

# IMPACTOS DA RADIAÇÃO GLOBAL SOBRE A MODELAGEM DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

João Hélio Torres D'ÁVILA<sup>1</sup>; Benito Moreira de AZEVEDO<sup>2</sup>; Thales Vinicius de Araújo VIANA<sup>3</sup>

## INTRODUÇÃO

A radiação solar e os fluxos de calor na atmosfera e na superfície do solo são responsáveis por fatores ambientais que definem o clima. O conhecimento das componentes direta e global é essencial para modelagem de vários sistemas conversores de energia solar. Os concentradores solares aproveitam mais de 90% da radiação solar global na forma de radiação solar direta.

A componente direta é raramente medida, devido ao alto custo do equipamento, de modo que, pesquisadores vêm desenvolvendo equações de estimativas da radiação solar direta, visando solucionar os problemas causados pelo pouco uso de equipamentos.

O espalhamento e a absorção da radiação solar por partículas de aerossóis e gases resulta em uma notável atenuação da componente solar direta e um moderado aumento na componente difusa. O resultado é um decréscimo líquido na irradiância solar global que alcança o solo (JACOVIDES et al., 2000).

RICIERI (1998) observou que durante o mês de julho, em Botucatu, SP, ocorreu um máximo de 20,05 MJ/m<sup>2</sup> de radiação solar direta na incidência normal e no mês de janeiro ocorreu um mínimo de 6,95 MJ/m<sup>2</sup>. Ao correlacionar a radiação direta com a radiação que chega no topo da atmosfera, verificou que aproximadamente 90% da radiação que incide no topo da atmosfera atinge a superfície terrestre.

As componentes da radiação solar, direta e difusa, podem ser estimadas usando informação de insolação. BENSON et al. (1984) estimaram a radiação solar direta e difusa através de medidas de brilho solar, usando regressão linear. VIGNOLA e McDANIELS (1986) calcularam a radiação direta para o pacífico noroeste usando diretamente a correlação direta global para seis localidades. A correlação diária foi derivada usando regressão padrão, e as correlações, decendial e mensal, foram obtidas usando uma aproximação de média móvel. Os dados diários foram melhor descritos por uma correlação com uma dependência cúbica para  $K_t > 0,175$  com  $R^2 = 0,953$ . Para  $K_t < 0,175$ , usaram um modelo linear ( $K_b = 0,016.K_t$ ).  $K_b$  é a transmissividade da radiação solar direta, e  $K_t$  é o índice de claridade

Este trabalho tem por objetivo desenvolver modelos de estimativas da radiação solar direta na incidência a partir da radiação solar global, nas três partições de tempo instantânea, horária e diária, visando fornecer informações para tomadas de decisões e otimização da energia solar em projetos de modelagem e simulação em estudos de conversão térmica e meios protegidos agrícolas.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para geração e validação do modelo foram utilizados da Estação de Radiometria Solar do Depto. de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (22° 51' S, 48° 26' W e 786 m de altitude). Os dados de radiação global ( $R_g$ ) foram obtidos através de um piranômetro EPPLEY-PSP. A radiação solar direta na incidência normal ( $R_{DN}$ ) foi obtida através de um pireliômetro EPPLEY-NIP, acoplado a um rastreador solar EPPLEY modelo ST-3. A aquisição dos dados foi realizada através de um Micrologger modelo CR23X da CAMPBELL SCIENTIFIC-INC.

Para as integrações horárias e diárias da radiação solar global e direta na incidência utilizou-se o programa SIMRAS, desenvolvido por CHAVES (1999).

A radiação solar no topo da atmosfera instantânea ( $I_0$ ) foi obtida através das Equações 01 e 02.

$$I_0 = I_{CS} E_0 \cos \theta_z \quad (01)$$

Onde:  $\theta_z$  é ângulo Zenital;  $I_{CS}$  é a constante solar = 1367 W/m<sup>2</sup>;  $E_0$  é fator de correção da excentricidade da órbita da terra;  $e$ ;  $\cos \theta_z = (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega)$  (02)

onde:  $\delta$  é a declinação solar (graus),  $\phi$  é a latitude do local (graus) e  $\omega$  é o ângulo horário (graus).

O fator de correção da excentricidade da órbita da terra foi obtido através da Equação 03.

$$E_0 = 1,00011 + 0,0334221 \cos \gamma + 0,00128 \sin \gamma + 0,000719 \cos 2\gamma + 0,000077 \sin 2\gamma \quad (03)$$

Onde:  $\gamma$  é a variação do ano em relação ao ângulo da terra, obtido através da equação 04.

$$\gamma = \frac{2\pi}{365} \left( DJ - 1 + \frac{Hora - 12}{24} \right) \quad (04)$$

Onde:  $DJ$  é o dia juliano, com valores de 1 a 365 dias.

Os parâmetros do modelo foram obtidos utilizando-se o Microcal Origin para cálculo e geração das curvas.

A verificação do ajuste do modelo foi baseada em STONE (1993), que derivou o teste t a partir dos indicadores estatísticos, o MBE (Mean Bias Error) que é a tendência do erro médio e o RMSE (Root Mean Square Error) que é a raiz do erro quadrado médio.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A transmissividade da radiação solar direta apresentou um comportamento crescente, não linear, com vários valores de  $K_b$  e um valor de  $K_t$ , fato este observado e relatado por JETER e BALARAS (1990).

Os valores de  $K_b$  e  $K_t > 0,80$  não apresentaram correlação, e acredita-se que isso ocorra devido aos efeitos das multireflexões. Segundo SUEHRCHE e

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Agrícola, UFV, Professor da Universidade Federal do Ceará, Depto Eng. Agrícola, jhelio@ufc.br

<sup>2</sup> Doutor em Agronomia, USP/ESALQ, Professor da Universidade Federal do Ceará, Depto Eng. Agrícola, benito@ufc.br

<sup>3</sup> Doutor em Agronomia, USP/ESALQ, Professor da Universidade Federal do Ceará, Depto Eng. Agrícola, thales@ufc.br

McCORMICK (1988), esses valores altos de  $K_t$  estão associados à uma acentuada taxa de reflexão de nuvens.

A correlação entre  $K_b$  x  $K_t$  apresentou um comportamento sigmoidal, sendo os modelos gerados a partir de uma função logística modificada de Boltzmann, que possibilitou definir e conhecer os parâmetros dos modelos gerados, para cada partição de tempo. As equações 05, 06 e 07 representam os modelos para as partições instantânea, horária e diária.

$$K_b^I = \frac{0,02 - 0,85}{1 + e^{(K_t - 0,58095)/0,07455}} + 0,85 \quad (05)$$

$$K_b^H = \frac{0,00002 - 0,89}{1 + e^{(K_t - 0,59228)/0,10364}} + 0,89 \quad (06)$$

$$K_b^D = \frac{0,02 - 0,97}{1 + e^{(K_t - 0,561)/0,08185}} + 0,97 \quad (07)$$

Os modelos apresentaram  $R^2$  de 0,804, 0,816 e 0,987, para as partições instantânea, horária e diária, respectivamente.

LAW e LI (1996), VIGNOLA e McDANIELS (1986); e LOUCHE et al., (1991); para modelar a transmitância solar direta, utilizaram funções polinomiais para descrever o comportamento de  $K_b$  x  $K_t$  obtendo bons ajustes, com valores de  $R^2$  em torno de 90%. Porém, por se tratarem de valores adimensionais, com limites inferior e superior variando de 0 a 1, o uso de uma função logística tornou-se mais apropriada.

VIGNOLA e McDANIELS (1986) em vez de utilizar apenas uma equação, obteve duas. Uma para  $K_t < 0,175$ , modelo linear  $K_b = 0,016 K_t$  e outro polinomial com dependência cúbica, com informações de seis localidades. A combinação dessas duas equações apresentou  $R^2 = 0,953$ .

As funções logísticas, até então, não eram utilizadas na área de modelagem da radiação solar, sendo muito utilizada na área de economia. Porém, ao contrário da função polinomial, ela permite, em primeiro lugar, delimitar a curva e em segundo lugar, desenvolver apenas uma equação, em vez de duas, pois consegue explicar  $K_b$  para valores de  $K_t < 0,80$ .

A validação do modelo para a partição instantânea e a correlação entre os valores de  $K_b^I$  estimados e os valores de  $K_b^I$  observados utilizou os dados dos meses: março/98, junho/98, setembro/98 e dezembro/98, escolhidos por representarem o início das quatro estações do ano: outono, inverno, primavera e verão.

O modelo por ser uma curva média, tende a subestimar os dados observados para alguns períodos e superestimar para outros.

Para os meses acima mencionados, o modelo estimou bem os valores observados de  $K_b$  para valores de  $K_t < 0,70$ . Já para o mês de junho/98, o modelo subestimou os valores observados de  $K_b$  para valores de  $K_t > 0,65$ , com  $R^2=0,974$ , para o intervalo total de  $K_t$ . Durante o mês de junho, a turbidez da atmosfera é menor. Segundo RERHRHAYE et al. (1995), estudos prévios

mostraram que a turbidez da atmosfera é alta no verão, resultando em significativa atenuação da radiação direta.

## CONCLUSÕES

O modelo, de um modo geral, apresentou um bom ajuste de  $K_b$  para valores de  $K_t < 0,70$ , com  $R^2$  de 0,98, 0,986 e 0,972 para os meses de março/98, setembro/98 e dezembro/98, respectivamente. O RMSE e MBE para esses três meses foram: 0,070 e 0,035 para março; 0,042 e 0,001 para setembro e 0,087 e 0,046 para dezembro, significando uma superestimativa do modelo aos dados observado. Porém, a correlação dos dados estimados em função do observado, permite observar que o modelo estima bem  $K_b$  para as condições de céu nublado e parcialmente nublado, não fornecendo um bom ajuste para a condição de céu claro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENSON, R. B., PARIS, M. V., SHERRY, J. E., JUSTUS, C. G. Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation from sunshine duration measurements. **Sol. Energy**, v.32, p.523-35, 1984.
- CHAVES, M. A. **Sistema de informação e modelagem de radiação solar**. Botucatu, 1999. 237p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Fac. de Ciências Agron., UNESP, SP.
- JACOVIDES, C. P., STEVEN, M. D., ASIMAKOPOULOS, D. N. Spectral solar irradiance and some optical properties for various polluted atmosphere. **Sol. Energy**, v.69, p.215-27, 2000.
- JETER, S. M., BALARAS, C. A. Development of improved solar radiation models for predicting beam transmittance. **Sol. Energy**, v.44, p.149-56, 1990.
- LAW, J. C.; LI, D. H. W. Correlation between global solar radiation and its direct and its direct and diffuse components. **Building and Environ.**, v.31, p.527-35, 1996.
- LOUCHE, A., NOTTON, G., POGGI, P., SIMONNOT, G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. **Sol. Energy**, v.46, p.261-66, 1991.
- RERHRHAYE, A., ZENAF, M., FLECHON, J. Estimation of the beam from seasonal correlations. **Renew. Energy**, v.6, p.779-785, 1995.
- RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. Botucatu, 1998. 89p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
- STONE, R. J. Improves Statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimations models. **Sol. Energy**, v.51, p.289-91, 1993.
- SUEHRICHE, H., McCORMICK, P. G. The frequency distribution of instantaneous insolation values. **Sol. Energy**, v.40, p.413-22, 1988.
- VIGNOLA, F, McDANIELS, D. K. Effects of El Chichon on global correlations. In: **Proceedings INTER-SOL "85"**, Montreal, Canada, June, 1985.