

# UN MODELO DE LOS PATRONES DE SOMBRA DE ARBOLES MANEJADOS CON PODAS PERIODICAS EN SISTEMAS AGROFORESTALES<sup>1</sup>

PEKKA NYGREN<sup>2</sup>

**RESUMEN** - Una de las mayores dificultades en el desarrollo de investigaciones en sistemas agroforestales es el tamaño y costo elevado de los experimentos que cubran un rango adecuado de arreglos de los árboles y cultivos. Una solución a este problema es usar modelos de simulación para explorar un gran número de diseños y comprobar solo los mejores en el campo. El presente artículo describe un modelo de simulación de los patrones de sombra de árboles manejados con podas periódicas. El modelo permite estimar la exposición fotosintética de fotones durante un tiempo definido por el usuario en un cultivo con sombra de árboles cuando se conoce la ubicación de los árboles, sus dimensiones, la altura del cultivo, la latitud geográfica y la transmitancia atmosférica. El campo se divide en cuadrículas de 50 x 50 cm y la simulación se realiza para cada una de éstas. El modelo contiene los parámetros de la transmitancia de la copa sólo para *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook, pero modificándolo el modelo se podría ajustar para cualquier especie arbórea que se maneje con podas periódicas. La aplicación principal del modelo es la exploración teórica del efecto de los árboles sobre el régimen de radiación solar sobre el cultivo en sistemas agroforestales.

**Términos de índice:** competencia por la radiación solar, diseño de sistemas agroforestales, *Erythrina poeppigiana*, exposición fotosintética de fotones (PPE), geometría de árboles, radiación activa para fotosíntesis.

## SIMULATION OF THE SHADING PATTERN OF PERIODICALLY PRUNED TREES IN AGROFORESTRY SYSTEMS

**ABSTRACT** - One of the main difficulties in the development of agroforestry systems research is the size and high cost of experiments which cover an adequate range of arrangements of trees and crops. One solution to this problem is to use simulation models to explore a wide range of designs and test only the best in the field. The present article presents a simulation model for the shading pattern of periodically pruned trees. The model permits to estimate the photosynthetic photon exposure during a user defined time in a field with trees once the location and dimensions of the trees, the crop height, geographical latitude and atmospheric transmittance are known. The field is divided into 50 x 50 cm squares and simulation is realized independently for all of them. The model includes the canopy transmittance parameters only for *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook, but modifying these parameters the model could be applied for any agroforestry tree species managed with periodic prunings. The main application of the model is to explore theoretically the effect of the trees on the radiation regime above the crop in agroforestry systems.

**Index terms:** competence for solar radiation, design of agroforestry systems, *Erythrina poeppigiana*, tree geometry, photosynthetic photon exposure (PPE), photosynthetically active radiation.

<sup>1</sup> Aceptado para publicación en 29 de Julio de 1992.  
Trabajo realizado en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

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

## INTRODUCCION

El diseño de sistemas agroforestales, o bien de cualquier sistema de policultivo, es un problema de optimización, en el cual se busca ma-

minimizar los efectos positivos de los árboles y minimizar la competencia por la radiación solar, agua y nutrientes.

En la búsqueda de diseños óptimos para sistemas agroforestales, los diseños experimentales tradicionales de las ciencias agrícolas tienen serias desventajas, ya que se requiere un número elevado de tratamientos y un tamaño relativamente grande de las parcelas, para poder controlar adecuadamente los efectos micro climáticos y periféricos. Se debe encontrar una combinación óptima de un sistema con un mínimo de dos componentes vegetales con respecto al arreglo espacial y al manejo de ambos. Por esta razón los experimentos ocupan grandes extensiones de terreno, cuya desuniformidad causa dificultades adicionales, requieren mucho trabajo y son costosos. Además, no existen garantías de que el arreglo óptimo quede dentro de los tratamientos probados. Estas desventajas superan las ventajas de los diseños tradicionales como son el análisis estadístico exacto y la facilidad de la interpretación de los resultados (Huxley 1985, 1987, Vandermeer 1989).

Los modelos de simulación permiten explorar rápidamente un gran número de diseños y comprobar sólo los mejores en el campo (Vandermeer 1986, 1989). La ventaja de la simulación está en el ahorro de tiempo, trabajo y recursos financieros una vez que el modelo se ha establecido y validado. Con modelos de simulación es posible probar rápidamente una gran cantidad de arreglos, y entrar a la fase de experimentos estadísticos con los diseños más promisorios.

La elaboración de modelos es especialmente promisoriosa para estudiar el régimen de radiación solar en sistemas agroforestales, puesto que la competencia por la radiación solar es uno de los problemas claves para minimizar en estos sistemas (Connor 1983, Kang et al. 1985, Ssekabembe 1985). Además, la medición de la radiación solar dentro de una cobertura vegetal presenta múltiples problemas por su gran variación temporal y espacial (Ross 1981). Modelos de simulación para estudiar el régimen de radiación solar fueron usados en bosques naturales por Kuuluvainen & Pukkala (1987), Oker-

Blom (1986) y Satterlund (1983); en frutales por Cohen et al. (1987) y Palmer (1977), y fueron introducidos al estudio de sistemas agroforestales por Jackson & Palmer (1989) y Quesada et al. (1987).

Este artículo presenta las bases teóricas de un programa de simulación para calcular los patrones de sombra de árboles manejados con podas periódicas en sistemas agroforestales. Además se presentan los resultados de la comprobación del modelo en un sistema de cultivo en callejones con *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook y frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

El programa permite estimar la exposición fotosintética de fotones (photosynthetic photon exposure, PPE) potencial durante un período definido por el usuario sobre un campo con sombra de árboles. Previamente es necesario conocer la ubicación de los árboles en el campo, las dimensiones y la forma de la copa, la altura del cultivo, la latitud del lugar y la transmitancia atmosférica para la radiación directa. El término "potencial" significa que el modelo no toma en cuenta las condiciones locales del tiempo y el cálculo se efectúa para condiciones de cielo despejado. Los resultados se presentan en forma de un mapa del campo, el cual está dividido en cuadrículas de 50 x 50 cm, donde se indica la PPE durante el período de simulación, para cada cuadrícula. Los parámetros de la transmitancia de la copa de los árboles corresponden a *E. poeppigiana*. Cambiando los parámetros el programa se adaptaría a cualquier especie arbórea, que es manejada con podas.

El programa fue escrito en lenguaje de programación FORTRAN y se lo denominó Sibú (nombre del dios de los indígenas bribris de Costa Rica, que reside en el cenit).

## METODOLOGIA DE SIMULACION

### Supuestos del programa

El procedimiento matemático del programa Sibú asume los siguientes supuestos:

1. Los árboles están aislados.
2. La densidad foliar es uniforme en todo el volumen de la copa.

3. El sol es un emisor puntual y los rayos solares son paralelos.
4. El efecto de los árboles sobre la radiación difusa es despreciable.
5. El terreno es plano.
6. No se toma en cuenta la sombra de los troncos.
7. La forma de la copa es perfectamente regular: elipsoidal o semielipsoidal.
8. La altura del cultivo agrícola es uniforme en todo el campo.
9. La diferencia de altura entre el cultivo y el árbol es grande.

La validez de la primera suposición depende del espaciamiento de los árboles en el campo. Matemáticamente el supuesto significa que si las copas se traslapan, el cálculo se efectúa como si los rayos solares estuvieran pasando por la copa de un solo árbol. La segunda suposición se requiere debido al método usado en el modelaje de la transmitancia de la copa (Nygren et al. 1993). La tercera suposición es una simplificación geométrica, y en la práctica significa que no se toma en cuenta la penumbra.

El error debido a la cuarta suposición varía según la altura y espaciamiento de los árboles; generalmente, en espaciamiento abierto el error promedio disminuye (Jackson & Palmer 1989). La quinta suposición es la mayor restricción para la aplicación del programa en sistemas reales, ya que una pequeña pendiente puede causar una importante subestimación (pendiente abajo del árbol) o sobre estimación (pendiente arriba) del alcance de la sombra.

La sexta suposición no produce ningún error si los troncos no son muy gruesos (DAP mayores a 50 cm). La importancia del error causado por la séptima suposición depende de la irregularidad de la copa y varía de una situación a otra. La octava y novena suposiciones permiten definir, con suficiente exactitud los planos geométricos usados en el cálculo.

### Algoritmo de cómputo

El algoritmo de cómputo del programa Sibú se presenta en la Fig. 1. La simulación se realiza para cada una de las cuadrículas, tomando como referencia la situación en el centro de la cuadrícula. Se estima la densidad del flujo fotosintético de fotones (PPFD) incidente sobre el cultivo (PPFD<sub>i</sub>) para varios puntos en el tiempo (t), a un intervalo constante (Δt) entre ellos. La integral de la PPFD<sub>i</sub> sobre el período de simulación (t<sub>1</sub> - t<sub>2</sub>) se estima para la cuadrícula p con la sumatoria:

$$PPE_i(p) = \sum_{t_1}^{t_2} \Delta t \cdot PPFD_i(p,t) \quad (1)$$

donde PPE<sub>i</sub>(p) es la exposición fotosintética de fotones en la cuadrícula p durante el período de simulación.

Los datos de ubicación y dimensiones de los árboles, como el de la altura del cultivo agrícola deben estar grabados en un archivo en el disco de la computadora. Este archivo debe contener los resultados de varias mediciones, tomando como referencia temporal el número de semanas a partir de la poda de los árboles. Esto último se realiza con el objeto de tomar en cuenta el desarrollo de los árboles durante el período de simulación.

La integración de la PPE<sub>i</sub>(p) se realiza computacionalmente en los tres ciclos del algoritmo, los cuales funcionan a nivel diario (ciclo I en Fig. 1) y horario (ciclo II) en el tiempo y a nivel de cuadrícula (ciclo III) en el espacio.

El ciclo I actualiza las variables que tienen variación diaria o de mayor duración. Siempre al empezar un nuevo día el programa revisa este archivo para actualizar los datos de los árboles, los cuales son usados por el programa. El programa actualiza los parámetros de la transmitancia de la copa usando las ecuaciones presentadas por Nygren et al. (1993). Por último se calcula la declinación solar.

El ciclo II calcula la posición del sol y, en función de ésta, la PPFD incidente sobre los árboles (PPFD<sub>0</sub>), para cada punto de tiempo.

El ciclo III efectúa el cálculo de PPFD<sub>i</sub> para cada una de las cuadrículas. Primero se revisan todos los árboles. si ninguno de ellos sombrea la cuadrícula revisada, el programa marca que para ese punto PPFD<sub>i</sub> = PPFD<sub>0</sub>. En el caso de que uno o más árboles sombreen la cuadrícula, se calcula la distancia que atraviesan los rayos solares a través de la copa. En esa situación el programa calcula el PPFD<sub>i</sub> en función de esta distancia y de los parámetros de transmitancia de la copa. La PPFD<sub>i</sub> se multiplica por el intervalo de integración en segundos, y su resultado se suma al valor de PPE<sub>i</sub> integrado hasta el momento para este punto.

Los resultados se graban en el disco después de realizar la integración para todo el período predefinido por el usuario.

### Estimación de la radiación global y densidad de flujo fotosintético de fotones (PPFD) incidente sobre los árboles

Tanto para la estimación de la radiación solar no sombreada como para la estimación de la localización

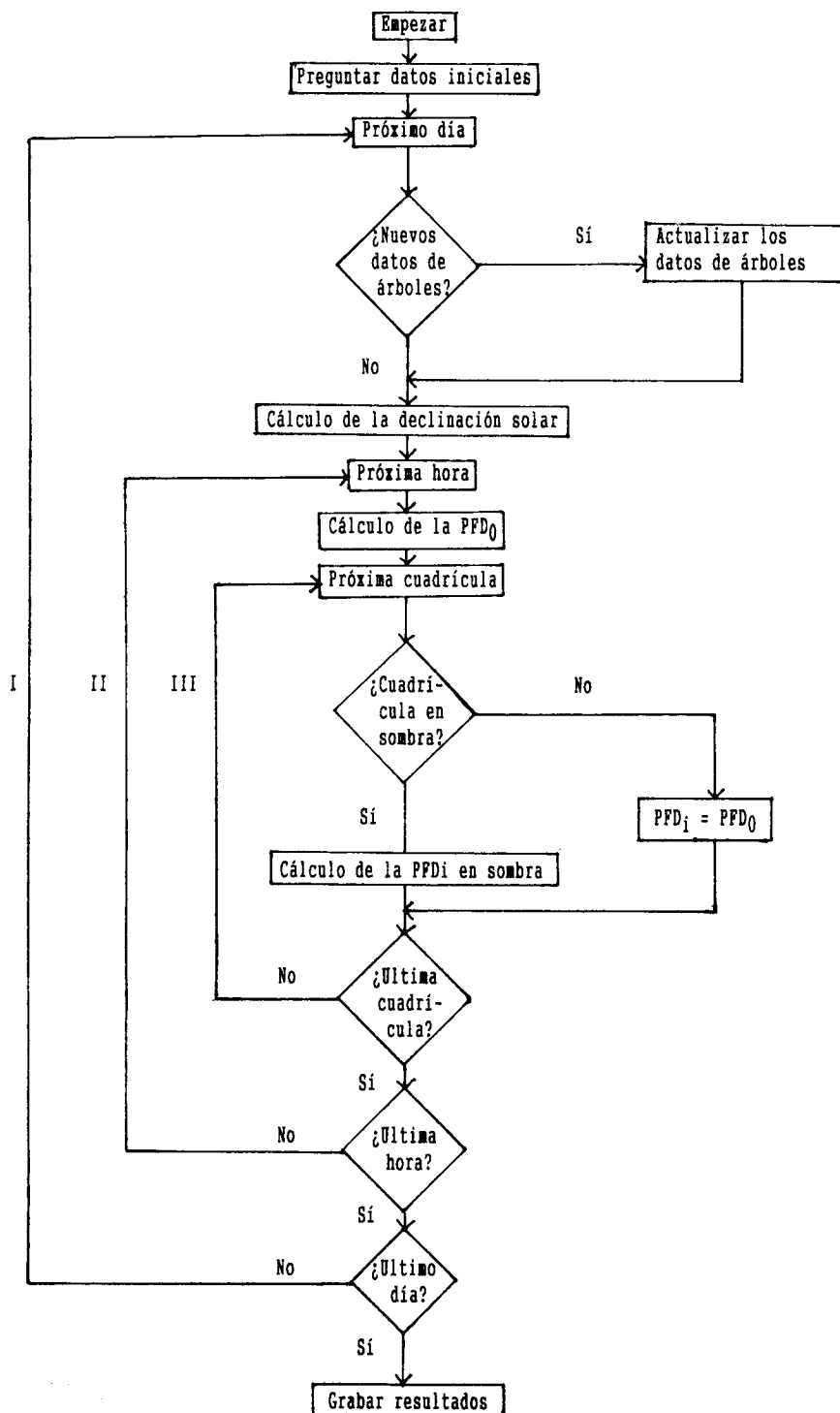


FIG. 1. Algoritmo de cómputo del programa Sibú.

de la sombra de los árboles es necesario calcular la posición del sol, que es función del movimiento anual y diario de la tierra alrededor del sol y de la latitud del lugar. Varios autores presentan ecuaciones para este cálculo (Campbell 1981, Ducrey 1975, Gates 1980, Ross 1981). El cálculo de la localización de la sombra de los árboles usado en el modelo requiere que el acimut solar se mida desde el norte en la dirección del movimiento de las manecillas del reloj, variando de 0 a  $2\pi$  radianes; y que la elevación solar se mida desde el horizonte, variando entre 0 y  $\pi/2$  radianes.

El valor de la irradiancia en una superficie perpendicular a los rayos solares en el nivel superior de la atmósfera es de  $1380 \text{ Wm}^{-2}$ . Este valor se llama constante solar ( $R_{OO}$ ). Cuando la radiación pasa por la atmósfera una parte es reflejada al espacio, otra es absorbida por la atmósfera, otra es transmitida directamente y otra se dispersa en todas las direcciones al chocar con el agua, polvo y contaminantes del aire, y llega a la superficie de la tierra desde todo el hemisferio celeste. Para la investigación ecológica, las fracciones de radiación más importantes son la transmitida directa, llamada radiación directa ( $R_b$ ) y la dispersa, llamada radiación difusa ( $R_d$ ). (Ross 1981).

La transmitancia de la atmósfera para la radiación directa es función de la distancia que recorren los rayos solares a través de la atmósfera y de la concentración promedio de las partículas que causan la dispersión de la radiación. El efecto de las partículas se refleja en el valor del coeficiente ( $\tau$ ) de la transmitancia atmosférica para la  $R_b$ . Cuando el sol no está en el cenit se debe hacer la corrección geométrica de la constante solar. En condiciones de cielo despejado la  $R_b$  se estima (Gates 1980):

$$R_b = R_{OO} \cdot \sin \phi \cdot \tau^{(1/\sin \phi)} \quad (2)$$

donde  $\phi$  es el ángulo de elevación solar. En condiciones de cielo despejado la  $R_d$  es estimada (Gates 1980):

$$R_d = R_{OO} \cdot \sin \phi \cdot (0,271 - 0,294 \cdot \tau^{(1/\sin \phi)}) \quad (3)$$

La suma de estos dos componentes es la radiación global ( $R_g$ ). La proporción de la radiación activa para la fotosíntesis (RAF), con respecto a la radiación global no sombreada es relativamente constante (Szeicz 1974, Stigter & Musabilha 1982), pero su proporción dentro y debajo de una cobertura vegetal es difícil de predecir, ya que ésta depende de la densidad foliar de la cobertura, y de la absorción de la RAF por las hojas verdes, cuya absorbancia varía de una especie a otra (Ross 1981).

Puesto que el objetivo fue desarrollar un modelo para simular la irradiancia sobre un cultivo bajo sombra de árboles fue necesario convertir la  $R_g$  a RAF. La RAF se expresa en forma de flujo de partículas, los cuanta de luz o fotones, que es la forma más adecuada desde el punto de vista fisiológico, debido a las relaciones simples que existen entre el número de fotones absorbidos y la cantidad de dióxido de carbono asimilado.

La densidad del flujo fotosintético de fotones incidente sobre los árboles,  $PPFD_O$ , en  $\mu \text{ molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , se estima de la  $R_g$  expresada en  $\text{Wm}^{-2}$  (Nygren 1990):

$$PPFD_O = 1,83 \cdot R_g \quad (4)$$

El componente difuso de la  $PPFD_O$  ( $PPFD_{dO}$ ) se estima en las mismas unidades (Nygren 1990):

$$PPFD_{dO} = 3,28 \cdot R_d \quad (5)$$

### Geometría de los árboles

El procedimiento geométrico del programa Sibú considera en el espacio tridimensional los tres planos, presentados en la Fig. 2 (ver también Quesada et al. 1987):

1. **Plano solar** es el plano vertical paralelo a la orientación del flujo directo de fotones ( $\Theta$ ). El plano solar puede atravesar o no la copa del árbol según la posición del sol y del árbol.

2. **Plano de corte** es el plano horizontal situado a la altura del diámetro máximo de la copa. Este plano se define en forma independiente para cada árbol en el campo estudiado.

3. **Plano de sombra** es el plano horizontal sobre el que se estima la  $PPFD_i$ , situado a la mitad de la altura del cultivo.

Puesto que el plano de corte y el plano de sombra son paralelos las coordenadas horizontales son iguales en los dos planos. Además de estos planos se define el eje solar:

**Eje solar** es la recta de intersección entre el plano solar y el plano de corte.

Los primeros cálculos se efectúan en el plano de corte, marcando con x las coordenadas Este-Oeste, y con y las coordenadas Norte-Sur. Primero se revisa si el eje solar que pasa por la cuadrícula ( $x_i, y_i$ ) atraviesa la copa de algún árbol en el campo. Este es el caso si se encuentran dos puntos que cumplen el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 &= r^2 \\ (x - x_i) / (y - y_i) &= \tan \Theta \end{aligned} \quad (6)$$

donde  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas de la cuadrícula en el plano de corte,  $(x_j, y_j)$  son las coordenadas del punto central del árbol en el plano de corte,  $r$  es el radio de la copa del árbol y  $\Theta$  es el ángulo de acimut solar medido desde el Norte.

En caso afirmativo el programa procede a realizar los cálculos en el plano solar, marcando con  $x$  las coordenadas horizontales y con  $z$  las coordenadas verticales.

La intersección entre el plano solar y la copa del árbol es una elipse o semielipse. Esta intersección se referirá a continuación como la elipse  $C$  o la semielipse  $C'$ . Puesto que el principio del cálculo es el mismo para la elipse que para la semielipse, a continuación se hace referencia a la semielipse solo en casos en que algún detalle del cálculo sea diferente. La longitud de los semiejes de la elipse  $C$  se calculan proyectando los semiejes del corte máximo de la copa (altura y diámetro de la copa divididos por dos) a la elipse  $C$ .

En la próxima fase se revisa si el flujo de fotones, con inclinación  $\Theta$  recibidos en la cuadrícula  $(x_i, y_i)$  situada en el plano de sombra, atraviesa la elipse  $C$ . Primero se define la altura en que este flujo se cruza

con la línea que contiene el eje vertical de la elipse  $C$  y luego se convierte esta altura a las coordenadas cuyo origen es el punto central de la elipse  $C$  (Fig. 3).

$$z_O' = -(\tan \phi \cdot d + z_O) \quad (7)$$

donde  $d$  es la distancia entre la cuadrícula  $(x_i, y_i)$  y el eje vertical de la elipse  $C$ ,  $z_O$  es la altura del punto central de la elipse  $C$  sobre el plano de sombra,  $z_O'$  es la altura del punto donde el flujo de fotones, con inclinación  $\phi$ , cruza con la línea que contiene al eje vertical, convertida en coordenadas cuyo origen es el punto central de la elipse  $C$ .

El flujo de fotones con inclinación  $\phi$  recibido en la cuadrícula  $(x_i, y_i)$  atraviesa la elipse  $C$  si se cumple el sistema de ecuaciones (Fig. 3):

$$\begin{aligned} x^2 / a^2 + z^2 / b^2 &= 1 \\ z &= z_O' - \tan \phi \cdot x \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $a$  y  $b$  son el semieje horizontal y vertical de la elipse  $C$ , respectivamente.

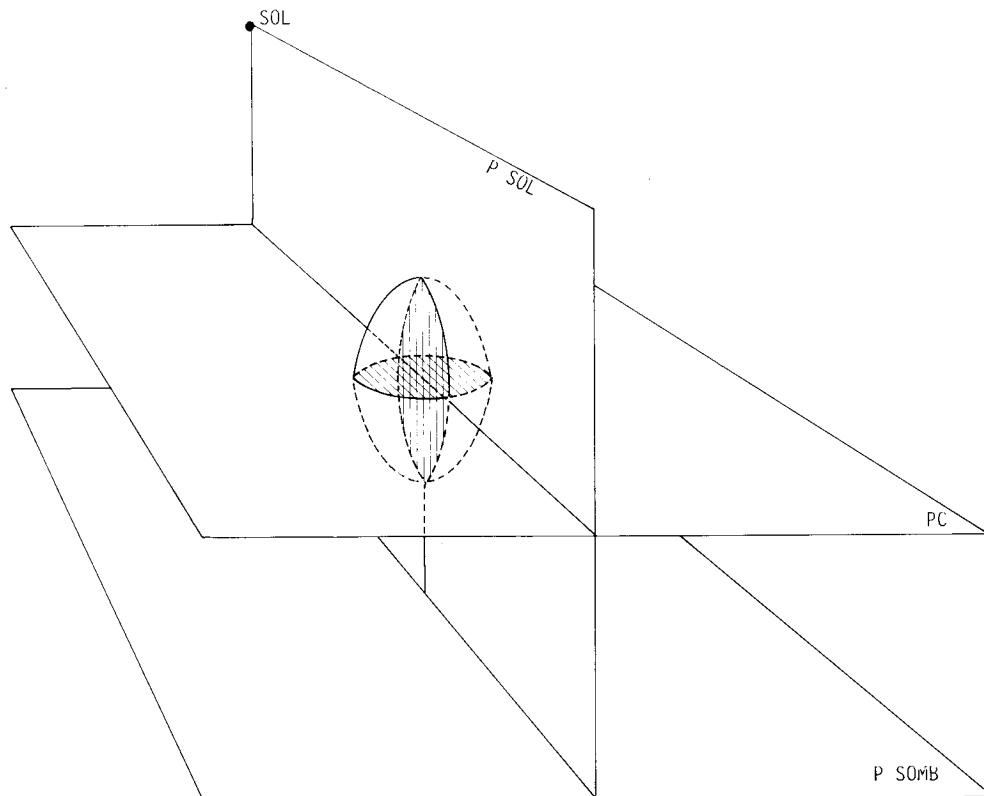


FIG. 2. Ubicación del plano solar (P SOL), plano de corte (PC) y plano de sombra (P SOMB).

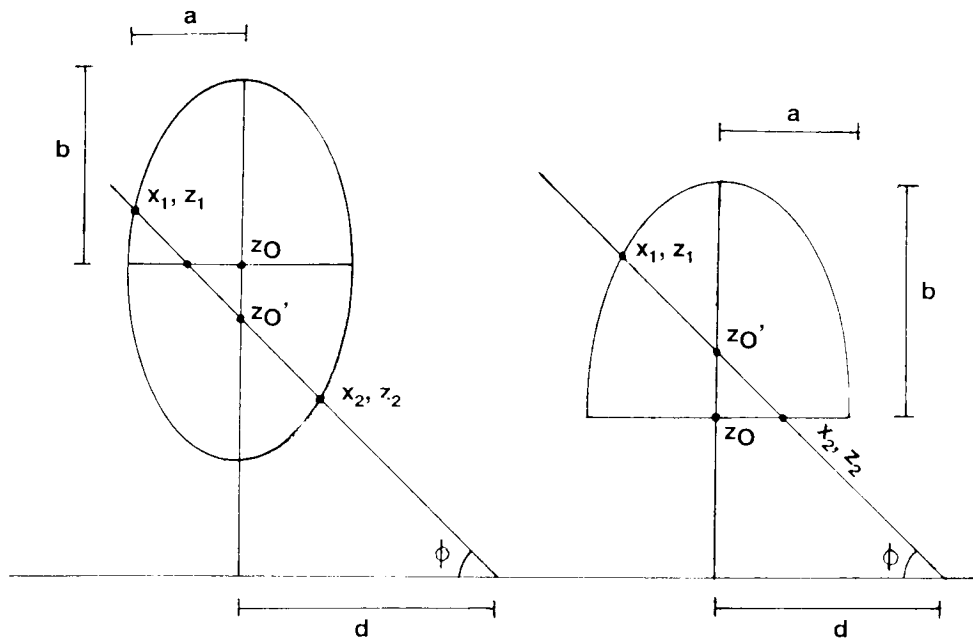


FIG. 3. Los puntos cardinales usados para la determinación de la longitud de la trayectoria del flujo directo de fotones a través de la copa de los árboles de forma elipsoidal (elipse C, izq.) y semielipsoidal (semielipse C', der.).

Tomando a  $(x_1, z_1)$  y  $(x_2, z_2)$  como los puntos de entrada y salida, respectivamente, del flujo de fotones en la copa, se calcula la longitud de su trayectoria en la copa,  $s$ , para la elipse C (Fig. 3):

$$s = (x_2 - x_1) / \cos \phi \tag{9}$$

En el caso de la semielipse C' es posible que se resuelva el sistema (8) aunque el flujo de fotones no atraviese la semielipse. Este es el caso si  $z_1$  y  $z_2$  son menores de cero. Así, para la semielipse C' se calcula la longitud del segmento (Fig. 3):

$$s = (x_2 - x_1) / \cos \phi \tag{10}$$

$$z_1 \geq 0$$

$$z_2 \geq 0$$

o

$$s = z_1 / \sin \phi \tag{11}$$

$$z_1 \geq 0$$

$$z_2 < 0$$

En el caso de que varios árboles sombreen al mismo tiempo la cuadrícula, se usa el  $s$  mayor y las dimensiones del árbol que lo contiene en los cálculos de la transmitancia.

### Transmisión de la PPFd a través de la copa de árbol

La transmisión de la PPFd en la copa se estima aplicando la Ley de Beer acerca de transmisión de la radiación en un medio turbio (Nygren et al. 1993, Thornley 1976):

$$PPFD_i = PPFD_O \cdot e^{-ks} \tag{12}$$

donde  $k$  es el coeficiente de transmisión. Actualmente el valor de este parámetro corresponde al ajustado experimentalmente en *E. poeppigiana*, y tiene una variación cíclica en el tiempo, que se puede estimar con una ecuación sinusoidal (Nygren et al. 1993):

$$k = 1,91 + 0,46 \cdot (\sin (0,26 \cdot t)) \tag{13}$$

donde  $t$  es el tiempo expresado en semanas desde la poda.

La frecuencia relativa de puntos solares (SF) en la copa se estima (Nygren et al. 1993):

$$SF = e^{-\Gamma s} \tag{14}$$

donde  $\Gamma$  es el coeficiente de penetración. En el caso de *E. poeppigiana* también el valor de  $\Gamma$  presenta una

variación cíclica en el tiempo, descrito con la ecuación (Nygren et al. 1993):

$$\Gamma = 2,25 + 0,57 \cdot (\sin(0,24 \cdot t)) \quad (15)$$

Los parámetros en las ecuaciones (13) e (15) deben ser ajustados por el usuario para que correspondan a la especie arbórea usada en el sistema simulado.

Puesto que la ecuación (12) describe la transmitancia de la copa tanto para el componente directo como para el difuso de la PPF<sub>D</sub>, estos dos componentes se estiman matemáticamente en esta fase del cálculo. Si la cuadrícula se encuentra dentro del perímetro de la copa del árbol, se usa como valor de PPF<sub>D<sub>i</sub></sub> el estimativo calculado con la ecuación (12), suponiendo que en esas condiciones el resultado estima bien la PPF<sub>D<sub>i</sub></sub> total. Si la cuadrícula está ubicada en el callejón se multiplica la PPF<sub>D<sub>i</sub></sub> estimada con la ecuación (12) por la SF, y se le añade la PPF<sub>D<sub>O</sub></sub>:

$$PPFD_i' = PPF_{D_i} \cdot SF + PPF_{D_O} \quad (16)$$

donde PPF<sub>D<sub>i</sub></sub>' es la PPF<sub>D<sub>i</sub></sub> ajustada sobre la cuadrícula en el callejón.

## RESULTADOS DE COMPROBACION

Las mediciones de comprobación se llevaron a cabo en el experimento permanente "Orientación de Callejones" del Proyecto Arboles Fijadores de Nitrógeno (AFN) del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, situado en su finca experimental (9°53'N, 83°39'W, 600 m s.n.m.). El experimento consiste en un cultivo secuencial de maíz y frijol en callejones entre surcos de *E. poeppigiana*, que están plantados en tres orientaciones, este-oeste, noroeste-sureste y norte-sur. El espaciamiento de los árboles es 4 x 6 m. Todos los árboles pertenecen al clon 2660 de *E. poeppigiana*.

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. Los árboles fueron podados el 27 de noviembre de 1989 y el frijol se sembró el 6 de diciembre de 1989. Las mediciones de la PPF<sub>D<sub>i</sub></sub> se llevaron a cabo entre el 20 de diciembre de 1989 y el 20 de febrero de 1990.

La PPF<sub>D<sub>O</sub></sub> se midió usando un sensor de quantum Li-Cor LI-190SB (Li-Cor Inc., Lincoln, Neb., EE.UU.) colocado en un mastil sobre los árboles y conectado a un registrador de datos Li-Cor LI-1000. La PPF<sub>D<sub>i</sub></sub> se midió usando cinco sensores lineales de quantum Li-Cor LI-191SB conectados a otro registrador de datos Li-Cor LI-1000. Los sensores lineales de quantum tienen cabeza sensitiva de 12.7 x 1000 mm y promedian así la PPF<sub>D</sub> sobre una línea de un metro. Los sensores se colocaron sobre las hileras de frijol ubicadas a 0,75 m, 1,75 m y 3,0 m desde los surcos de *E. poeppigiana*. Estos sensores se rotaron al azar entre las parcelas de medición durante el período de cultivo. Todos los sensores eran leídos cada cinco segundos y las medias de diez minutos eran grabados en la memoria del registrador.

Para comparar los resultados con los de la simulación se calculó la PPE<sub>i</sub> diaria a partir de las lecturas de PPF<sub>D<sub>i</sub></sub>.

## Ajuste de las simulaciones a las condiciones climáticas locales

Puesto que el modelo simula la PPE potencial, sin tomar en cuenta la nubosidad local, se estudió la posibilidad de ajustar los resultados de la simulación a las condiciones locales del tiempo con un factor de corrección basado en el brillo solar (las horas de sol en relación a la duración del día). Para este propósito se calculó la PPE sin sombra (PPE<sub>O</sub>) diaria de las mediciones de la PPF<sub>D<sub>O</sub></sub> en el área experimental. El número de horas sol diaria se obtuvo de la estación meteorológica del CATIE.

A estos datos se ajustó una ecuación derivada de la fórmula de Black:

$$PPE_O' = PPE_O \cdot (c_1 + c_2 \cdot (n/N)) \quad (17)$$

donde PPE<sub>O</sub> es la PPE simulada en molm<sup>-2</sup>, n es el número de horas diarias de sol, N es la duración astronómica del día en horas, c<sub>1</sub> y c<sub>2</sub> son parámetros locales y PPE<sub>O</sub>' es la PPE ajustada.

Los valores de los parámetros c<sub>1</sub> y c<sub>2</sub> estimados de 96 observaciones con la ecuación (17) para Turrialba fueron (Nygren 1990):



$$c_1 = 0,38$$

$$c_2 = 0,77$$

y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del ajuste fue de 0,99.

#### Comparación entre la exposición fotosintética de fotones simulada y la medida sobre el cultivo ( $PPE_i$ )

En la comprobación de la validez del ajuste de la PPE, con la ecuación (17) bajo sombra de árboles, se usaron las mediciones llevadas a cabo con los sensores lineales de quantum. La variable de comparación fue la  $PPE_i$  por sensor durante el período de medición en la parcela. Así se tuvieron 60 observaciones para usar en la comparación.

Las simulaciones se realizaron usando los datos de campo de los árboles individuales de cada parcela de medición. Se simuló la  $PPE_i$  potencial, ajustada con la ecuación (17) antes de compararla con las mediciones. En la comparación se emplearon los puntos del mapa de la  $PPE_i$ , resultantes del programa, que corres-

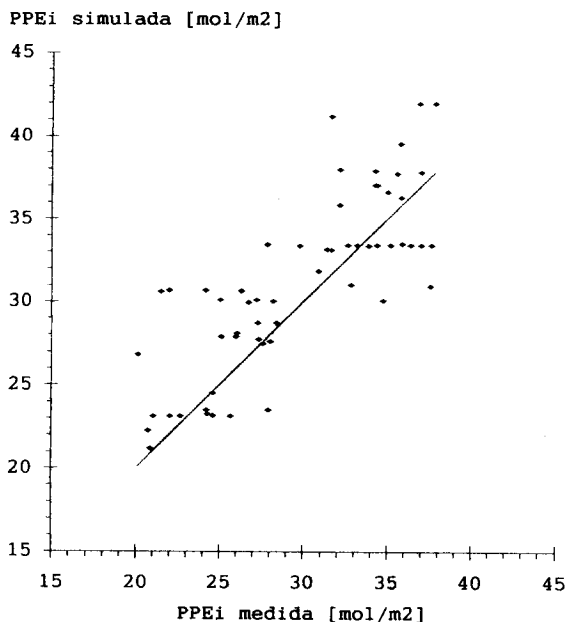


FIG. 4. Comparación entre la exposición fotosintética de fotones diaria incidente sobre el cultivo ( $PPE_i$ ), medida y simulada.

pondían a la ubicación de los sensores lineales en la parcela.

Los resultados de la comparación se presentan en la Fig. 4. La  $PPE_i$  simulada y ajustada dió una ligera sobreestimación con respecto a las mediciones. El error promedio de las 60 observaciones fue +4,90%, con una desviación estándar de 9,98%. La prueba t para probar si este valor difiere significativamente de cero dió un valor de t 1,70, el cual es estadísticamente significativo al 9,5%.

#### DISCUSION

La estimación de la  $PPE_i$  en el modelo se basa en una serie de supuestos fuertes. A pesar de eso, en la comprobación del modelo se encontró una diferencia de solo un +4,9% con respecto a las mediciones. Probablemente, la causa de la sobreestimación observada es la no inclusión del efecto de los árboles sobre el componente difuso de la PPFD. Con la estimación de la razón  $R_d/R_g$  promedio de 0,1, el efecto de los surcos de árboles sobre la  $R_d$ , en los trópicos, causaría un error de la magnitud observada, según simulaciones presentadas por Jackson & Palmer (1989). Aparentemente los errores por los otros supuestos son pequeños y aleatorios, y se compensan entre sí.

Puesto que el alcance de la sombra es diferente sobre el cultivo y sobre el suelo, se decidió hacer el cálculo basado en un "alcance promedio", es decir el alcance de la sombra es calculado a una altura equivalente a la mitad de la altura del cultivo. Se debe notar que la  $PPE_i$  estimada no corresponde a ese nivel, sino al nivel sin sombra del cultivo. Este procedimiento aparentemente confuso se fundamenta en realizar la estimación del alcance de la sombra sobre aquellas hojas donde se produce la mayor tasa de fotosíntesis, es decir en la parte superior de la cobertura.

El ajuste a las condiciones climáticas locales se hizo basado en la  $PPE_O$  diaria. Para el período de la experimentación de este estudio la ecuación (17) dió un ajuste exacto para las condiciones sin sombra. Al hacer un ajuste de este tipo se debe notar que solo se pasa del cál-

culo de la PPE<sub>i</sub> en condiciones del cielo despejado a la estimación de la PPE<sub>i</sub> en condiciones de constante nubosidad, sin cambios durante el día. Así el ajuste no necesariamente mejora la aplicabilidad de los resultados de la simulación a condiciones reales.

El ajuste, que supone igual nubosidad durante todo el día, puede causar un error sistemático en el espacio, si el tiempo sigue algún patrón general diario. Por ejemplo, si las mañanas son generalmente despejadas y las tardes nubladas, en los callejones con orientación Norte-Sur el ajuste causa una subestimación del lado Oeste, ya que este lado está expuesto al sol durante la mañana cuando no hay nubes. En forma similar, del lado Este del callejón el ajuste causa una sobreestimación, ya que este lado estaría expuesto al sol en la tarde, cuando hay mayor nubosidad.

La dificultad de ajustar la PPE<sub>i</sub> potencial a las condiciones locales limita la aplicabilidad del modelo para el estudio de los sistemas existentes. La falta de ajuste no es un problema grave para su aplicación como un modelo exploratorio, puesto que el modelo simula "el peor caso". En condiciones donde predomina la radiación difusa, el efecto relativo de los árboles sobre la irradiancia en el callejón es menor o, dependiendo de la orientación de los surcos, igual que en condiciones dominadas por la radiación directa (Jackson & Palmer 1989).

### CONCLUSIONES

1. Las ventajas del modelo Sibú son su flexibilidad y cantidad de efectos que toman en cuenta: el modelo simula la exposición fotosintética de fotones en el campo con sombra de árboles considerando la variación en tiempo y espacio, la dinámica de los árboles y del cultivo, incluyendo la dinámica de la transmitancia de la copa en el tiempo. No hay restricciones para la ubicación de los árboles en el campo, por lo cual el programa es aplicable a una gama amplia de sistemas agroforestales.

2. Actualmente el modelo tiene los parámetros de la transmitancia de la copa sólo para *E. poeppigiana*, pero si estos son modificados, el

programa se puede ajustar para cualquier especie arbórea, que es manejada con podas periódicas.

3. El modelo Sibú permite estudiar el efecto del arreglo espacial de los árboles, de la frecuencia de la poda y de las combinaciones de la altura del cultivo y de la forma de los árboles, sobre el régimen de radiación solar.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado como parte de la tesis de maestría en el CATIE, bajo la supervisión del comité asesor formado por el Dr. Germán Sánchez, por el profesor consejero, Dr. Pedro Oñoro, M.Sc. Florent Maraux y M.Sc. José Arze. Agradecimientos a todos ellos por su valiosa cooperación en el desarrollo del modelo y por la revisión del manuscrito del presente artículo. El trabajo fue financiado por la Academia de Finlandia.

### REFERENCIAS

- CAMPBELL, G.S. Fundamentals of radiation and temperature relations. In: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C.B.; ZIEGLER, H. (Eds.), *Physiological plant ecology*. I. Responses to the physical environment. Berlin: Springer-Verlag, 1981. p.11-40.
- COHEN, S.; FUCHS, M.; MORESHET, S.; COHEN, Y. The distribution of leaf area, radiation, photosynthesis and transpiration in a Shamouti orange hedgerow orchard. Part II. Photosynthesis, transpiration, and the effect of row shape and direction. *Agricultural and forest Meteorology*, v.40, p.145-162, 1987.
- CONNOR, D.J. Plant stress factors and their influence on production of agroforestry plant associations. In: HUXLEY, P.A. (Ed.). *Plant research and agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 1983. p.401-426.
- DUCREY, M. Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. I. Analyse théorique de l'interception. *Annales des Sciences Forestières*, v.32, p.73-92, 1975.
- GATES, D.M. *Biophysical ecology*. New York: Springer-Verlag, 1980. p.75-180.

- HUXLEY, P.A. Agroforestry experimentation: Separating the wood from the trees? *Agroforestry Systems*, v.5, p.251-275, 1987.
- HUXLEY, P.A. The tree/crop interface - or simplifying the biological/environmental study of mixed cropping agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, v.3, p.251-266, 1985.
- JACKSON, J.E.; PALMER, J.W. Light availability at the tree/crop interface. In: REIFSNYDER, W.S.; DARNHOFER, T.O. (Eds.). *Meteorology and agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 1989. p.391-400.
- 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.
- KUULUVAINEN, T.; PUKKALA, T. Effects of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.40, p.215-231, 1987.
- 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.
- NYGREN, P.; MARAUX, F.; SANCHEZ, G.A. Transmisión de la radiación solar en la copa de *Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.28, n.2, p.167-176, 1993.
- OKER-BLOM, P. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modeled forest stands. *Acta Forestalia Fennica*, v.197, 1986. 44p.
- PALMER, J.W. Diurnal light interception and a computer model of light interception by hedgerow apple orchards. *Journal of Applied Ecology*, v.14, p.601-614, 1977.
- QUESADA, F.; SOMARRIBA, E.; VARGAS, E. *Modelo para la simulación de patrones de sombra de árboles*. Turrialba: CATIE, 1987. 91p. (Serie Técnica, Informe Técnico, 118).
- ROSS, J. *The radiation regime and architecture of plant stands*. The Hague: Dr. W. Junk Publishers, 1981. 391p.
- SATTERLUND, D.R. Forest shadows: How much shelter in a shelterwood? *Forest Ecology and Management*, v.5, p.27-37, 1983.
- SSEKABEMBE, C. Perspectives on hedgerow intercropping. *Agroforestry Systems*, v.3, p.339-356, 1985.
- STIGTER, C.J.; MUSABILHA, V.M.M. The conservative ratio of photosynthetically active radiation to total radiation in the tropics. *Journal of Applied Ecology*, v.19, p.853-858, 1982.
- SZEICZ, G. Solar radiation for plant growth. *Journal of Applied Ecology*, v.11, p.617-636, 1974.
- THORNLEY, J.H.M. *Mathematical models in plant physiology*. London: Academic Press, 1976. 318p.
- VANDERMEER, J. A computer-based technique for rapidly screening intercropping designs. *Experimental Agriculture*, v.22, p.215-232, 1986.
- VANDERMEER, J. *The ecology of intercropping*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 237p.

## ANEXO - Lista de símbolos.

Símbolo	Descripción	Unidad
PPFD	Densidad de flujo fotosintético de fotones	$\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
PPE	Exposición fotosintética de fotones	$\text{mol m}^{-2}$
$R_{00}$	Constante solar	$1380 \text{ W m}^{-2}$
$R_b$	Radiación directa	$\text{W m}^{-2}$
$R_d$	Radiación difusa	$\text{W m}^{-2}$
$R_g$	Radiación global	$\text{W m}^{-2}$
$\phi$	Ángulo de elevación solar medido desde horizonte	rad
$\Theta$	Ángulo de acimut solar medido desde el Norte	rad
$\tau$	Transmitancia de la atmósfera para la radiación directa	sin unidad

continua...

## ANEXO - Lista de símbolos. (Continuación).

Simbolo	Descripción	Unidad
n	Horas diarias de sol	h
N	Duración astronómica del día	h
$c_1, c_2$	Parámetros locales de la fórmula de Black	sin unidad
$(x_i, y_i)$	Coordenadas de la cuadrícula en plano de corte	m,m
$(x_j, y_j)$	Coordenadas del árbol en plano de corte	m,m
$(x_1, z_1)$	Punto de entrada del flujo de fotones a la copa	m,m
$(x_2, z_2)$	Punto de salida del flujo de fotones de la copa	m,m
r	Radio de la copa del árbol	m
a	Semieje horizontal de la elipse o semielipse	m
b	Semieje vertical de la elipse o semielipse	m
$z_O$	Altura del punto central de la elipse C sobre el plano de sombra	
$z_O'$	Altura del punto donde el flujo de fotones con inclinación se cruza con el eje vertical de la elipse C, convertida a coordenadas cuyo origen es el punto central de la elipse	m m
d	La distancia entre la cuadrícula $(x_i, y_i)$ y el semieje vertical del elipse C	m
s	Largo de la trayectoria que atraviesan los rayos solares dentro de la copa	m
k	Coefficiente de transmisión	sin unidad
SF	Frecuencia relativa de puntos solares	sin unidad
$\Gamma$	coeficiente de penetración	sin unidad

Nota: Los subíndices O y i, en los símbolos de la radiación, significan incidente sobre los árboles e incidente sobre el cultivo, respectivamente.