

TRANSMISION DE LA RADIACION SOLAR EN LA COPA DE *ERYTHRINA POEPPIGIANA* (WALPERS) O.F. COOK¹

PEKKA NYGREN², FLORENT MARAUX³ e GERMÁN A. SÁNCHEZ⁴

RESUMEN - Se realizó una investigación para cuantificar las características de la transmisión de la radiación solar a través de la copa de *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook, un árbol leguminoso importante en los sistemas agroforestales del trópico americano. La atenuación de la radiación activa para la fotosíntesis, medida en términos de la densidad del flujo fotosintético de fotones (PPFD), fue descrita aplicando la ley de Beer, la cual describe empíricamente la atenuación de la radiación como una función exponencial negativa de la longitud de la trayectoria de los rayos solares a través de la copa del árbol. Las características ópticas de la copa, descritas por medio del coeficiente de transmisión de la PPFD, presentaron una variación cíclica en tiempo, que correspondió al ciclo de poda y de pérdida natural de las hojas. Durante un ciclo de podas de 24 semanas la PPFD a la profundidad de un metro en la copa tenía el valor máximo de 23,4% de la PPFD sobre la copa, encontrada a las 17 semanas después de la poda, cuando los árboles tenían una caída marcada de las hojas, y el mínimo de 9,5% al inicio del rebrote después de la poda.

Términos de índice: densidad del flujo fotosintético de fotones (PPFD), dimensiones de la copa, ley de Beer, puntos solares, radiación activa para la fotosíntesis, sistemas agroforestales.

SOLAR RADIATION TRANSMISSION IN THE CANOPY OF *ERYTHRINA POEPPIGIANA* (WALPERS) O.F. COOK.

ABSTRACT - A study was carried out to quantify the solar radiation transmission characteristics through the canopy of *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook, a leguminous tree important in agroforestry systems of tropical America. The attenuation of the photosynthetically active radiation, measured in the form of the photosynthetic photon flux density (PPFD) was described applying the Beer's law, which empirically describes the radiation attenuation as a negative exponential function of the path length of the solar beams through the tree canopy. The optical characteristics of the canopy, described by the PPFD transmission coefficient, had a cyclic variation in time, corresponding to the pruning cycle and the natural leaf fall. During a pruning cycle of 24 weeks the PPFD at the depth of one metre inside the canopy had the maximum value of 23.4% of the PPFD above the canopy, at 17 weeks from the pruning when the trees had a major leaf fall, and the minimum of 9.5% at the beginning of the sprouting after the pruning.

Index terms: agroforestry, Beer's law, canopy dimensions, photosynthetically active radiation, photosynthetic photon flux density (PPFD), sunflecks.

¹ Aceptado para publicación en 27 de Julio de 1992.
Trabajo realizado en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

² M.Sc. (Agroforestería) University of Helsinki Forestry Field Station SF-35500 Korkeakoski Finland.

³ M.Sc. (Agrometeorología) CIRAD-CA - PB 5035 - 34032 Montpellier Cedex, France.

⁴ Ph.D. (Fisiología de cultivos) - Grupo Ecodesarrollo - Calle 86A n° 14-48 - Segundo Piso, Santa Fé de Bogotá, Colombia.

INTRODUCCION

La especie *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook, es un árbol leguminoso de la familia Fabaceae. En América Central y del Sur es usado tradicionalmente en agroforestería como árbol de sombra para el café (*Coffea* spp.) y para el cacao (*Theobroma cacao* L.), o en asociación con pastos (Budowski et al. 1984). Experimentalmente la especie ha mostrado ser promisoría para el cultivo en callejones (Kass et al. 1989, Sánchez Oviedo 1989). Las ventajas que ofrece *E. poeppigiana* en sistemas agroforestales son: crecimiento rápido, resistencia a las podas, facilidad de rebrote y suministro de abono verde rico en nitrógeno a los cultivos asociados (Budowski 1983). En cafetales y cacaotales su función es la producción de abono verde; en potreros dar sombra y alimento al ganado, así como también es usada para cercas vivas (Budowski et al. 1984).

Un aspecto importante para esclarecer el manejo de la *E. poeppigiana* en sistemas agroforestales, es el estudio del efecto de los árboles sobre el régimen de la radiación solar sobre el cultivo agrícola. Para sistemas agroforestales en general, existen evidencias indirectas acerca de la competencia de la radiación solar entre el árbol y el cultivo (por ej. International Institute for Tropical Agriculture 1983, Kang et al. 1981, Verinumbe & Okali 1985). Sin embargo, los estudios cuantitativos sobre el fenómeno son pocos (International Institute for Tropical Agriculture 1984, Kang et al. 1985, Yamoah et al. 1986).

Mediciones de la intercepción de la luz por la copa de *E. poeppigiana*, realizadas con un fotómetro para cámara fotográfica, fueron presentadas por Daccarett (1967). Estas fueron hechas en pasturas bajo árboles de altura promedio de 15 m y diámetro de copa promedio de 10,5 m. Los árboles interceptaron en promedio el 55,6% de la luz.

Debido a la importancia de la especie en sistemas agroforestales del trópico americano, y a la escasez de información sobre las características de su sombra se estableció como objetivo de

la investigación la medición de la radiación solar fotosintéticamente activa transmitida por el follaje de *Erythrina poeppigiana*; esto como una herramienta que pudiera utilizarse para desarrollar un modelo de simulación de los patrones de sombra de la especie en sistemas agroforestales.

MATERIALES Y METODOS

El área experimental está situada en la finca experimental del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, (9°53'N, 83°39'W, 600 m s.n.m.). La investigación se llevó a cabo en el experimento permanente "Orientación de Callejones" del Proyecto Árboles Fijadores de Nitrógeno (AFN) del CATIE, que consiste en el cultivo secuencial de maíz (*Zea mays* L. c.v. Tuxpeño) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L. c.v. Negro Huasteco) en callejones entre surcos de *E. poeppigiana*.

El experimento se estableció en marzo de 1989, cuando se plantaron los surcos de *E. poeppigiana* usando estacas de 0,75 m. Una replantación mayor se llevó a cabo en mayo de 1989 usando estacas previamente enraizadas por medio de acodos aéreos. Todos los árboles pertenecen al clon 2660, seleccionado por el Proyecto AFN.

El diseño experimental está constituido de parcelas divididas en bloques completos al azar con tres repeticiones. Los surcos de *E. poeppigiana* están plantados en tres orientaciones, este-oeste, noroeste-sureste y norte-sur, constituyendo los tratamientos principales. Cada parcela está dividida en una subparcela arada a 25 cm de profundidad y en otra no arada. El espaciamiento de los árboles es 4 x 6 m. La parcela útil es de 24 m², con un árbol en cada esquina.

El trabajo experimental de este estudio se llevó a cabo después de la primera poda de los árboles, que coincidió con el segundo cultivo de la rotación, que fue frijol. Para fines del presente estudio se analizaron solamente las subparcelas aradas, puesto que se suponía que las condiciones del suelo eran más uniformes en éstas. Los datos fueron analizados considerando cada árbol como una unidad experimental, sin considerar el diseño del experimento.

Mediciones de crecimiento

Los árboles fueron podados el 27 de noviembre de 1989, a la edad de ocho meses, dejando una rama vertical en cada árbol. Las mediciones del crecimiento de

E. poeppigiana (altura total, altura de copa, y diámetro de la copa resultante del promedio de cuatro mediciones a diferentes orientaciones con un ángulo de 45° entre ellas), se realizaron en los 4 árboles que rodean a las parcelas útiles del cultivo resultando un total de 36 árboles analizados en las nueve parcelas. Estas mediciones se hicieron semanalmente durante el cultivo de frijol, del 6 de diciembre de 1989 al 7 de marzo de 1990, y cada dos semanas durante la época de barbecho, del 8 de marzo al 9 de mayo de 1990. Los árboles fueron podados totalmente por segunda vez en la última fecha.

Mediciones de la transmisión de la radiación solar

Para las mediciones de la transmisión de la radiación solar a través de la copa se tomaron al azar dos árboles por parcela de los analizados para el crecimiento, resultando un total de 18 árboles. Estas mediciones fueron realizadas cada dos semanas durante el cultivo del frijol y cada cuatro semanas durante el barbecho. Para cada día de medición se hicieron las mediciones cuando el ángulo de elevación solar, θ , fue de aproximadamente 20, 35, 45, 55, 65, 75, 80 y 90 grados con una variación máxima $\pm 2,5^\circ$, según fuese posible en las diferentes épocas. Las mediciones se hicieron cuando no había nubes que interceptaron la radiación solar directa. Por esta razón no fue posible realizar el procedimiento completo de medición en abril y mayo.

Las mediciones fueron realizadas con un "Sunfleck ceptometer" (Decagon Devices Inc., Pullman, Wa, EE.UU.), instrumento que permite medir la radiación activa para la fotosíntesis en términos de densidad del flujo fotosintético de fotones (PPFD). Este equipo consiste en una vara con 40 sensores de quantum cuya cabeza sensitiva es de 10 x 10 mm, y de una unidad central con un micro procesador y memoria RAM de 22 kB. El micro procesador registra la PPFD promedio medida por los 40 sensores y la frecuencia relativa de puntos solares, *sunflecks*, (SF); es decir, área expuesta a la radiación directa que penetra por las aberturas de la copa. En el procedimiento usado el sensor que midió una PPFD mayor de la mitad de la PPFD incidente sobre los árboles (PPFD_O) se consideró ubicado en un punto solar. La SF se determinó como la proporción de los sensores que midieron la PPFD mayor o igual al umbral. Los datos de PPFD promedio y la SF se registraron en la memoria junto con la hora de medición.

Las mediciones de la PPFD y SF dentro de la copa se hicieron siempre sobre una trayectoria paralela a la

dirección del flujo directo de fotones. Se colocó una varilla métrica desde el borde superior de la copa (punto donde entró el flujo directo a la copa), pasando por el centro de la copa hasta el borde en el lado de sombra, respetando cuidadosamente la dirección del flujo directo. El Sunfleck ceptometer se ajustó perpendicular a la varilla, manteniendo así su vara en posición perpendicular con respecto al flujo directo de fotones. Las lecturas se tomaron en el borde superior de la copa y con intervalos de 20 cm dentro de la copa hasta el borde sombreado. Las lecturas de PPFD y de la SF se registraron para cada punto en la memoria del equipo.

Sólo fue posible realizar el procedimiento completo de medición de la transmisión en seis árboles por día. Para medir los 18 árboles seleccionados se necesitaron tres días por cada semana de medición.

Prueba de la metodología de las mediciones de la radiación solar

El procedimiento permitió tomar una sola lectura en cada punto dentro de la copa. La prueba de la variación de las mediciones puntuales se realizó midiendo la serie de datos de la PPFD en el trayecto del flujo directo de fotones dentro de la copa, determinado como fue explicado anteriormente, pero tomando 10 lecturas en cada punto para analizar su varianza. Esta prueba se hizo en tres árboles y con tres valores de ϕ (45°, 60° y 80°, con variación máxima de $\pm 2,5^\circ$). De las nueve series medidas cuatro fueron clasificadas en condiciones del viento débil (movimiento ligero de las hojas, pero sin movimiento de las ramas) y cinco en condiciones de viento moderado (se movían las ramas).

Análisis de los datos

Suponiendo que la densidad foliar es uniforme dentro de toda la copa, se ajustó a los datos de la transmitancia de la copa una ecuación modificada de la Ley de Beer para la transmisión radiativa en un medio turbio (Monsi & Saeki 1953, Thornley 1976):

$$PPFD_i = PPFD_O \cdot e^{-ks} \quad (1)$$

donde:

PPFD_i = densidad del flujo fotosintético de fotones en la profundidad *s* en la copa ($\mu \text{ molms}^{-2}\text{s}^{-1}$).

PPFD_O = densidad del flujo fotosintético de fotones incidente sobre la copa ($\mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

s = longitud de la trayectoria que cruzan los rayos solares dentro de la copa (m).

k = coeficiente de transmisión.

El parámetro k incluye cuatro efectos: densidad foliar, orientación e inclinación de las hojas y características ópticas de las hojas. La desuniformidad de la distribución del follaje es manejable con el ajuste del valor de k en algunos casos (Thornley 1976). La PPF_D en una misma profundidad s disminuye al aumentar el valor de k .

Para modelar la reducción de la SF en la copa se ajustó a los datos una ecuación análoga a la ecuación (1):

$$SF = e^{-\Gamma s} \quad (2)$$

donde:

SF = frecuencia relativa de puntos solares en la profundidad s en la copa.

s = longitud de la trayectoria que cruzan los rayos solares dentro de la copa (m).

Γ = coeficiente de penetración.

El parámetro Γ incluye el efecto de la densidad y distribución del follaje, y orientación e inclinación de las hojas sobre la penetración del flujo directo de fotones a través de la copa.

El ajuste del valor de los parámetros k y Γ a las ecuaciones (1) y (2), respectivamente, se hizo con el método de mínimos cuadrados (Gallant 1975, Mead & Curnow 1983), usando en la iteración el procedimiento NLIN del paquete estadístico SAS (SAS Institute 1985).

RESULTADOS

Prueba de la metodología de las mediciones de la radiación solar

Los coeficientes de variación de las diez mediciones en cada punto, en función de la profundidad del punto de medición desde el borde superior de la copa, se presentan en la Fig. 1. En condiciones de viento débil el coeficiente de variación fue bastante bajo hasta la profundidad de un metro, mientras que a mayor profundidad su valor se elevó. En condiciones de viento moderado el coeficiente de variación fue más alto en todas las profundidades y presentó una mayor variabilidad. Basado en estos resultados

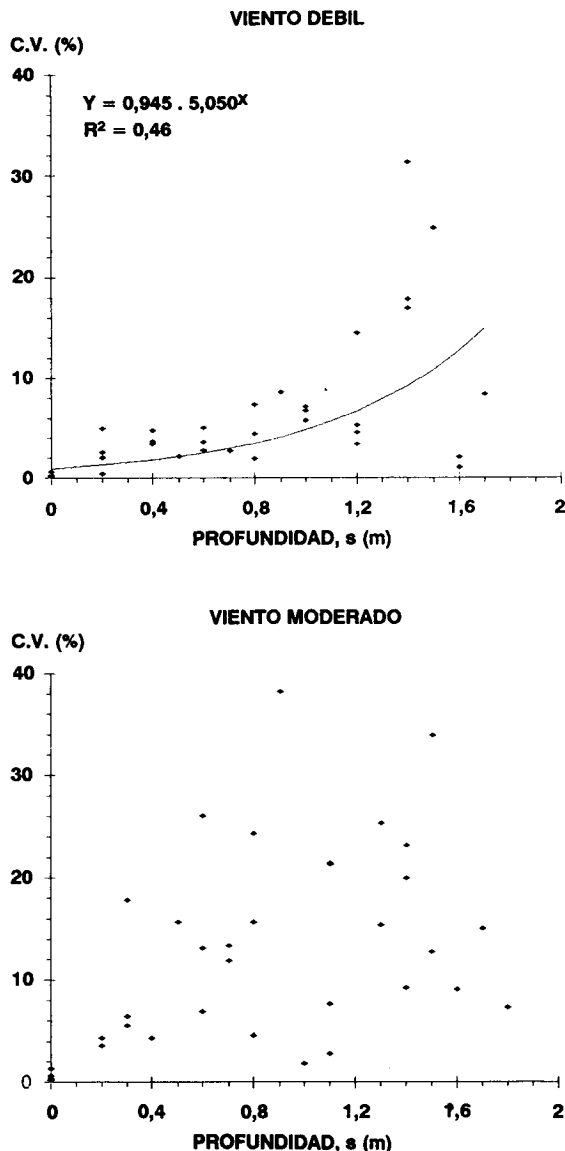


FIG. 1. Coeficiente de variación de diez mediciones de la densidad del flujo fotosintético de fotones (PPFD) en función de la profundidad de la copa de *E. poeppigiana* en condiciones de viento débil y viento moderado.

se decidió no hacer las mediciones cuando había viento suficientemente fuerte como para mover las ramas.

En condiciones sin viento o con viento débil la decisión era más compleja, puesto que al hacer la prueba se notó que tomando diez lecturas

en un punto, la medición de un árbol llevó aproximadamente ocho minutos, que era un tiempo demasiado largo para poder realizar el procedimiento completo de medición: se calculó que para poder medir seis árboles cuando el sol quedaba en la posición $\pm 2,5^\circ$, el tiempo máximo de medición de un árbol era de tres minutos. Tomando en cuenta esa necesidad de rapidez y el hecho de que en las profundidades de más de un metro, donde había mayor coeficiente de variación, el valor absoluto de la PPFd ya era muy bajo y así su variación absoluta también era muy baja (del orden magnitud de $\pm 10-20 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ entre las diez mediciones), se decidió tomar una sola lectura en cada punto de medición dentro de la copa.

Dimensiones de los árboles

El desarrollo de la altura total (A_t), altura de copa (A_c) y diámetro (D_c) de copa de *E. poeppigiana* se presentan en la Fig. 2 en función del tiempo desde la poda. Hasta la semana 8 la altura total aumentó lentamente, mientras que la altura y diámetro de la copa crecieron más rápidamente. Esto se debió principalmente a un rebrote más vigoroso en las partes bajas del

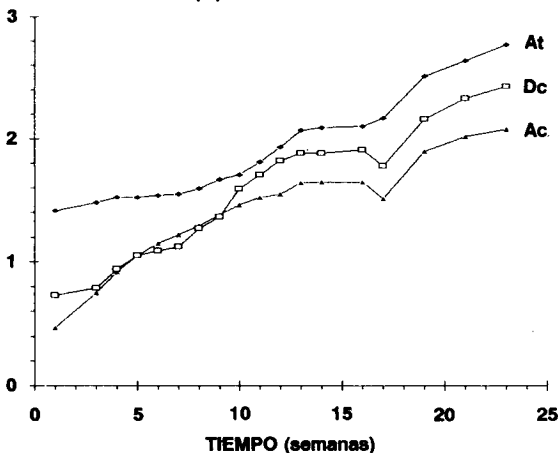


FIG. 2. Desarrollo de la altura total (A_t), altura de la copa (A_c) y diámetro de la copa (D_c) de *E. poeppigiana* en función del tiempo desde la poda. Cada punto presenta media de 36 árboles.

llo. Después se observó un crecimiento más rápido hasta la semana 13, cuando el crecimiento cesó nuevamente. En el desarrollo del frijol esta época de crecimiento rápido correspondió a la época de floración y principios de la maduración.

A partir de la semana 15 se observó un amarillamiento rápido de las hojas de los árboles, que culminó con la caída notable de las hojas en la semana 17. Esta caída de las hojas se refleja en las curvas de desarrollo como una disminución de la altura y del diámetro de la copa en aquella semana. Después de la caída de las hojas comenzó otra época de crecimiento rápido. Los árboles fueron podados completamente en la semana 24, cuando estaban creciendo rápidamente.

Transmitancia de la copa

Los resultados del ajuste del coeficiente de transmisión, k , de la ecuación (1) se presentan en el Cuadro 1. Los intervalos de confianza de k indican que la amplitud del ajuste fue pequeña. El coeficiente de variación de k entre árboles fue de la orden de 20-35%.

Los valores de k calculados con la ecuación (1) mostraron una variación cíclica en el tiempo, la cual supuestamente es un reflejo del carácter cíclico de la biología de la especie (Borchert 1980). Para describir esta variación se usó la ecuación sinoidal:

$$k = \beta_1 + \beta_2 \cdot \sin(\beta_3 \cdot t) \quad (3)$$

donde:

t = tiempo desde la poda en semanas.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = parámetros.

Los parámetros β_1, β_2 y β_3 son puramente matemáticos, sin interpretación biológica, y determinan el intercepto, la amplitud y la longitud del ciclo, respectivamente. Sus valores parámetros fueron ajustados igualmente que el valor de k y Γ . Los valores de estos parámetros fueron los siguientes (entre paréntesis intervalo de confianza del 95%):

CUADRO 1. Valores del coeficiente de transmisión de la copa, k , para *E. poeppigiana* con intervalo de confianza de 95% en función del tiempo desde la poda. El modelo es: $PPFD_I = PPFD_0 \cdot e^{-ks}$ (ecuación 1).

Semana	k	Intervalo de 95%	C.V. entre árboles	Número de observ. ¹	Número de árboles
4	2,35	2,15 - 2,56	0,357	99	17
7	2,30	2,19 - 2,40	0,352	452	18
9	2,24	2,13 - 2,34	0,246	381	12
11	2,07	2,00 - 2,14	0,223	825	18
13	1,80	1,74 - 1,86	0,203	970	18
17	1,54	1,48 - 1,59	0,294	733	17
21	1,45	1,34 - 1,55	0,219	192	6
24	1,91	1,70 - 2,12	0,053	52	3

¹ Número total de mediciones de PPFD en diferentes árboles, profundidades dentro de los árboles y con diferentes ángulos de elevación solar.

$$\beta_1 = 1,91 (1,84 - 1,97)$$

$$\beta_2 = 0,46 (0,37 - 0,55)$$

$$\beta_3 = 0,26 (0,24 - 0,27)$$

La curva de la función (3) se presenta en la Fig. 3 junto con los valores de k estimados con la ecuación (1).

En el Cuadro 2 se presenta el análisis de sensibilidad del valor de k para el valor de la mediana, 1,91. De estos resultados se desprende que el modelo es sensible a los cambios en el valor de k . Esto se debe presumiblemente a la cantidad de efectos atribuidos a este parámetro. El error relativo es mayor en las profundidades grandes de la copa, donde la $PPFD_i$ ya es bastante baja. En la Fig. 4 se presenta el rango de funciones de transmitancia, estimadas con la ecuación (1), durante un ciclo de poda.

Frecuencia relativa de puntos solares

Los resultados del ajuste del parámetro Γ se presentan en el Cuadro 3. Los intervalos de confianza son del mismo orden que los intervalos del parámetro k . También el valor de Γ presentó una variación cíclica en el tiempo, como era de esperar, debido a la fuerte correlación entre k y Γ ($r = 0,973$, significativo al 0,01%).

VALOR DE k

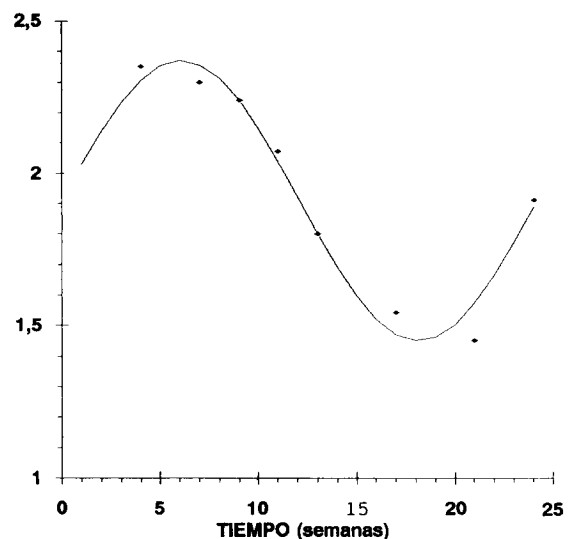


FIG. 3. Valores del coeficiente de transmisión, k , de la copa de *E. poeppigiana* en función del tiempo desde la poda, estimados con las ecuaciones (1) (puntos) y (3) línea continua).

Se pudo estimar la variación del valor de Γ en el tiempo aplicando la ecuación (3) con los siguientes valores de los parámetros (intervalo de confianza de 95% entre paréntesis):

CUADRO 2. Análisis de sensibilidad del valor del coeficiente de transmisión de la copa, k , para *E. poeppigiana*: la $PPFD_i$ en función de la profundidad de la copa con valor mediana de $k \pm$ intervalo de confianza de 95%. Se presentan los valores absolutos y la diferencia porcentual a la estimación con la k mediana. $PPFD_0 = 2000 \mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, estimación con el modelo: $PPFD_i = PPFD_0 \cdot e^{-ks}$ (ecuación 1).

Profundidad (m)	PPFD _i con valor de k		
	1,70	1,91	2,12
0,4	1013	932	856
	-8,8% ¹	-	+8,1% ²
0,8	513	434	367
	-18,3%	-	+15,5%
1,2	260	202	157
	-28,7%	-	+22,3%
1,6	131	94	67
	-39,9%	-	+28,5%
2,0	67	44	29
	-52,2%	-	+34,3%

¹ ((932 - 1013) / 932) . 100%.

² ((932 - 856) / 932) . 100%.

$$\beta_1' = 2,25 (2,16 - 2,33)$$

$$\beta_2' = 0,57 (0,46 - 0,69)$$

$$\beta_3' = 0,24 (0,23 - 0,26)$$

Los resultados del análisis de sensibilidad de la ecuación (2) para el valor de la mediana de Γ se presentan en el Cuadro 4. El modelo de la SF no es tan sensible al valor de Γ como el modelo de transmitancia de PPFD lo es al valor de k . Al igual que el error relativo de la ecuación (1), el error relativo de la ecuación (2) es mayor a profundidades grandes de la copa.

DISCUSION

Los árboles usados en el experimento fueron todos de sólo un clon. La ventaja del uso de material clonal es que se puede esperar una mayor

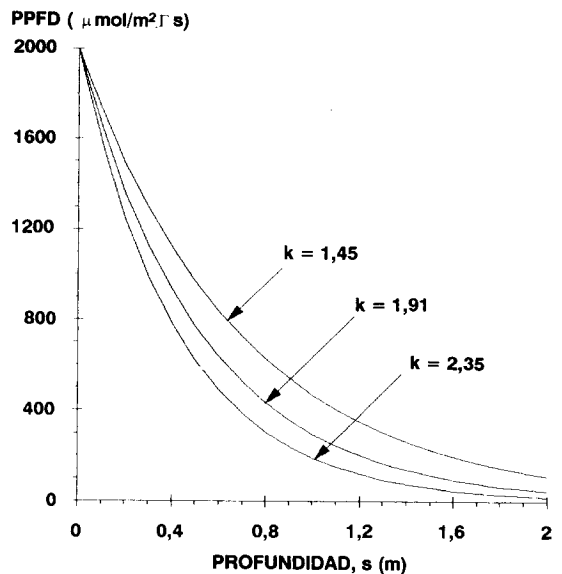


FIG. 4. La densidad del flujo fotosintético de fotones (PPFD) en función de la profundidad de la copa de *E. poeppigiana* con coeficiente de transmisión mínimo (1,45), mediana (1,91) y máximo (2,35). PPFD no sombreada, $2000 \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, corresponde a la PPFD en el medio día en los trópicos.

uniformidad de los árboles en sus características de crecimiento y sombra. La desventaja mayor es que se hace más difícil la generalización de los resultados.

En el ensayo clonal de *Erythrina* spp. del Proyecto AFN el clon 2660 tenía la mayor producción de biomasa comestible y total entre ocho clones de *E. poeppigiana* y las dimensiones registradas para el clon eran las mayores. Este clon tenía también las hojas de mayor tamaño (Pérez Castellón 1990).

El tamaño de las hojas afecta más la distribución proporcional entre los puntos solares y la penumbra. Teóricamente, el rango de la variación clonal observada en el tamaño de las hojas no tiene efecto significativo en la distribución mencionada (Ross 1981). La transmitancia de la copa depende también de la inclinación y orientación de las hojas y de sus características ópticas. No hay información acerca de la varia-

CUADRO 3. Valores del coeficiente de penetración de la radiación directa, Γ , para *E. poeppigiana* con intervalo de confianza de 95% en función del tiempo desde la poda. El modelo es: $SF = e^{-\Gamma s}$ (ecuación 2).

Semana	Γ	Intervalo de 95%	C.V. entre árboles	Número de observ. ¹	Número de árboles
4	2,79	2,50 - 3,08	0,401	99	17
7	2,84	2,69 - 2,98	0,359	452	18
9	2,57	2,44 - 2,70	0,249	381	12
11	2,53	2,43 - 2,63	0,248	825	18
13	2,21	2,13 - 2,29	0,189	970	18
17	1,82	1,74 - 1,89	0,300	733	17
21	1,64	1,50 - 1,77	0,243	192	6
24	2,06	1,80 - 2,31	0,047	52	3

¹ Número total de mediciones de SF en diferentes árboles, profundidades dentro de los árboles y con diferentes ángulos de elevación solar.

CUADRO 4. Análisis de sensibilidad del valor del coeficiente de penetración de la radiación directa, Γ , para *E. poeppigiana*: la SF en función de la profundidad de la copa con valor mediana de $\Gamma \pm$ intervalo de confianza de 95%. Se presentan los valores absolutos y la diferencia porcentual a la estimación con la Γ mediana. Estimación con el modelo: $SF = e^{-\Gamma s}$ (ecuación 2).

Profundidad (m)	SF con valor de Γ		
	2,13	2,21	2,29
0,4	0,426 -3,2% ¹	0,413	0,400 +3,1% ²
0,8	0,182 -6,6%	0,171	0,160 +6,2%
1,2	0,078 -10,1%	0,070	0,064 +9,2%
1,6	0,033 -13,6%	0,029	0,025 +12,0%
2,0	0,014 -17,4%	0,012	0,010 +14,8%

¹ $((0,413 - 0,426) / 0,413) \cdot 100\%$.

² $((0,413 - 0,400) / 0,413) \cdot 100\%$.

ción clonal con respecto a estas variables. Tomando en cuenta la sensibilidad de la ecuación

(1) al valor del parámetro k, el coeficiente de variación entre los árboles en este parámetro (20-35%) se debe considerar alto. Esto indica que dentro de un clon existe una variación significativa en las características ópticas de la copa. Así, con la información existente actualmente no hay base para pensar que el uso del material clonal afecta la representatividad de los resultados.

El experimento en que se llevó a cabo el trabajo experimental estaba recién establecido y la cantidad de biomasa de *E. poeppigiana* podada después de la experimentación fue bastante baja (Nygren 1990), con valores del orden de la mitad de las cifras reportadas por otros autores con el mismo espaciamento (Jiménez Burgos 1990, Sánchez Oviedo 1989). Sin embargo, no existe información para evaluar si estas características se reflejan en las variables ópticas de la copa, tales como la densidad foliar.

La transmitancia de la copa de *E. poeppigiana* resultó bastante baja. Con un valor de mediana del coeficiente de transmisión k de 1,91, una trayectoria de 40 cm en la copa es suficiente para disminuir la PPF_{D_i} a 46,6% de la PPF_{D_O} y una trayectoria de un metro disminuye la PPF_{D_i} a 14,8% de la PPF_{D_O}. La SF sigue el mismo patrón con valores de 41,3% y 11,0%, para las mismas profundidades, respectivamente.

Estas observaciones de la densidad de la sombra están completamente en desacuerdo con las mediciones de Daccarett (1967), quien midió una intercepción por las copas de *E. poeppigiana* de un 50 a 63%. Parte de la diferencia puede deberse a la respuesta espectral no adecuada para mediciones ecológicas del fotómetro usado por él y a diferencias metodológicas en las mediciones. Otra razón posible es que se midió la intercepción de la luz de árboles grandes que tienden a tener copas más abiertas que los árboles pequeños.

El valor mínimo de k , es decir la mayor transmitancia de la copa, se encontró entre las semanas 17 y 19, que corresponde al momento posterior a la mayor caída de las hojas. Los mayores valores de k correspondieron al período entre las semanas 5 y 7, cuando la copa era bastante pequeña pero densa. Estas observaciones llevan a concluir que el principal efecto explicado por este parámetro es la densidad de la copa. Puesto que la SF tenía el mismo ciclo, parece obvio que la menor densidad foliar implica también un mayor número de aberturas en la copa y consecuentemente una mayor penetración de la radiación directa a través de la copa. Otro factor que obviamente tiene el mismo ciclo es la absorbancia de las hojas, puesto que las hojas nuevas verdes absorben mejor el flujo de fotones que las hojas senescentes que han perdido la mayor parte de la clorofila (Larcher 1983).

Este ciclo de las características ópticas de la copa implicó también que la transmitancia de la copa de *E. poeppigiana* fuera menor en la época de cultivo del frijol que durante la época de barbecho que queda entre los cultivos.

El ciclo de la variación en el valor del coeficiente de transmisión k fue de 24 semanas o 5,6 meses. Este ciclo puede ser un artificio experimental, puesto que la duración es la misma que la del ciclo de poda usado en el experimento.

Por otro lado, este ciclo es bastante coincidente con la edad promedio de las hojas, que se observó al variar de entre cuatro y cinco meses en el ensayo clonal del Proyecto AFN (Chacón Espinoza 1990). En el Valle Central de Costa

Rica la edad promedio de las hojas de árboles de crecimiento libre varía entre 6,5 y 7,4 meses (Borchert 1980).

El amarillamiento y la caída parcial de las hojas se presentó a las 17 semanas o 3,9 meses después de la poda. Este tiempo es menor que la edad de las hojas observada en el ensayo clonal del Proyecto AFN (Chacón Espinoza 1990) o en el Valle Central (Borchert 1980). La caída puede ser un indicador del ciclo interno que ha mantenido el clon. Según Borchert (1980) en el trópico húmedo los ciclos internos determinan las fases fenológicas de la especie más que los cambios ambientales ligeros.

CONCLUSIONES

1. La Ley de Beer acerca de la transmisión radiativa en un medio turbio resultó una base teórica aplicable en la caracterización de la transmisión de la PPFd en la copa de *E. poeppigiana*.
2. El coeficiente de transmisión de la copa, k , usado en este modelo mostró una variación cíclica durante un ciclo de poda de 24 semanas, con valores extremos de 1,45 a 2,35 y con la mediana de 1,91. La variación en el valor de este coeficiente siguió el ciclo de vida de las hojas.
3. El coeficiente de variación del parámetro k entre árboles indica, tomando en cuenta la sensibilidad del modelo usado a este parámetro, que también dentro de un clon existe una importante variación en las características ópticas de la copa.
4. La PPFd baja en la sombra de *E. poeppigiana* es obviamente una desventaja en sistemas agroforestales, aunque su importancia varía, según la respuesta fotosintética de la especie de cultivo a la PPFd. Contra esta desventaja están las características deseables de la especie como la facilidad de rebrote, la resistencia a las podas y el suministro de abono verde rico en nitrógeno al cultivo (Budowski 1983, Sánchez Oviedo 1989).
5. En la selección del germoplasma apto para sistemas agroforestales se deben buscar clones y procedencias que formen una copa abierta.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está basado parcialmente en la tesis de maestría del primer autor, desarrollado bajo la supervisión del comité asesor formado además de los coautores por el Dr. Pedro Oñoro y M.Sc. José Arze, quienes revisaron el borrador del manuscrito haciendo valiosos comentarios. El trabajo fue financiado principalmente por medio de una beca de la Academia de Finlandia para el primer autor.

REFERÊNCIAS

- BORCHERT, R. Phenology and ecophysiology of tropical trees: *Erythrina poeppigiana* O.F. Cook. *Ecology*, v.61, p.1065-1074, 1980.
- BUDOWSKI, G. An attempt to quantify some current agroforestry practices in Costa Rica. In: HUXLEY, P.A. (Ed.). *Plant Research and Agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 1983. p.43-62.
- BUDOWSKI, G.; KASS, D.C.L.; RUSSO, R.O. Leguminous trees for shade. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.19, s/n, p.205-222, 1984. Edição Especial.
- CHACÓN ESPINOZA, J.C. *Análisis del crecimiento del follaje en tres especies de Erythrina en Costa Rica*. Turrialba: CATIE, 1990. 77p. Tesis de Maestría.
- DACCARETT, D.M. *La influencia de árboles leguminosos y no leguminosos sobre el forraje que crece bajo ellos*. Turrialba: IICA, 1967. 34p. Tesis de Maestría.
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR TROPICAL AGRICULTURE. *Annual report for 1982*. Ibadan, 1983. p.153-159.
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR TROPICAL AGRICULTURE. *Annual report for 1983*. Ibadan, 1984. p.176-184.
- GALLANT, A.R. Nonlinear regression. *American Statistician*, v.29, p.73-81, 1975.
- JIMÉNEZ BURGOS, J.M. *Análisis del crecimiento y fenología del maíz (Zea mays L. c.v. Tuxpeño) en un cultivo en callejones con poró (Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook), plantado en cuatro arreglos espaciales*. Turrialba: CATIE, 1990. 124p. Tesis de Maestría.
- KANG, B.T.; GRIMME, H.; LAWSON, T. Alley cropping sequentially cropped maize and cowpea with *Leucaena* on a sandy soil in Southern Nigeria. *Plant and Soil*, v.85, p.267-277, 1985.
- KANG, B.T.; WILSON, G.F.; SIPKENS, L. Alley cropping maize (*Zea mays* L.) and *Leucaena* (*Leucaena leucocephala* Lam.) in Southern Nigeria. *Plant and Soil*, v.63, p.165-179, 1981.
- KASS, D.L.; BARRANTES, A.; BERMUDEZ, W.; CAMPOS, W.; JIMENEZ, M.; SANCHEZ, J. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en la Montaña, Turrialba. *El Chasqui*, n.19, p.4-15, 1989.
- LARCHER, W. *Physiological plant ecology*. Transl. by M.A. Biederman-Thorson. 2nd. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- MEAD, R.; CURNOW, R.N. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. London: Chapman and Hall, 1983.
- MONSI, M.; SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, v.14, p.22-52, 1953.
- NYGREN, P. *Modelo de patrones de sombra de surcos de Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook en sistemas de cultivo en callejones*. Turrialba: CATIE, 1990. 143p. Tesis de Maestría.
- PÉREZ CASTELLÓN, E.E. *Evaluación del ensayo clonal de Erythrina spp. en San Juan Sur, Turrialba, Costa Rica*. Turrialba: CATIE, 1990. 111p. Tesis de Maestría.
- ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. The Hague: Dr. W. Junk Publishers, 1981. 391p.
- SANCHEZ OVIEDO, J.F. *Análisis de la estabilidad y dinámica de sistemas de cultivo en callejones*. Turrialba: CATIE, 1989. 174p. Tesis de Maestría.
- SAS INSTITUTE. *SAS User's Guide: Statistics*. Version 5 edition, Cary, N.C., 1985.
- THORNLEY, J.H.M. *Mathematical models in plant physiology*. London: Academic Press, 1976. 318p.
- VERINUMBE, I.; OKALI, D.U.U. the influence of coppiced teak (*Tectona grandis* L.F.) regrowth and roots on intercropped maize (*Zea mays* L.). *Agroforestry Systems*, v.3, p.381-386, 1985.
- YAMOAH, C.F.; AGBOOLA, A.A.; MULONGOY, K. Decomposition, nitrogen release and weed control by prunings of selected alley cropping shrubs. *Agroforestry Systems*, v.4, p.239-246, 1986.