

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE

Reinaldo P. **RICIERI**¹, Reginaldo F. **SANTOS**², Suedêmio L. **SILVA**³, João F. **ESCOBEDO**⁴

RESUMO

O presente trabalho mostra as relações da razão ($K_d = R_d/R_G$) das irradiações difusa e global na superfície terrestre com a razão ($K_t = R_G/R_o$) das irradiações global (R_G) e incidente no topo da atmosfera (R_o). Os dados experimentais foram obtidos na ESTAÇÃO DE RADIOMETRIA SOLAR DA UNESP de Botucatu/SP. As componentes da radiação solar foram monitoradas por instrumentos da EPPLEY: um piranômetro (PSP) e um pireliômetro (NIP) acoplado num rastreador solar ST-3. Na aquisição dos dados, utilizou-se um "micrologger" da CAMPBELL SCIENTIFIC-INC modelo 21X, programado na frequência de 1Hz e armazenando médias de 5 minutos. A distribuição dos valores diários ($K_d \times K_t$), relacionada através de regressão polinomial e transcendental, forneceu equações de estimativa com elevados coeficientes de determinação. Dentre as correlações do modelo polinomial, os ajustes segundo os parâmetros RMSE e MBE, foram melhores na seqüência: 4°, 3°, 2° e 1° grau, respectivamente.

Palavras-chave: radiação solar difusa; índice de claridade; estimativa da radiação difusa.

INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento da radiação solar difusa é de grande importância em diversas atividades tais como: agricultura; engenharia; zoologia e outras. A dificuldade existente atualmente no monitoramento desta componente, encontra-se no custo elevado dos instrumentos envolvidos. Devido às dificuldades instrumentais, outra linha importante de estudos com radiação difusa é a dos modelos de estimativas. Neste, a radiação difusa é correlacionada com outro tipo de radiação, ou com um parâmetro meteorológico, por exemplo, a radiação global e a insolação relativa que são mais facilmente medidas. O trabalho pioneiro, com modelos de estimativa entre irradiações global e difusa para um determinado local, foi elaborado por Liu & Jordan (1960), que relacionaram a razão das irradiações, difusa na superfície terrestre (R_d) e do topo da atmosfera (R_o)

¹ Prof. Adjunto do Depto. DME e do Curso de Mestrado Engenharia Agrícola\UNIOESTE\Cascavel\PR.\ Brasil, Rua Universitária, 2069, cep 85814-110, ricieri@unioeste.br.

² Prof. Assistente do Depto de Engenharia\UNIOESTE\Cascavel\PR.

³ Prof. Assistente do Depto de Engenharia Agrícola\UNIOESTE\Cascavel\PR.

⁴ Prof. Adjunto do Departamento de Ciências Ambientais – FCA\UNESP – Botucatu\SP.

ou $K_d' = R_d/R_o$, com a razão das irradiações, global na superfície terrestre (R_G) e topo da atmosfera (R_o), também denominado de índice de claridade ($K_t = R_G/R_o$). Outra expressão utilizada é a razão entre as irradiações difusa e global na superfície terrestre ($K_d = R_d/R_G$), pela razão K_t . As duas curvas apresentadas por Liu e Jordan foram, posteriormente, equacionadas por outros pesquisadores.

A partir de 1960, diversos autores confirmaram a validade de modelo proposto para uma localidade porém, constataram que a correlação encontrada não poderia ser aplicada para regiões de grandes dimensões em toda sua extensão, não só devido a variabilidade climática da atmosfera, como também devido a latitude, como mostra o trabalho de Soler (1990).

Em função desta característica, dezenas de modelos foram propostos e mesmo não sendo muito precisos, são utilizados. Exemplos deste tipo de modelo são os trabalhos publicados por : Collares-Pereira & Rabl (1979) - Estados Unidos e Iqbal (1979) – Canada, entre muitos outros.

Outra fonte de variação nos estudos com modelagem da irradiação difusa é a partição das irradiações. Normalmente, as irradiações global, difusa e no topo da atmosfera são representadas pela partição horária, diária e média mensal, cuja escolha tende aos objetivos e à área de aplicação. Bruno (1978) e Srivastava et al. (1995), entre outros, optaram pela partição horária. Liu & Jordan (1960), Hontoria et al. (1997), utilizaram partição diária. Com partição de média mensal, que exige uma série de dados com vários anos, encontram-se trabalhos na literatura em menor quantidade.

As correlações propostas na grande maioria dos trabalhos citados apresentaram grande variabilidade em função da partição utilizada e local estudado. Alguns preferem a dependência linear, outros de 3º ou 4º grau, cuja escolha depende do coeficiente de determinação ou parâmetros estatísticos de RMSE e MBE. Outros pesquisadores, ao invés de representar K_d como uma única correlação, fazem opção por um conjunto de equações, em função de intervalos específicos de K_t .

No Brasil, o estudo com modelagem da radiação difusa é recente, pois poucos grupos tem o privilégio de estarem medindo de rotina esta componente. Dentre os locais, podem ser citados os grupos de radiação solar de Viçosa, IAG-USP/SP., Santa Catarina e UNESP de Botucatu. Os resultados iniciais em Botucatu foram divulgados por Ricieri et al. (1996).

Face a esta realidade propõe-se neste trabalho mostrar modelos de regressão polinomial e transcendental, em função do índice de claridade, para estimar a irradiação difusa em Botucatu\SP.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação de Radiometria Solar da Unesp de Botucatu (latitude $22^{\circ}54'$ Sul, longitude $48^{\circ}27'$ Oeste, altitude 786m), junto ao departamento de Ciências Ambientais na FCA, no período de 1 de junho de 1996 à 31 de dezembro de 1997.

A densidade de fluxo global (I_G) e direto na incidência normal (I_{DN}), foram obtidos através de instrumentos da EPPLEY: um piranômetro PSP posicionado num plano horizontal e um pireliômetro NIP acoplado a um rastreador solar modelo ST-3. A densidade de fluxo da radiação difusa (I_d) foi obtida pela diferença entre as densidades de fluxo global (I_G) e direta de incidência normal (I_{DN}) projetada na horizontal, através da equação: $I_d = I_G - I_{DN} \cos z$.

Foi utilizado uma aquisição de dados "micrologger" da CAMPBELL SCIENTIFIC-INC modelo 21X, programado para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média aritmética de cinco minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura (1) mostra a distribuição diária de K_d em função de K_t . Independentemente da partição das irradiações global e difusa, a distribuição característica obtida é similar às apresentadas por outros pesquisadores. Nos limites, quando K_t tende a zero, K_d tende a um, e quando K_d tende a zero, K_t tende a um. No intervalo intermediário, K_t pode assumir tendência linear, polinomial, de 2ª, 3ª ou 4ª ordem, ou mesmo uma exponencial.

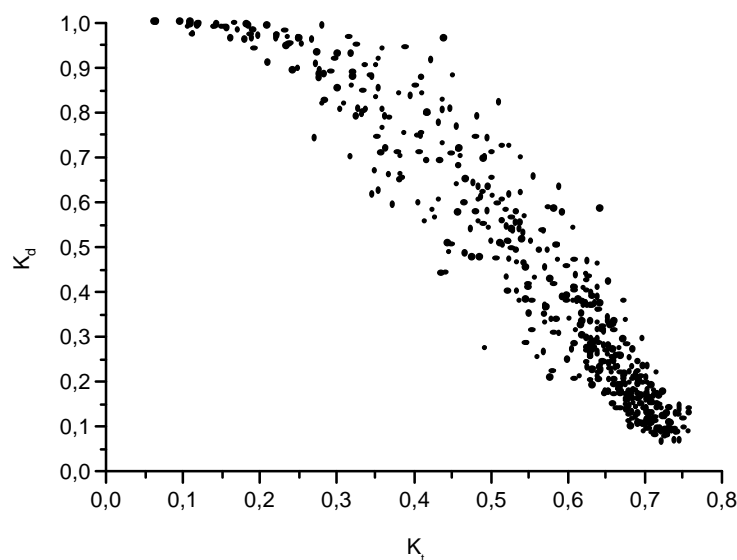


Figura 1. Distribuição da razão K_d em função de K_t .

Submetendo a distribuição dos pontos experimentais ($K_d \times K_t$) a programas estatísticos de regressões, obteve-se os seguintes modelos empíricos para estimar a radiação difusa local.

- Correlação linear. A figura (2) mostra o ajuste da correlação linear à distribuição dos dados para Botucatu.

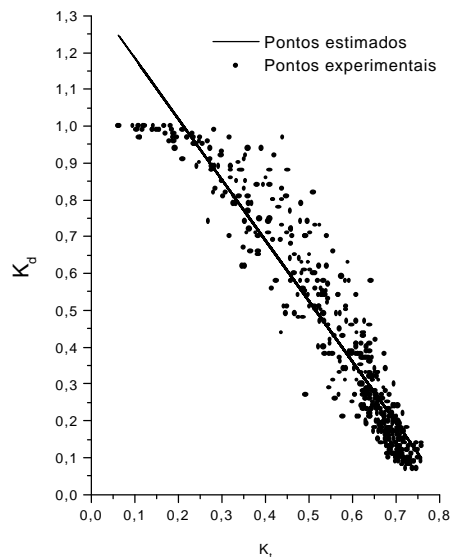


Figura 2. Curvas de regressão linear ($K_d \times K_t$).

A equação obtida com o respectivo coeficiente de determinação foi: $K_d = 1,35 - 1,65K_t$, com $R^2 = 0,89\%$. O coeficiente de determinação próximo de 90% indica que K_d pode ser estimado a partir de K_t com razoável nível de precisão, no intervalo $0,25 < K_t < 0,65$.

Para a correlação linear obtida, a equação somente terá sentido para valores de K_t superiores a 0,2 pois, na superfície terrestre, a irradiação difusa não pode ser maior que a irradiação global.

b) Correlação parabólica. A figura (3) mostra a curva ajustada por regressão polinomial de 2º grau à distribuição $K_d = f(K_t)$.

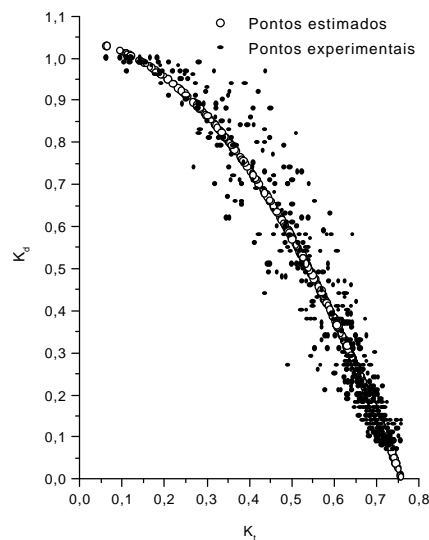


Figura 3. Curva de regressão parabólica ($K_d \times K_t$).

A equação obtida com o coeficiente de determinação foi: $K_d = 1,043 - 0,086 K_t - 1,678 K_t^2$, com $R^2 = 0,9259$. O coeficiente de determinação 92,59% indica melhor ajuste ao obtido no modelo linear.

c) Correlação do 3º grau. A figura (4) mostra a curva do 3º grau ajustada aos dados experimentais.

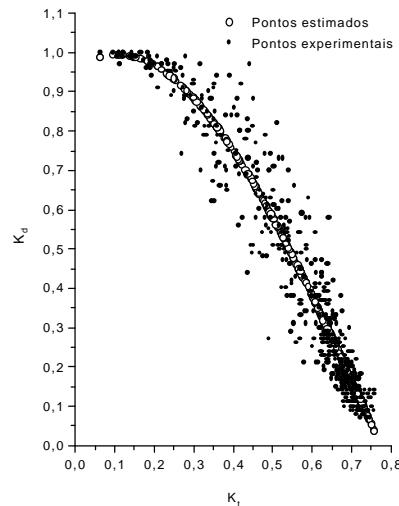


Figura 4. Curva de regressão polinomial de 3º grau (K_d x K_t).

A equação obtida foi: $K_d = 0,947 + 0,813 K_t - 3,963 K_t^2 + 1,720 K_t^3$ com $R^2 = 0,9267$. O coeficiente de determinação 92,67%, mostra que estatisticamente não ocorreu uma melhoria significativa entre os ajustes das equações de 2º e 3º grau, que praticamente foram iguais.

d) Equação polinomial do 4º grau. A figura (5) mostra a curva polinomial de 4º grau ajustada à distribuição dos dados.

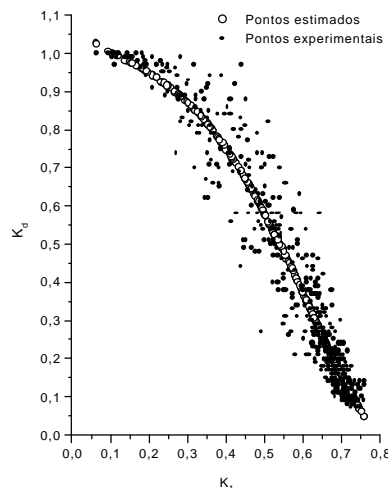


Figura 5. Curvas de regressão polinomial de 4º grau (K_d x K_t).

A equação obtida foi: $K_d = 1,083 - 1,067 K_t + 4,078 K_t^2 - 11,736 K_t^3 + 7,722 K_t^4$, com $R^2 = 0,9273$. Esta equação não melhora o coeficiente de determinação em relação ao de 3º grau e 2º grau.

e) Equação transcendental. Na tentativa de obter um melhor modelo, considerando a distribuição característica entre K_d e K_t , os dados experimentais foram submetidos ao modelo transcendental (figura 6) do tipo exponencial, similar ao modelo de Bartoli et al. (1982).

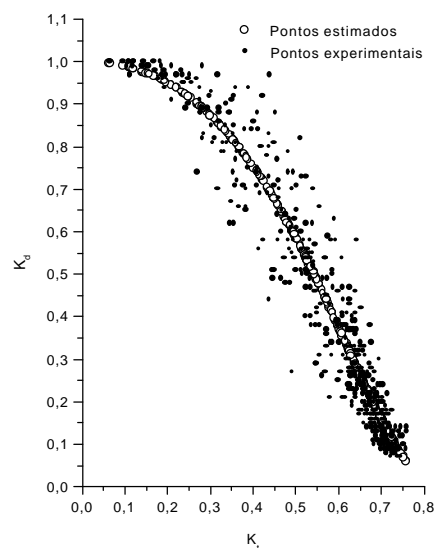


Figura 6. Curvas de regressão transcendentais (K_d x K_t).

A equação transcendental: $K_d = -0,0228 + 1,02288 \exp[(-1,0623 K_t^{2,0381}) / (1 - K_t)]$, com $RMSE = 0,07861$, mostra ter precisão semelhante as equações do 3º e 4º grau.

Comparando os modelos citados através da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) que está associado a dispersão de dados e do erro médio (MBE), que está associado a tendência de dispersão dos pontos em relação à equação média, conforme apresentados na tabela 1 e definidos através das relações:

$$RMSE = \{[\sum (K_{calc.} - K_{real})^2] / n\}^{1/2} \text{ e } MBE = [\sum (K_{calc.} - K_{real})] / n.$$

Tabela 1. Valores dos parâmetros estatísticos RMSE e MBE dos modelos

Correlação	Linear	Parabólica	3º grau	4º grau	Exponencial
RMSE	0,09282	0,0798	0,07907	0,0789	0,07861
MBE	0,00143	-0,00674	0,00231	-0,0052	0,0055

Comparando os valores do coeficiente RMSE, as equações polinomiais acima do 2º grau juntamente com a exponencial apresentam os melhores ajustes em torno de 7,9% contra 9,3% na do 1º grau. O parâmetro estatístico MBE positivo (1º, 3º e exponencial) indica que a correlação tende a superestimar as medidas estimadas dos valores de K_d , e as demais tendem a subestimar.

Comparando os valores determinados de RMSE neste trabalho com valores citados na literatura, independentemente da partição e do grau da regressão polinomial, como mostram os trabalhos: Hontoria (1997): $RMSE = 9,14\%$; Collares-Pereira & Rabl (1979): $RMSE = 14,79\%$; Bartoli et al. (1982): $RMSE = 10,0\%$, entre muitos outros, a partir da equação de 2º grau podem ser considerados bons, com uma imprecisão na faixa de 8,0%.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, podemos concluir que: a curva de distribuição experimental da razão difusa pela global (K_d) em função do índice de claridade (K_t), com partição diária, apresentou característica similar às apresentadas na literatura, independentemente da partição; nos modelos de regressão obtidos com a distribuição dos dados ($K_d \times K_t$) locais, dentre as correlações do modelo polinomial, segundo os parâmetros estatísticos RMSE e MBE, os melhores ajustes foram obtidos com os modelos transcendental e polinomial do 4º, 3º e 2º grau, respectivamente, com seus valores muito próximos.

BIBLIOGRAFIA

- BARTOLI, B., CLUOMO, V., AMATO, U., BARONE, G., MATTARELLI, P. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, v.28, p.307-311, 1982.
- BRUNO, R. A correction procedure for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v.20, p.97-100, 1978.
- COLLARES-PEREIRA, M., RABL, A. The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, v.22, p.155-164, 1979.
- HONTORIA, L., PÉREZ, P.J., ALMONACID, G. *Estudio comparativo de diferentes correlaciones entre el índice de claridad y la fracción de difusa para diferentes localizaciones*. CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA, Porto, 1997. p.103-110.
- IQBAL, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. *Solar Energy*, v.1, p.81-86, 1979.
- LIU, B.Y.H., JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direta, difuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.4, p.1-19, 1960.
- RICIERI, R.P., ESCOBEDO, J.F., MARTINS, D. Relações da radiações solar difusa em Botucatu. IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos do Jordão, 1996. p.547-550.
- SOLER, A. Dependence on latitude of the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global to - extraterrestrial radiation for monthly average daily values. *Solar Energy*, v.44, n.5, p.297-302, 1990.
- SRIVASTAVA, S.K., GAUR, A., SINGH, O.P., TIWARI, R.N. Comparison of methods for estimating daily and hourly diffuse solar radiation. *Applied Energy*, v.51, p.119-123, 1995.