



## **Um Modelo multi-camadas para Atenuação de Radiação Solar em Florestas e Plantações**

**Edileuza C. de Melo**

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900  
Brasília. DF. e-mail: [edileuza@unb.br](mailto:edileuza@unb.br)

**Antonio C. P. Brasil Junior**

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900  
Brasília. DF. e-mail: [brasil@enm.unb.br](mailto:brasil@enm.unb.br)

***Resumo.** Neste trabalho, um modelo de atenuação da radiação solar incidente em florestas é apresentado, cuja propriedade de atenuação varia somente na direção vertical. Este modelo é aplicável em florestas horizontalmente homogêneas. O objetivo desta metodologia é de estimar a distribuição de radiação ao longo da camada vegetativa, quantificando também a parcela que atinge o solo. Essa distribuição é influenciada pela disponibilidade de radiação solar no topo da floresta e seu direcionamento; pela distribuição da área foliar; e pelas características óticas de folhas e troncos, etc. Trata-se de uma modelagem em multicamadas, que considera a variação de propriedades da área foliar com a altura da camada vegetal. Cálculos são desenvolvidos para duas bandas de radiação (Visível e Infravermelho próximo), assim como para as componentes direta e difusa da radiação. As equações que descrevem a atenuação dessas componentes e do espalhamento são utilizadas para o cálculo numérico. Considera-se ainda neste modelo, uma quantificação do espalhamento da radiação solar nos fitoelementos. Os resultados numéricos gerados no modelo foram comparados com resultados experimentais obtidos para uma plantação de trigo localizada na estação experimental de Rothamsted, Harpenden, Herts e floresta primária localizada na Reserva Floresta Ducke na região de Manaus-AM.*

***Palavras-Chave:** Radiação solar, Transferência de Calor em Florestas.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A disponibilidade de radiação solar em florestas é o principal mecanismo de aporte energético para um ecossistema florestal. A distribuição da radiação no interior da camada vegetativa controla toda a dinâmica de crescimento de plantas através da parcela absorvida pelo mecanismo de fotossíntese, e influencia a disponibilidade de água e nutrientes no solo, através de mecanismos de troca de calor e massa.

A distribuição de radiação solar em camadas vegetativas é influenciada por uma série de fatores: pela disponibilidade de radiação solar no topo da floresta e seu direcionamento, pela distribuição da área foliar, pelas características óticas de folhas e troncos, etc. Este é um tema de pesquisa que tem sido extensivamente explorado, com interesses multidisciplinares no desenvolvimento de modelos de clima e de crescimento de florestas.

A modelagem do balanço de radiação em florestas tem sido tratada de duas formas diferentes, dependendo da escala de aplicabilidade do modelo desenvolvido. Para modelos de clima, que são utilizados em escalas planetárias, parametrizações tem sido propostas com base em uma formulação globalizada, obtida da integração da atenuação da radiação até o solo. Estes modelos baseiam-se em uma formulação de atenuação e do espalhamento (*scattering*) da radiação no sentido atmosfera-solo e vice-versa. Este tipo de enfoque é conhecido como modelo *Two Stream* (Dickson, 1983 e Sellers, 1985). Grande parte dos modelos de interação floresta-atmosfera utilizados em códigos de simulação de clima, baseiam a troca radiativa neste conceito. Esta parametrização tem sido utilizada com sucesso para diferentes tipos de biomas, com validações experimentais que garantem a aplicabilidade em grandes escalas (Sellers *et al.*, 1996a e 1992).

Em outras situações, definidas por problemas em escalas locais, a quantificação da troca radiativa geralmente deve considerar heterogeneidades locais das características da camada vegetativa. Variações espaciais da área foliar, efeitos da forma de elementos vegetativos individualizados ou disposições geométricas padronizadas de plantações, são fatores que podem ser considerados na modelagem do balanço de radiação. Geralmente tais aplicações estão associadas aos interesses de estudo da dinâmica de sucessão secundária ou do crescimento de árvores em plantações, por exemplo. Modelos de interceptação de radiação em camadas (Norman & Jarvis, 1975), em elementos individualizados (Standt & Lieffers, 2000) ou mesmo em distribuições tridimensionais (de Castro & Fetcher, 1998) são disponíveis na literatura. Para tais modelos, técnicas numéricas diferenciadas são utilizadas. Um enfoque bastante difundido na literatura, adota técnicas de atenuação e espalhamento da radiação a partir da emissão de raios discretos. Tanto a radiação direta como a difusa são contabilizadas pela estatística de atenuação de um número de raios. Esta metodologia é similar à abordagem de traçado de raios, empregada em problemas de troca de calor radiativa em meios semitransparentes (Modest, 1993).

A metodologia de traçado de raios utiliza um modelo de atenuação tipo Beer-Lambert aplicado a cada raio emitido. Para a parcela de radiação solar direta, um número finito de raios são emitidos da superfície superior da floresta, com direção fixa dada pelo posicionamento do sol. Para a parcela difusa, considera-se uma emissão hemisférica de raios, em todas as direções, em diferentes posições da superfície superior da floresta. A energia radiante disponível em cada posição da camada florestal é obtida pela contagem do número de raios que atingem um volume de controle circunvizinho a esta posição. A parcela de radiação transmitida por espalhamento é obtida a partir da emissão de raios a partir de diferentes posições da camada vegetativa. O método de traçado de raios pode ser aplicado a estruturas florestais com arranjos tridimensionais de distribuições das propriedades óticas de atenuação e espalhamento de radiação.

No desenvolvimento de um modelo, é importante saber a influência de cada parâmetro na operação e nos resultados que serão obtidos (Bégué, 1993; Wang e Baldocchi, 1989). A relação de um parâmetro com o resultado pode não ser linear, mas exponencial, parabólico etc., ou pode ser uniforme em toda extensão dos valores dos parâmetros. Mudanças podem afetar a relação entre parâmetros e resultado. Portanto, é adequado na validação do modelo, aplicar um teste de sensibilidade.

Neste trabalho, apresenta-se um modelo de troca de radiação solar em florestas, cuja propriedade de atenuação de radiação da vegetação variam somente na direção vertical. O modelo é aplicável em florestas horizontalmente homogêneas, tais como florestas tropicais densas. O balanço de raios será efetuado em camadas, assim como a emissão esférica para o cálculo do espalhamento.

Para validar os resultados deste modelo, utilizou-se as medida de radiação obtidas por Szeicz, 1974 para uma plantação de trigo na estação experimental de Rothamsted, Harpenden, Herts e por Marques Filho, 1994 para uma floresta primária localizada na Reserva Floresta Ducke na região de Manaus-AM.

## 2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

## 2.1. Distribuição dos elementos de vegetação

Considera-se aqui que os elementos de vegetação (folhas e galhos) são distribuídos em um número finito de  $n$  camadas, como mostra a Fig. (1). Cada camada vegetativa  $i$ , possui uma densidade de área de elementos vegetativos, definida pelo Índice de Área Vegetativa  $a_i$  ( $m^2/m^3$ ). Este parâmetro quantifica as áreas foliar e de troncos no volume da camada vegetativa.

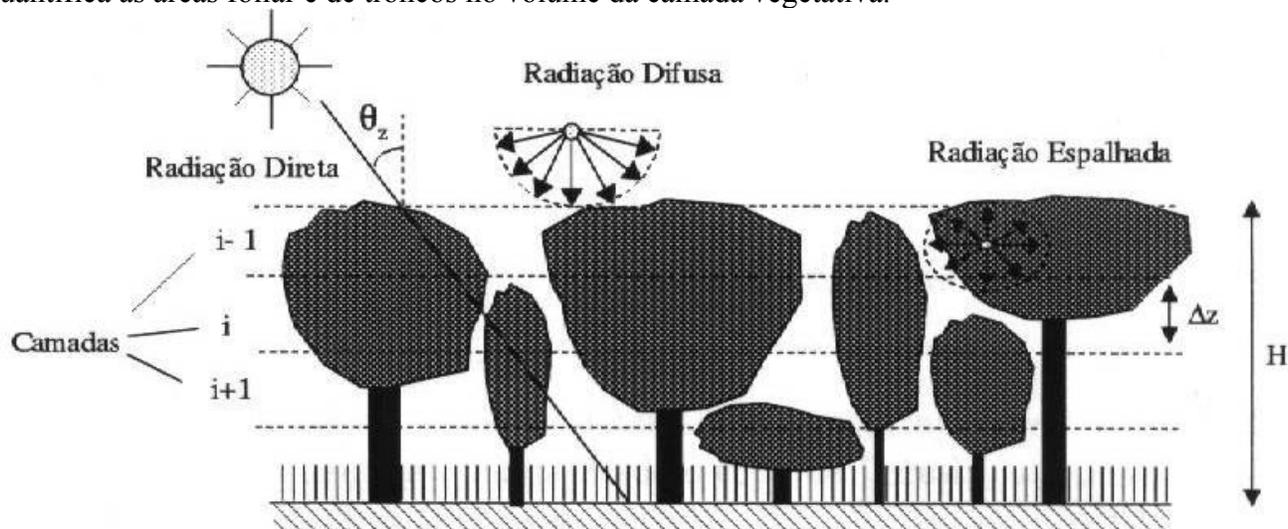


Figura 1. Modelo Multi-camadas

## 2.2. Mecanismo de Atenuação da Radiação Direta

Seja um raio incidente sobre a vegetação, definido por seu ângulo com a direção vertical – zênite  $\theta_z$ . Este raio penetra até uma camada  $i$  qualquer. A probabilidade  $P_i(\theta_z)$  para que este raio não seja interceptado por um fitoelementos e atravesse toda esta camada vegetativa é dado por:

$$P_i(\theta_z) = e^{-K_i(\theta_z) a_i \Delta z} \quad (1)$$

Nesta equação  $\Delta z$  é a espessura da camada e  $K_i(\theta_z)$  o coeficiente de extinção da radiação na camada. Este coeficiente depende de uma série de parâmetros associados com a disposição geométrica dos fitoelementos, com a arquitetura e com a disposição das árvores que compõem a camada vegetativa. Considera-se neste trabalho que o coeficiente de extinção pode variar ao longo da camada vegetativa. Considera-se também uma distribuição elipsoidal da área vegetativa (Campbell & Norman, 1998), de maneira que:

$$K_i(\theta_z) = \frac{\sqrt{x_e^2 + \tan^2 \theta_z}}{x_e + 1.774(x_e + 1.182)^{-0.733}} \quad (2)$$

Onde  $x_e$  é a relação das áreas de vegetação projetadas nas superfícies horizontal e vertical. Este parâmetro depende do tipo de bioma, e neste trabalho, pode variar ao longo da camada vegetativa. Para distribuições esféricas  $x_e = 1$ , para distribuições verticais  $x_e = 0$  e para distribuições horizontais  $x_e \rightarrow \infty$ .

A probabilidade de penetração do raio, dada pela Eq. (1), pode ser diretamente relacionada com a transmissividade média da radiação na camada. Portanto, considerando que o raio porta uma potência de emissão  $q_{i-1}$  ao entrar na camada vegetativa  $i$ , a energia atenuada na saída é dada por:

$$q_i = q_{i-1} P_i(\theta_z) = q_{i-1} e^{-K_i(\theta_z) a_i \Delta z} \quad (3)$$

Pela Eq. (3), pode-se determinar recursivamente a parcela da radiação direta incidente atenuada desde o topo da floresta até uma posição  $z_i$ , no centro da camada  $i$ .

$$Q^{\text{Direta}}(z_i) = I_b e^{-0.5 K_i(\theta_z) a_i \Delta z} \prod_{j=1}^{j=i-1} e^{-K_j(\theta_z) a_j \Delta z} \quad (4)$$

Nesta equação,  $I_b$  é a parcela de radiação solar direta no topo da floresta. Nota-se que um termo extra foi adicionado, fora do produtório, considerando a atenuação do topo da camada até sua posição central.

Alternativamente, pode-se ainda escrever uma forma integral contínua da Eq. (4) como:

$$Q^{\text{Direta}}(z) = I_b e^{-\int_0^z k(z, \theta_z) a(z) dz} \quad (5)$$

Introduz-se nesta equação as funções  $K(z, \theta_z)$  e  $a(z)$ , que quantificam a variação vertical do coeficiente de extinção e da área de vegetação. É comum ainda, definir a transmissividade do meio ótico como:

$$\tau_b(z, Z) \equiv \frac{Q^{\text{Direta}}(z)}{I_b} = e^{-\int_0^z K(z, \theta_z) a(z) dz} \quad (6)$$

### 2.3. Mecanismo de Atenuação da Radiação Difusa

A radiação difusa chega de todas as direções e é diferentemente atenuada da radiação do raio, que chega apenas de uma direção. Para o cálculo da radiação difusa, será considerada a atenuação de raios a partir de uma emissão hemisférica no topo da floresta. O modelo de atenuação é o mesmo da componente direta. Portanto, a radiação difusa que atinge um nível  $z_i$ , pode ser obtida por uma integração em todas as direções de emissão, na forma:

$$Q^{\text{Difusa}}(z_i) = 2 I_d \int_0^{\pi/2} \left( e^{-0.5 K_i(\theta) a_i \Delta z} \prod_{j=1}^{j=i-1} e^{-K_j(\theta) a_j \Delta z} \right) \text{sen } \theta \cos \theta d\theta \quad (7)$$

Ou na forma contínua:

$$Q^{\text{Difusa}}(z) = 2 I_d \int_0^{\pi/2} \tau_b(z, \theta) \text{sen } \theta \cos \theta d\theta \quad (8)$$

A variável  $I_d$  representa a parcela da radiação solar difusa no topo da floresta. Pode-se ainda definir a transmissividade de radiação difusa por:

$$\tau_d(z) \equiv \frac{Q^{\text{Difusa}}(z)}{I_d} = 2 \int_0^{\pi/2} \tau_b(z, \theta) \text{sen } \theta \cos \theta d\theta \quad (9)$$

As parcelas de radiação direta e difusa, atenuadas em cada posição vertical da floresta, podem ser obtidas pelas Eq. (4) e Eq. (7) ou de forma contínua pelas Eq. (5) e Eq. (8). Trata-se de um cálculo simples, que deve ser executado para cada camada de vegetação, com base nos valores das componentes diretas e difusas no topo da floresta, dados as propriedades de atenuação ao longo de toda a direção vertical.

#### 2.4. Mecanismo de Espalhamento

Da energia radiante que atinge uma camada  $i$ , quantificada pelas Eq. (4) e Eq. (7), uma parcela será absorvida pelos fitoelementos. A outra parte será reemitida em todas as direções através do mecanismo de espalhamento (*scattering*). A energia espalhada é emitida de forma esférica anisotrópica volumétrica, centrada em cada camada vegetativa.

A quantificação da radiação espalhada pela camada  $i$  está relacionada com a parcela de radiação atenuada na camada. Isto pode ser escrito como:

$$Q_{-}^{\text{espalhada}}(z_i) = (1 - \alpha) \left( Q^{\text{Direta}}(z_i) + Q^{\text{Difusa}}(z_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^n Q_{ij}^{\text{espalhada}} \right) \quad (10)$$

Esta equação é obtida do balanço de radiação na camada  $i$ . Introdz-se aqui a propriedade  $\alpha$ , que quantifica a parcela da radiação que será absorvida pelos fitoelementos.

O último termo do balanço radiativo, em forma de somatório, é a contribuição da troca de radiação espalhada entre as diferentes camadas. Este termo pode ser quantificado por:

$$Q_{ij}^{\text{espalhada}} = Q_{-}^{\text{espalhada}}(z_j) \int_0^{\pi/2} \left( e^{-0.5 K_i(\theta) a_i \Delta z} \prod_{k=i}^j e^{-K_k(\theta) a_k \Delta z} \right) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (11)$$

A utilização da Eq. (9) para todas as camadas vegetativas compõe um sistema de equações lineares, cujas incógnitas são os valores da radiação espalhada em cada posição  $z_i$ .

De posse das Eq. (9) e Eq. (10), pode-se quantificar o valor da radiação solar que atinge uma posição  $z_i$  da floresta como:

$$Q^{\text{Total}}(z_i) = Q^{\text{Direta}}(z_i) + Q^{\text{Difusa}}(z_i) - 0.5 * Q_{-}^{\text{espalhada}}(z_i) \quad (12)$$

A Equação (12) quantifica o valor da radiação atenuada em cada camada, e o resultado desta formulação induz a solução de um sistema de equações linear. Determinando-se assim o valor da radiação espalhada em cada camada.

Portanto, no presente trabalho, usaremos uma formulação mais simples, proposta por Campbell & Norman, (1998) para calcular a radiação espalhada para cada camada de vegetação, onde a absorvidade da folha para radiação é  $\alpha$ , e a transmissividade de radiação direta total (direta e espalhada) através da camada é:

$$\tau_b(z) = e^{(-\sqrt{\alpha} K(z, \theta_z) a(z) dz)} \quad (13)$$

Dados de absorvidade para diferentes tipos de vegetação em diferentes biomas são apresentados por Bonnan (1996). Existe uma forte dependência desta propriedade ótica, da banda de radiação incidente. São propostos valores para  $\alpha$  nas bandas do espectro visível – PAR (0.4 – 0.7  $\mu m$ ) e

infravermelho próximo – NIR ( $> 0.7 \mu m$ ). Os valores típicos para  $\alpha$  são  $\alpha_p = 0,8$  para radiação PAR e  $\alpha_n = 0,2$  para radiação NIR. Para radiação solar total, a absorptividade é a média dos valores para PAR e NIR e assim  $\alpha_s = 0,5$  (Campbell & Norman, 1998). Esta dependência, força que os cálculos de espalhamento, e conseqüentemente os de atenuação, sejam efetuados em duas bandas diferentes do espectro PAR e NIR, de maneira equivalente aos modelos de clima (Sellers *et al.*, 1996).

## 2.5. Modelo de Disponibilidade de Radiação

O nível de radiação incidente no topo da floresta é um dado climatológico que deve ser utilizado para o cálculo da atenuação da radiação na camada vegetativa de um dado bioma. Em geral, as bases de dados climatológicas disponibilizam somente dados de radiação solar global –  $I_g$ . Para a utilização dos modelos de atenuação propostos, necessita-se a estimativa de parcelas direta e difusa, assim como a quantificação nas diferentes bandas (PAR e NIR).

Diversos modelos solarimétricos são disponíveis na literatura. Utiliza-se aqui o modelo de Orgill & Hollands (1977), neste modelo a parcela da radiação difusa  $I_d$  é quantificada por:

$$\frac{I_d}{I_g} = \begin{cases} 1 - 0.294 k_T, & \text{for } k_T < 0.35 \\ 1.57 - 1.84 k_T, & \text{for } 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177, & \text{for } k_T > 0.75 \end{cases} \quad (14)$$

Neste modelo  $k_T \equiv I_g/I_0$  é a transmissividade da atmosfera, onde  $I_0$  é a radiação solar extraterrestre no plano horizontal. Este valor pode ser estimado por Duffie & Beckman (1980):

$$I_0 = I_{sc} \left[ 1 + 0.33 \cos \left( \frac{360n_d}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (15)$$

Nesta equação  $n_d$  é o dia do ano e  $I_{sc} = 1353 W/m^2$  é a constante solar.

Observa-se que o modelo solarimétrico dado pela Eq. (12) vale para valores médios horários da radiação solar.

No que concerne a distribuição espectral, considera-se que 45% da radiação encontra-se compreendida na banda do visível. Os outros 55% são na banda do infravermelho próximo (Campbell & Normann, 1998).

## 2.6. Posicionamento solar

Para completar as informações necessárias para o modelo de atenuação da radiação, necessita-se de um conjunto de equações que descrevam o posicionamento do sol. Por trigonometria esférica, o cosseno do ângulo zênite é dado por:

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (16)$$

Nesta equação  $\phi$  é a latitude local (positiva para o hemisfério norte),  $\delta$  é a declinação solar e  $h$  o ângulo hora (com periodicidade de 24 horas). Estes valores angulares variam ao longo do dia. Utilizar-se-á, no presente artigo, a metodologia de cálculo de posicionamento solar proposta por Michalsky (1988) que apresentam uma acurácia de  $0.01^\circ$  entre os anos de 1950-2050.

### 3. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

A distribuição de radiação solar na floresta é calculada numericamente através das equações que descrevem a atenuação das parcelas direta e difusa da radiação solar, e do espalhamento. Inicialmente a transmissividade da radiação difusa é calculada utilizando uma integração numérica da equação através do método de trapézios, considerando a emissão de 40 raios distribuídos no quadrante  $[0, \pi/2]$ . Para cada posição solar (equivalente à hora do dia), conhecendo-se os valores de  $I_b$  e  $I_d$ , calcula-se o valor da distribuição de componentes direta e difusa para cada camada de vegetação.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A transmissão da radiação através das folhas é dependente do comprimento de onda. As folhas das plantações absorvem mais na PAR e menos na NIR. Na camada vegetal das plantações, a radiação é transmitida através das folhas e entre as folhas e de acordo com a profundidade da camada há uma variação na composição espectral.

A fração da radiação incidente, que é interceptada pela camada vegetal, é responsável pelo espalhamento, transpiração e fotossíntese. Já a fração que não é interceptada e chega ao solo, está disponível para evaporação da água do solo.

O modelo proposto reproduz muito bem as medidas obtidas pelos experimentos realizados por (Szeicz 1974) e (Marques Filho, 1994) e o interesse principal é usa-lo como uma ferramenta para simular o efeito nos diferentes tipos de cobertura vegetal do processo de interceptação da radiação solar.

A Figura (2) apresentam a penetração da radiação nas bandas do espectro: (a) visível - PAR e (b) infravermelho próximo - NIR em uma plantação de trigo localizada na Estação Experimental de Rothamsted, Harpenden, Herts (Szeicz 1974), com registros planimetrados das 06.00 às 18.00 horas, onde os pontos correspondem aos sete dias selecionados entre 05 e 30 junho 1969, antes do crescimento atingir a altura de 100 cm.

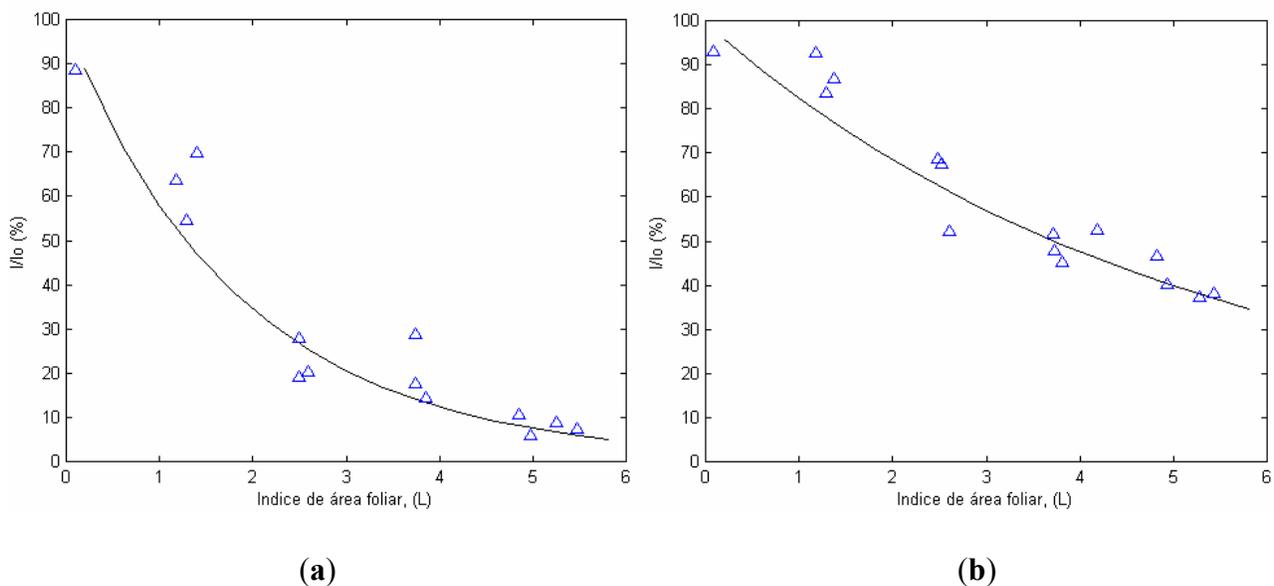


Figura 2. Média diária da transmissão da radiação solar em uma plantação de trigo no começo de junho (dados de Szeicz, 1974). Radiação incidente no topo da plantação, em (a) PAR e em (b) NIR. (—) modelo e ( $\Delta$ ) Szeicz.

Observa-se neste exemplo que a atenuação para PAR é visivelmente maior do que para NIR na plantação de trigo. Em (a) e (b) a irradiância na faixa do espectro visível e infravermelho próximo, respectivamente, é expressa como um percentual da radiação incidente sobre o topo da plantação.

O modelo utilizou os parâmetros para uma plantação de trigo definidos por Szeicz 1974 e o valor medido de  $x_e=0.96$  (de Campbell e van Evert, 1994), o qual aproxima-se de uma distribuição esférica, onde  $x=1$ .

As medidas de radiação para floresta primária (Marques filho, 1994) utilizadas no presente modelo, foram realizadas na Reserva Florestal Ducke a 25 quilômetros de Manaus, Amazonas, Brasil, no período de 1º de janeiro a 13 de abril de 1994, através de sensores que foram distribuídos em diferentes alturas no interior da vegetação. O sistema de aquisição de dados foi realizado no período diurno de 6:00h às 18:00h, com valores médios para intervalos de 20 minutos. Para estas condições foram realizadas as simulações que constam dos resultados.

A Figura (3) apresentam em (a) os valores médios de radiação solar total, abaixo da camada vegetal e em (b) o perfil do comportamento da radiação no interior de uma floresta Amazônica (Marques Filho, 1994), para o dia 12/02/94, com céu claro. Nota-se a consistência do modelo quando se faz a avaliação da similaridade qualitativa da curva traçada pelo modelo e do experimento na altura mais próxima do solo (8.23m).

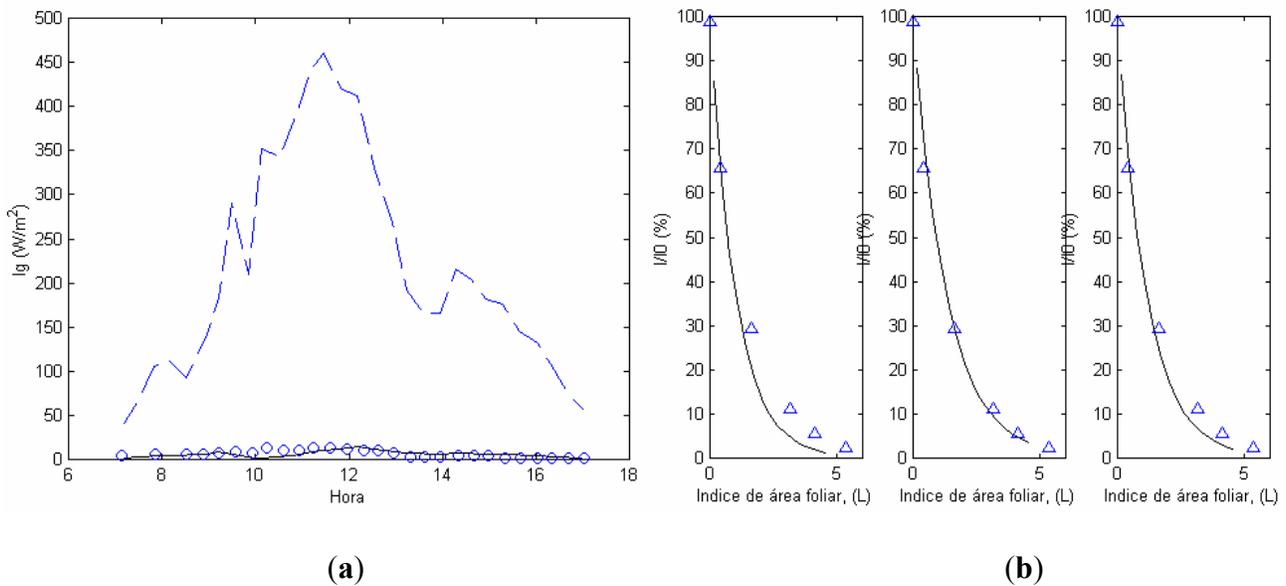


Figura 3. Média diária da transmissão da radiação solar em uma floresta Amazônica  
**(a)** radiação abaixo da camada vegetal. (—) modelo e (o) Marques Filho, 1994.  
**(b)** perfil do comportamento da radiação no interior da floresta, em uma hora do dia (11:20 hs). (—) modelo e ( $\Delta$ ) radiação PAR, NIR e total (Marques Filho, 1994).

Em (a) os pontos (o) mostram o fluxo da radiação solar abaixo do dossel para uma hora do dia. Os parâmetros utilizados são os mesmos definidos para uma floresta tropical. Em (b) os pontos ( $\Delta$ ) mostram que a radiação solar integrada que chega abaixo da camada vegetal é extremamente baixo associado ao valor do índice de área foliar alto. O índice calculado para a Reserva Ducke foi de 6,4, valor este consistente com o determinado em outros estudos para a área de floresta tropical (McWilliam et al., 1993), através da metodologia destrutiva de medida direta de toda área foliar existente em uma área amostral escolhida. Nobre, C. A. et al., (1999). A radiação medida junto ao solo no interior da floresta apresenta concordância com os resultados do modelo.

## REFERÊNCIAS

- Bonnan, G.B., 1996. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological and atmospheric studies: Technical Description and User's guide". NCAR Tech. Note, TN-417+STR.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998. "An introduction to Environmental Biophysics", Springer-Verlag, New York.
- de Castro, F., Fetcher, N., 1998. "Three dimensional model of interception of light by a canopy". *Agric. For. Meteorol.* 90, 215-233.
- Dickson, R.E., 1983, "Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance", *Adv. Geophys.* 25, 305-353.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1980. "Solar Engineering of Thermal Processes", J. Wiley, New York.
- Michalsky, J.J., 1988. "The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position (1950-2050)". *Solar Energy*, 40, 3, 277-235.
- Marques Filho, A. de O., 1997. "Regime de Radiação Solar e Características da Vegetação - Modelos de Inversão". *Acta Amazonica* 27(2): 119-134.
- Modest, M.F., 1993. "Radiative Heat Transfer", Ed. McGraw-Hill, New York.
- Nobre, C.A., et al., 1999. "Projeto Balanço de Energia, Vapor D'Água e CO<sub>2</sub> em áreas de floresta tropical na Amazônia Central" (Projeto 0966/95) realizado pelo INPE e INPA, durante o período de 1996 à 1999.
- Norman, J.M., Jarvis, P.G., 1975 "Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). V. Radiation penetration theory and test case". *J. of Appl. Ecol.* 9, 747-766.
- Orgill, J.F., Hollands, K.G.T., 1977. "Correlation equation for hourly diffuse radiation on horizontal surface". *Solar Energy*, 19, 357-
- Sellers, P.J., 1985. "Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration". *Int. J. Remote Sensing* 6, 1335-1372.
- Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.A., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Colletto, G.D., Bounoua, L., 1996. "A revised land surface parametrization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model formulation". *J. of Climate* 9, 676-705.
- Sellers, P.J., 1992. "Biophysical models of land surface processes". In *Climate System Modeling* Ed. K.E. Trenberth. Cambridge University Press, New York, 451-490.
- Shuttleworth, W.J., *et al.* 1984. "Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest". *Quart. J. R. Met. Soc.*, 110, 1163-1169.
- Stadt, K.J., Lieffers, V.J., 2000. "MIXLIGHT: a flexible light transmission model for mixed-species forest stands". *Agric. For. Meteorol.* 102, 235-252.
- Szeicz, G., 1974. "Solar radiation in plant canopies". *Journal of Applied Ecology*, 11, 1117-56.

## A MULTI-LAYERED MODEL FOR ATTENUATION OF SOLAR RADIATION IN FOREST AND CROP

**Edileuza C. de Melo**

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900  
Brasília. DF. e-mail: [edileuza@unb.br](mailto:edileuza@unb.br)

**Antonio C. P. Brasil Junior**

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900  
Brasília. DF. e-mail: [brasil@enm.unb.br](mailto:brasil@enm.unb.br)

## ***Abstract***

*In this work, an attenuation model of the incident solar radiation in forests, whose property only varies in the vertical direction, is presented. This model is applicable in horizontally homogeneous forests. This methodology's objective is to estimate the radiation distribution along the vegetative layer, also quantifying the portion that reaches the soil. That distribution is influenced by the availability of solar radiation on the top of the forest and its direction, by the distribution of the leaf area and the optical characteristics of leaves and stem, etc. The methodology is comprised of a multi-layered modeling, which considers properties' variation with the leaf area and the vegetation layer height. Calculations are developed for two radiation bands (visible and near infra-red), as well as for the direct and diffuse radiation components. The equations that describe the attenuation of those components and their scattering are used for the numeric calculation. It is still considered in this model, the scattering quantification of the solar radiation on vegetation elements. Predictions from the model are in good agreement with experimental data obtained in Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Herts and Reserva Florestal Ducke, near Manaus-AM.*

***Keywords.*** *Solar Radiation in Forest and Crop, Heat Transfer in Forest.*