y de Enero-Julio del año siguiente (Figuras 6 y 7). La correlación lineal no fue

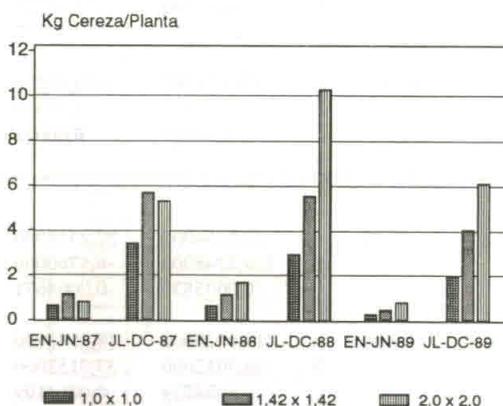


Figura 5. Producción por planta de la variedad Colombia en tres densidades de siembra.

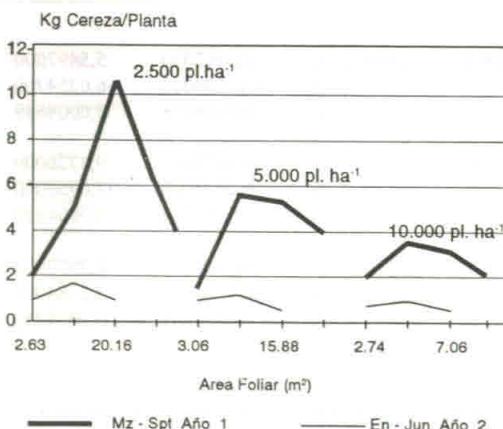


Figura 6. Relación entre la producción para cosecha principal (Agosto-Diciembre) y cosecha de mitaca (Enero-Julio) y el área foliar promedio (Marzo-Septiembre) en tres densidades de siembra.

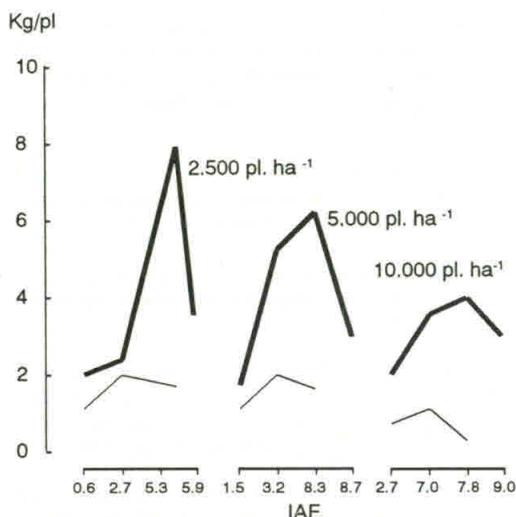


Figura 7. Relación entre el IAF promedio de Marzo Septiembre y la producción para cosecha principal (Agosto-Diciembre) y de mitaca (Enero-Julio)

significativa. Sin embargo se observan algunas tendencias de interés para estudios posteriores. Se destacan dos aspectos:

- La producción tiende a aumentar inicialmente hasta un valor inferior al máximo de AF o IAF observados.
- El comportamiento de la relación es similar en las tres densidades pero su magnitud cambia. Los valores máximos de desarrollo foliar y de producción son mayores en las menores densidades de siembra.

El análisis presentado confirma la dificultad de relacionar cantidad de follaje y producción. Se hace necesario realizar estudios más detallados, con el fin de enfatizar las tendencias aquí observadas.

LITERATURA CITADA

- ARCILA, P.J. Crecimiento y Fenología del café en Colombia. Chinchiná (Colombia), Cenicafe. Disciplina de Fisiología Vegetal, 1991, 46 p. (Mecanografiado).
- ARCILA, P.J. Productividad potencial del café en Colombia. In: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Chinchiná (Colombia). 50 años de CENICAFE. 1938-1988. Conferencias Conmemorativas Chinchiná (Colombia), Cenicafe, 1990. p. 105-119.
- ASHLEY, D.A.; DOSS, B.D.; BENNETT, O.L. Relation of cotton leaf area index to plant growth and fruiting. *Agronomy Journal* (Estados Unidos) 57 (1):61-64. 1965.
- BALLARE, C.L.; SANCHEZ, R.A.; SCOPEL, A.L.; CASAL, J.J.; GHERSA, C.M. Early detection of neighbour plants by phytochrome perception of spectral changes in reflected sunlight. Plant, cell and environment (Estados Unidos) 10 (7):551-557. 1987.
- CANNELL, M.G.R. Production and distribution of dry matter in trees of *Coffea arabica* L. in Kenya as affected by seasonal climatic differences and the presence of fruits. *Annals of Applied Biology* (Inglaterra) 67(1):99-120. 1971.
- CHAPMAN, S.C.; HAMMER, G.L.; PALTA, J.A. Predicting leaf area development of sunflower. *Field Crops Research* (Holanda) 34 (1):101-112. 1993.
- CARVALHO, M.M. de; SOUZA, P de; ABREU, M.S. de. Influencia da densidade plantas na área foliar do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). *Agros* (Brasil) 2(1): 19-28. 1972.
- CASTILLO, Z.J.; MORENO, R.G. La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del café. Chinchiná (Colombia) Cenicafe, 1988. 171 p.
- CASTILLO, Z.J. Ensayo de análisis del crecimiento en café. *Cenicafe* (Colombia) 12 (1):1-16. 1961.
- GOMEZ, G.L. Influencia de los factores climáticos sobre la periodicidad de crecimiento del café. *Cenicafe* (Colombia) 28(1):3-17. 1977.
- HAMMER, G.L. CARBERRY, P.S.; MUCHOW, R.C. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Research* (Holanda) 33 (3):293-310. 1993.
- HARPER, J.L. The limiting resources of the environment. In: *Population Biology of Plants*. New York (Estados Unidos), Academic Press, 1977. pp 305-345.

13. HUERTA S.,A. Índice de área foliar y su influencia en la capacidad fotosintética del café. *Cenicafé* (Colombia) 13(2):75-84. 1962.
14. JACKSON, J.E. Light Interception and utilization by orchard systems. *Horticultural Reviews* (Estados Unidos) 2:209-267. 1980.
15. JARAMILLO R.,A. Flujos de radiación solar y de energía en cafetales. *Atmósfera* (Colombia) 11:3-24. 1986.
16. JARAMILLO R., A.; VALENCIA A.,G. Los elementos climáticos y el desarrollo de *Coffea arabica* L. en Chinchiná. *Cenicafé* (Colombia) 31(4):127-143. 1980.
17. MIGUEL, A.E.; MATTIELLO, J.B.; FRANCO, C.M. Efeitos de diferentes níveis de desfolha na produção do cafeeiro. In: CONGRESSO Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras 5. Guarapari (Brasil) 18-21. Outubro. 1977. Resumos. Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro do café, 1977 p. 247-248.
18. MONACO, L.C. Variabilidade na area foliar do cafeeiro. *Ciencia e Cultura. Suplemento* (Brasil) 24(6):402. 1972.
19. NORMAN, J.M. y CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: PEARCY, R.W.; MOONEY, H.A., EHLERINGER, J.R. Y RUNDELL, P.W. (eds). *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*. London (Inglaterra), Chapman Hall, 1989. p 301-325.
20. ONG, C.K.; BAKER, C.K. Temperature and leaf growth. In: BAKER, N.R. DAVIES, W.J.; ONG, C.K. *Control of leaf growth*. Cambridge (Inglaterra) Cambridge University Press 1985. p. 175 - 200 (Society for experimental biology seminar series No 27)
21. ORTIZ, E.; SIMON, E. y PINO, M. de los A. Superficie foliar del café *C. arabica* Pierre. variedad Robusta con tres años de plantado. *Cultivos Tropicales* (Cuba) 11 (4):63-76. 1989.
22. ROSENTHAL, W.D. and GERIK, T.J. Radiation use efficiency among cotton cultivars. *Agronomy Journal* (Estados Unidos). 83:655-658. 1991.
23. RUSELL, G.; MARSHALL, B and JARVIS, P.G. Plant canopies: Their growth, form and function. *Society for Experimental Biology Seminar Series:31*. Cambridge University Press, Cambridge (Inglaterra) 1989, 178 p.
24. SNOECK, D. Simulation de la Croissance de Cinq Cultivars *Coffea arabica* L. par l'analyse des cimes. *Cafe, Cacao, The* (Francia) 35 (3):177-190. 1991.
25. SUBIA, C.N. Ajuste de una función logística a la evolución de una población. *Politécnica* (Ecuador) 14(1):251-257. 1989.
26. TROJER, H. The phenological equator for coffee planting in Colombia. In: *Agroclimatological Methods Proceedings of the Reading Symposium*. Paris (Francia), UNESCO, Vol 7. p 107-117. 1968.
27. URIBE, H.A.; MESTRE, M.A. Efecto de la densidad de población y su sistema de manejo sobre la producción de café. *Cenicafé* (Colombia) 31(1):29-51. 1980.
28. URIBE, H.A.; MESTRE, A.A. Efecto de la densidad de población y de la disposición de los árboles en la producción de café. *Cenicafé* (Colombia) 39(2):31-42. 1988.
29. VALENCIA, A.G. Índice de área foliar y productividad del café. *Cenicafé* (Colombia) 24(4):79-89. 1974.
30. VASUDEVA, N.; RATAGERI, M.C. Studies on leaf to crop ratio in two commercial species of coffee grown in India. *Journal of Coffee Research* (India) 11(4):129-136. 1981.
31. VERNALHA, M.M.; GABARDO, J.C.; SILVA, R.P. da; LEAL, J. Foliar área of coffee trees in the state of Parana. *Acta Biologica* (Brasil). 2(1-4):121-131. 1973.
32. VERHAGEN, A.M.W.; WILSON, J.H.; BRITTEN, E.J. Plant production in relation to foliage, illumination. *Annals of Botany* (Inglaterra) 27(108):628-640. 1963