ITEA (2004), Vol. **100V N.° 2,** 97-102

ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN UN CAFETAL (*COFFEA ARABICA* L.) BAJO SOMBRA

Luis Rodríguez Larramendi*,[1], Eduardo Velasco, Noelbis Segura***, Juan Carrazana*, Ramón Medina***

* Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Jorge Dimitrov, GP 2140, Bayamo 85100, Granma, Cuba
email: lrlarra@dimitrov.granma.inf.cu

** Universidad de Granma

*** Estudiante de Física de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

RESUMEN

Se estudió la atenuación de la radiación solar en un cafetal bajo sombra de la especie *Coffea arabica* L., variedad Bourbon de siete años de plantado. Se obtuvieron coeficientes de extinción de la luz altos, entre 1,05 a 2,03, siendo mayores a las 13:00 horas (hora local). La atenuación de la radiación solar se ajustó con buena exactitud al modelo de Weibull. La mayor atenuación de la luz solar se produjo en el tercio superior del dosel donde se acumula el 30% del área foliar.

Palabras clave: Coeficiente de extinción de la luz, *Coffea*, radiación solar.

SUMMARY

ATTENUATION OF GLOBAL SOLAR RADIATION IN A COFFEE (*Coffea arabica* L.) TREE PLANTATION UNDER SHADE

The attenuation of global sun radiation in seven-year-old coffee trees (*Coffea arabica,* L. var Bourbon), grown under shade was studied. Extinction coefficients obtained varied between 1,05 and 2,03, being higher at 13:00 hour (local time). The solar attenuation was fitted exactly to the Weibull model. The higher attenuation of solar radiation was made at the third up level of the canopy where the 30% percent of the leaf area are confined.

Key words: Coefficient of light extinction, *Coffea*, solar radiation.

1. Persona a la que debe remitirse la correspondencia.

Introducción

La eficiencia con que una plantación es capaz de interceptar la radiación solar es uno de los factores determinantes de la productividad de un cultivo (HIKOSAKA *et al.*, 1995; SAUGIER, 1998). En el caso del cafeto, CANNEL (1975) asegura que la distribución de su follaje resulta muy eficiente para la interceptación de la radiación, debido a su carácter planófilo y la arquitectura de su ramificación. Sin embargo, en algunas ocasiones las características del ecosistema pueden influir y hasta limitar esta capacidad de la especie.

JARAMILLO y DOS SANTOS (1980) fueron los primeros en evaluar el coeficiente de extinción *k* de la radiación en el cafeto, obteniendo valores cercanos a 0.4, valores que resultan bajos para una especie planófila (HALL *et al.* 1993; BJÖRKMAN y DEMMING-ADAMS, 1995). Más recientemente CASTILLO-RODRÍGUEZ *et al.* (1997), sobre la base de un modelo teórico, indicaron que para el cafeto los valores de *k* para la radiación directa pueden llegar hasta 1.8 en determinadas condiciones.

Teniendo en cuenta tanto el efecto de la elevación solar, como la posible influencia de las características del estrato sombreador sobre el coeficiente *k*, se realizó un estudió de sus variaciones en un cafetal a distinta hora del día, con el objetivo de determinar el efecto de la hora del día y obtener datos sobre dicho coeficiente en cafetales sombreados.

Materiales y métodos

Las mediciones se realizaron en un cafetal de la especie *Coffea arabica* L. bajo sombra con predominio del tamarindo (*Tamarindus indica,* L.), algarrobo (*Samanea saman),* piñón *(Glyricidia sepium)* y baría *(Cordia).* Se encuentra situado a una altura de 70 msnm en la localidad de "Cerca Blanca", Provincia Granma, Cuba. Tiene siete años de vida y está plantado con la variedad Bourbon a una distancia de 2 m entre hileras y 1 m entre plantas.

La radiación solar se midió con piranómetros instalados sobre una base deslizante acoplada a una guía de 3 m de altura; los registros se tomaron cada 0,40 m desde el punto más alto del follaje hacia abajo y lateralmente cada 0,50 m a partir del eje de la planta y en dependencia del desarrollo de las ramas primarias. Se escogieron al azar siete puntos dentro de la plantación tomándose las evaluaciones a las 10:00, 13:00 y 16:00 horas (hora local), repitiéndose las evaluaciones en tres ocasiones entre abril y mayo de 1996, en días de cielo despejado.

Los intervalos de 0,40 m entre los cuales se evaluó la radiación, dada la altura media de los cafetos (2,40 m), determinaron seis niveles de profundidad dentro del follaje. El perfil vertical de distribución foliar se ajustó por análisis de regresión a la función de distribución de Weibull (YANG *et al.*, 1993) y el coeficiente de extinción se calculó por la Ley de Beer de acuerdo con HALL *et al.*, 1993.

La función de Weibull viene dada por:

$$L = 1\text{-}e((-d_i\text{-}a)/b)^c$$

donde a, b y c son los parámetros del modelo. En este caso se tomó *a* igual a cero, lo que significa que los niveles de referencia para la distancia y el área foliar acumulada coinciden; *Li* es el área foliar acumulada hasta el nivel *i* (desde la parte superior de la planta) estandarizada con relación al área foliar total de la misma planta y *di* es la distancia hasta la posición *i-ésima.* Nótese que *i* toma valores desde 1 hasta 6 y que la estandarización del área foliar con relación al total en el punto de evaluación justifica la estimación directa del área

foliar a partir de la cantidad de hojas del *i-ésimo* nivel. Se asume que el área foliar unitaria es independiente de la posición del estrato.

El cálculo de k se basó en la Ley de Beer (Hall *et al.*, 1993)

$$T_i = e^{-kLi}$$

donde Ti es el valor de la radiación solar en el nivel *i-ésimo*.

El área foliar se determinó en cada uno de los seis niveles de la planta para poder realizar los análisis de regresión con los registros de radiación solar en cada uno de los niveles seleccionados. Para el cálculo, se contaron todas las hojas y se midió la longitud de cada una de ellas para determinar el área foliar unitaria según el método propuesto por RODRÍGUEZ y PÉREZ (1995). La suma del área de las hojas individuales constituyó el área foliar de cada nivel (*Li*).

Para explicar la relación entre las características del follaje del cafeto con la atenuación de la radiación solar, se calculó la profundidad media del follaje a partir de la fórmula $d_{50} = 0{,}639^{1/c} \cdot b$ donde b y c son parámetros del modelo de Weibull.

Se formuló la hipótesis de que el coeficiente de atenuación podría depender de la hora del día, sometida a prueba estadística por un análisis de varianza (clasificación simple) con posterior estimación de la diferencia entre las medias por la prueba de Duncan.

Resultados y discusión

El ajuste del área foliar acumulada normalizada (L_i) a la función de distribución de Weibull fue significativo ($p \leq 0{,}01$) en todos los puntos de observación, con coeficientes de determinación de 0.99, mostrándose en la figura 1 un diagrama de dispersión típico de un punto de observación en el que se

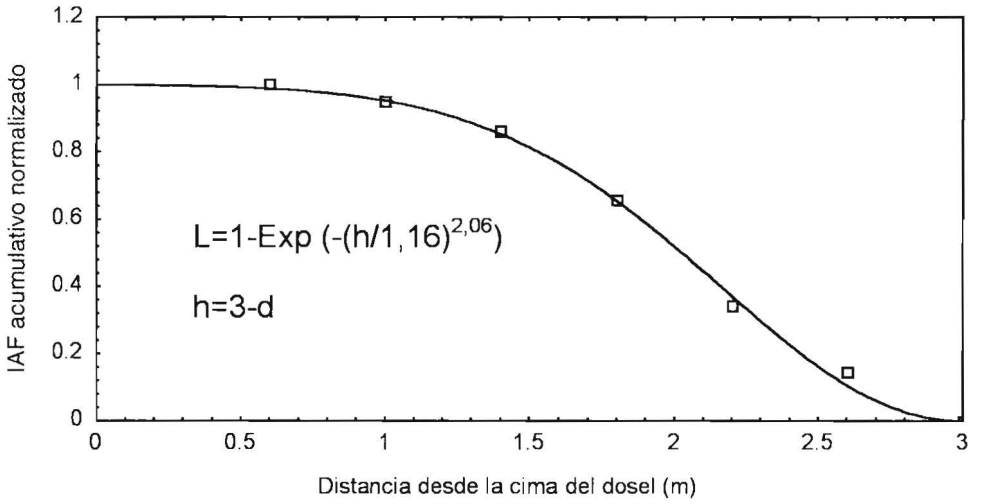


Figura 1. Variación del Índice de Área Foliar acumulativo normalizado con la distancia desde la cima del dosel en un punto típico del muestreo.

Figure 1. Variation of the Normalised Accumulative Leaf Area Index with the distance from the canopy top on a typical sample point.

puede observar que la mayor parte del follaje se encuentra por encima de 1,5 m de la superficie del suelo.

Esta tendencia a la concentración del área foliar en el tercio superior del dosel se aprecia muy bien en los valores del parámetro *c* del modelo de Weibull para los distintos puntos de observación (cuadro 1). De acuerdo con YANG *et al.* (1993) quienes establecen que una distribución homogénea del follaje a través de todo el dosel le corresponde a un valor de *c* de 3.6. Valores inferiores a este, como ocurre en esta investigación, son representativos de la acumulación del área foliar en la parte superior del dosel. El parámetro *b* es un factor de escala indicador de la altura sobre la cual se encuentra el 63% del follaje.

La media general del coeficiente *k* resultó de 1,59 ± 0,16, valor muy superior con relación al indicado por JARAMILLO y DOS SANTOS (1980), aunque desde principios puramente teóricos se corresponde mejor con las características de la especie *Coffea arabica*: L., planófila con gran poder de absorción de la luz por sus hojas.

Cuando se presentan los valores de *k* calculados por separado para las distintas horas del día (cuadro 1) puede observarse el marcado efecto que tiene la elevación del sol sobre el horizonte, resultando mayor en las horas cercanas al mediodía ($P \leq 0,05$). CASTILLO-RODRÍGUEZ *et al.* (1997) indican que los valores teóricos del coeficiente *k* pueden llegar hasta 1.86 para el cafeto; en este ensayo se alcanzaron valores ligeramente superiores (2.03) a las 13:00 h.

Este resultado tiene gran importancia metodológica pues, confirma el efecto de la elevación solar sobre la absorción de la luz en el dosel y a su vez, sin ser más que el estudio de un caso, es un registro correspondiente a un cafetal bajo sombra, condición en la cual no se tiene referencias sobre la determinación del coeficiente *k*.

Cuadro 1. Valores de los parámetros de escala (b) y de simetría (c) del dosel, ajustados según la función de Weibull y coeficientes de atenuación de la luz a diferentes horas del día
Table 1: Scale (b) and symmetry (c) parameter values of the canopy fitted to the Weibull function and extinction coefficient (k) at different daytime

Punto de Observaciones	Parámetros del modelo		Coeficientes de atenuación (k) a Diferentes horas (h) del día*		
	b	c	10h	13h	16h
1	1,16	2,05	2,38	2,04	0,45
2	0,86	1,33	2,20	0,75	1,35
3	0,62	1,30	1,23	1,59	1,02
4	1,00	1,56	1,76	2,34	1,05
5	0,93	1,40	1,65	2,41	1,38
6	1,12	1,64	0,99	2,17	N/E
7	1,15	1,60	0,62	2,90	N/E
Media	0,98	1,55	$1,55^{ab}$	$2,03^{a}$	$1,05^{b}$
E.Sx	0,21	0,26	0,24	0,26	0,16

Medias con letras diferentes para las horas del día difieren según Duncan para $p \leq 0,05$.
N/E: No se realizaron evaluaciones.

La cuadro 2 muestra los valores de la intensidad de la radiación solar en la parte superior (cima) e inferior (base) del dosel del cafeto en los distintos puntos de muestreo y las diferentes horas del día. En todos los casos, excepto a las 10:00 horas para el punto 6 y a las 16:00 horas en el punto 2, los porcentajes de interceptación de la radiación solar estuvieron por encima del 50%, corroborando los altos coeficientes de atenuación de la luz calculados a través del modelo matemático de la Ley de Beer.

Las diferencias observadas en los distintos puntos se deben probablemente a la variabilidad natural inherente a los ambientes de radiación presentes en condiciones de estratos arbóreos típicos de plantaciones con sombra natural, como el caso de el ambiente de "manchas de sol" (*sunfleck*) (ORTOLÁ, 2000), los cuales pueden producir variaciones en la intensidad de la radiación solar que alcanza un determinado estrato de la planta.

Al calcular el índice de profundidad media, derivado del los parámetros del modelo de Weibull (YANG *et al.*, 1993) donde el Indice de Area Foliar acumulativo representa el 50 % del Indice de Area Foliar total del dosel, y que indica la altura desde la cima del dosel donde se acumula la mayor cantidad de hojas de la planta, se pudo comprobar que el mismo estuvo alrededor de 0,74 m que representa el 30,8 % del IAF del dosel del cafeto. Este índice nos dice que la mayor distribución de las hojas en el dosel se encuentra en el tercio superior del dosel, en el cual se realiza, por tanto, la mayor interceptación y atenuación de la radiación solar incidente en la copa del cafeto. CASTILLO-

Cuadro 2. Valores de la intensidad de la radiación solar (W m^{-2}) en la cima y en la base del dosel de las plantas de cafeto y el respectivo porcentaje de interceptación
Table 2. Values of solar radiation intensity (W m^{-2}) at the top and base of the canopy and the respective solar radiation interception

	10:00 horas*						
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7
Cima del dosel	0,45	0,69	0,14	0,61	0,14	0,07	0,08
Base del dosel	0,10	0,11	0.03	0,05	0,02	0,05	0,05
% de interceptación	77,7	84,0	78,6	91,8	85,7	28,6	62,5
	13:00 horas						
Cima del dosel	0,49	0,82	0,14	0,49	0,28	0,91	0,78
Base del dosel	0,13	0,17	0,03	0,05	0,05	0,12	0,12
% de interceptación	73,0	79,2	78,6	89,8	82,1	86,8	84,6
	16:00 horas						
Cima del dosel	0,08	0,20	0,20	0,42	0,09	N/E	N/E
Base el dosel	0,01	0,11	0,03	0,16	0,03	N/E	N/E
% de interceptación	87,5	45,0	85,0	61,9	66,6	-	-

N/E: no se realizaron evaluaciones
(*) Hora local

RODRÍGUEZ *et al.* (1997) hacen referencia a este resultado y plantean que esta es una de las causas de la baja disponibilidad de radiación dentro del follaje.

Conclusiones

La distribución en el sentido vertical del área foliar en el cafeto se ajusta con muy buena aproximación al modelo de Weibull.

Para las condiciones de estudio, caracterizada por un elevado nivel de sombra y una tendencia a la distribución del área foliar preferentemente en el tercio superior del dosel, el coeficiente *k* resultó superior a la unidad. Por otra parte, se confirma el efecto de la elevación solar sobre el valor del coeficiente *k* en un cafetal bajo sombra, registrándose los mayores valores a las 13 horas.

Bibliografía

BJÖRKMAN O., DEMMING-ADAMS, B., 1995. Regulation of Photosynthetic light energy capture, conversion and dissipation in leaves of higher plants. En Ecophysiology of Photosynthesis Ed. por E-D. Schulze y M. M. Caldwell Springer Verlag, pp. 17-48.

CANNEL M.R.G., 1975. Crop physiological aspects of coffee bean yield. J. Coffee Research 5: 7-20.

CASTILLO-RODRÍGUEZ ESPERANZA, ARCILA-PULGARÍN J., JARAMILLO-ROBLEDO A., SANABRIA-RODRÍGUEZ J., 1997. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en *Coffea arabica* L. Var. Colombia. Cenicafé. 47(1): 4-15.

HALL D.O., SURLOCK J.M.O., BOLHAR-NORDENKAMPF, LEEGOOD R.C., LONG S.P., 1993. Photosynthesis and Production in a changing environment. A field and laboratory manual. Chapman&Hall. Londres, 477 pp.

HIKOSAKA K., TERASHIMA I., 1995. A model of the acclimatation of Photosyntesis in leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use. Plant, Cell and Environment. 18: 605-618.

JARAMILLO R.A., DOS SANTOS J.M., 1980. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* var. Catuai y Bourbon Amarillo. Cenicafé 31(3): 86-40.

ORTOLA A.G., 2001. Ècofisiología Vegetal. Introducción a la fisiología del estrés. Valencia, 184 p.

RODRÍGUEZ L.L., PÉREZ A.O., 1995. Estimación indirecta del área y la biomasa foliar en plantas de cafeto cultivadas al sol y bajo sombra. Centro Agrícola, 2: 23-26.

RODRIGUEZ L.L., VALDES C.R., VERDECIA M.J., ARIAS B.L., MEDINA R.R., VELASCO B.E., 2001. Growth, relative water content, transpiration and phosynthetic pigment content in coffee trees growing at different light regimes, Cultivos Tropicales, 22(22): 37-41.

SAUGIER B., 1998. Environmental limitations of Plant Productivity. En Proceedings of the European School o Climatology and Natural Hazards Course. Volterra, Italia, Marzo 1996. European Commision.

YANG X., MILLER R.M., MONTGOMERY M.E., 1993. Vertical distributions of canopy foliage and biologically active radiation in a defoliated/refoliated hardwood forest. Agric. Forest Meteor. 67: 129-146.

(Aceptado para publicación el 9 de abril de 2004).