

FRAÇÕES DAS RADIAÇÕES DIRETA (K_{dh}) E DIFUSA (K_d) NA HORIZONTAL EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE (K_T)

João F. Escobedo¹, Eduardo N. Gomes², Amauri P. de Oliveira³, Jacyra Soares⁴

RESUMO: No presente trabalho é apresentado as equações de estimativa e as validações para as radiações direta na horizontal (K_{dh}) e difusa (K_d) em função do índice de claridade (K_T) por meio dos modelos de Liu-Jordan. Na modelagem, realizada através de regressão polinomial, utilizou-se dados do período de 8 anos (1996 a 2003) e a validação, realizada através dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e teste t, com dois anos de dados (2004 a 2005). As equações de estimativa horária, diária e mensal com seus respectivos índices de correlação R e os indicadores estatísticos MBE e RMSE das validações são apresentados e discutidos com a literatura.

ABSTRACT: In the present work it's presented equations to estimate, direct (beam) and diffuse radiations as function clearness index (K_t) by means of Liu-Jordan's models. It's also presented the validation of the models. It's used 8 years of the database (1996 to 2003) in the modelling, by polynomial regression. The validation was made using the statistical indicators MBE, RMSE and t-test, using 2 years (2004 to 2005) of the database. The hourly, daily and monthly estimative equations with it's respective correlation index (R), and the validation statistical indicators MBE and RMSE are presented and compared with the literature.

Palavras-chave: Radiações solares, global, direta, difusa equações de estimativa

INTRODUÇÃO

O Brasil, atualmente encontra-se em pleno desenvolvimento tecnológico na área das fontes renováveis de energia tais como: conversão de energia solar térmica e fotovoltaica, biomassa, entre outras. Um programa com energia solar deve sempre começar com estudos sobre a radiação solar

¹ Físico, Dr. Departamento de Ciências Ambientais – Recursos Naturais, Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, e-mail: escobedo@fca.unesp.br

² Eng^o Agr^o, Dr. Departamento de Ciências Ambientais – Recursos Naturais, Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Caixa Postal 237, 18603-970, Botucatu, SP, e-mail: engomes@fca.unesp.br

³ Meteorologista, PHD., Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, USP, Rua do Matão, 1226, Butantã, 05508090 - São Paulo, SP, apdolive@usp.br

⁴ Meteorologista, PHD., Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, USP, Rua do Matão, 1226, Butantã, 05508090 - São Paulo, SP, jacyra@usp.br

para a região de interesse, e para locais em que a radiação solar não é monitorada, a solução é utilizar o processo de estimativa através de modelos ou correlações empíricas.

A Estação de Radiometria Solar, da UNESP de Botucatu monitora a radiação solar na superfície horizontal: global, difusa (métodos do anel de sombreamento, disco e diferença), direta na incidência, desde 1995, com objetivo de conhecer as series temporais das três radiações e as equações de estimativas. As series e as equações de estimativas são de grande importância, porque poderão ser utilizados em projetos solares de simulação em outros locais de mesmas características climáticas, medindo apenas a radiação global. No presente trabalho, objetivou-se elaborar as equações de estimativa para: frações da radiação difusa K_d e K_{dh} direta em função do índice de claridade K_T nas partições horária, diária e mensal.

METODOLOGIA

A base de dados das radiações solares, direta na incidência e global, utilizada compreende os anos de 1996 a 2005. A irradiância global (I_G) é monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a direta na incidência (I_b) por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. A irradiância difusa (I_d) deste trabalho é gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância I_G e a irradiância direta na horizontal I_{dh} , medidas na mesma frequência, por meio da equação: $I_d = I_G - I_b \cos Z$, onde z é o ângulo zenital.

Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas). As radiações dos anos de 1996 a 2003 foram utilizadas para geração das equações de estimativas, e os anos de 2004 e 2005 para a validação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 mostra as correlações horárias: (a) fração da direta K_{dh}^h e índice de claridade K_T^h ; (b) fração da difusa K_d^h e índice de claridade K_T^h . As correlações das frações K_{dh}^h e K_d^h em função de K_T^h , mostram que a dependência não é linear, e que, para cada intervalo de variação de K_T^h , há um largo intervalo de variação de K_{dh}^h e K_d^h . A causa principal da variação de K_{dh}^h e K_d^h em função de um mesmo K_T^h é devido a variação da massa ótica, onde as irradiâncias I_{dh} e I_d diminuem no sentido que a massa ótica aumenta. As variações das frações K_{dh}^h e K_d^h , é minimizado em cada intervalo centesimal K_T^h , quando transformadas em frações médias K_{dh}^h e K_d^h , o que permite ajuste de uma

função simples. Esta técnica foi utilizada por diversos pesquisadores para as frações difusa K_d^h e direta K_{dh}^h , relacionadas com intervalos centesimais de K_T^h (Bartoli et al., 1982 entre outros).

As evoluções das frações médias K_{dh}^h e K_d^h em função de K_T^h , são similares as correlações encontradas por De Miguel et al (2001); Oliveira(2002) para a fração difusa e Louche et al., (1991), para a fração direta, entre muito outros. Na Tabela 1 são apresentadas as equações de estimativas para as frações médias K_{dh}^h e K_d^h em função de K_T^h com seus respectivos coeficientes de determinação.

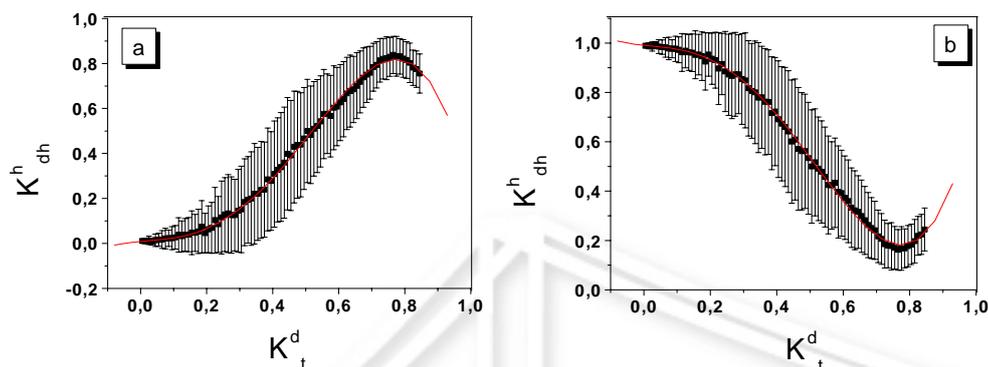


Figura 1. Correlações horárias: (a) fração da direta K_{dh}^h ; (b) fração da difusa K_d^h em função de K_T^h .

Tabela 1. Equações de Estimativa das frações médias K_{dh}^h e K_d^h em função de K_T^h ,

$K_{dh}^h = 0,00915 + 0,13136Kt - 0,46097Kt^2 + 7,50806kt^3 - 6,95862kt^4$	$R^2 = 0,99936$
$K_d^h = 0,99085 - 0,13136kt + 0,46097kt^2 - 7,50806kt^3 + 6,95862kt^4$	$R^2 = 0,99936$

As equações polinomiais de 4ª ordem apresentam coeficientes de determinação da ordem de 0,9994 e mostram que as frações médias K_{dh}^h e K_d^h estão bem correlacionados com o índice de claridade K_T^h . Na tabela 2 são apresentados os indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott.

Tabela 2. Indicativos estatísticos da validação das equações de estimativas horárias.

frações	MBE%	RMSE%	“d” de Willmott
K_{dh}^h	7,30207	33,24703	0,96165
K_d^h	-4,58461	20,87418	0,96165

O indicativo estatístico MBE, inferior a 7,3% mostra que erro médio das estimativas para frações K_{dh}^h e K_d^h não é elevado, onde o melhor desempenho foi para a estimativa da fração K_d^h . O indicativo RMSE é comparável aos mostrados na literatura, melhor pela ordem para frações K_d^h

K_{dh}^h . Os coeficientes “d” de Willmott superior a 0,9616 são elevados e mostram bom nível de ajustamento da estimativa em relação à medida, para as duas frações K_{dh}^h e K_d^h . A figura 2 mostra as correlações diárias: (a) fração da direta K_{dh}^d e fração da difusa K_d^d em função de K_T^d .

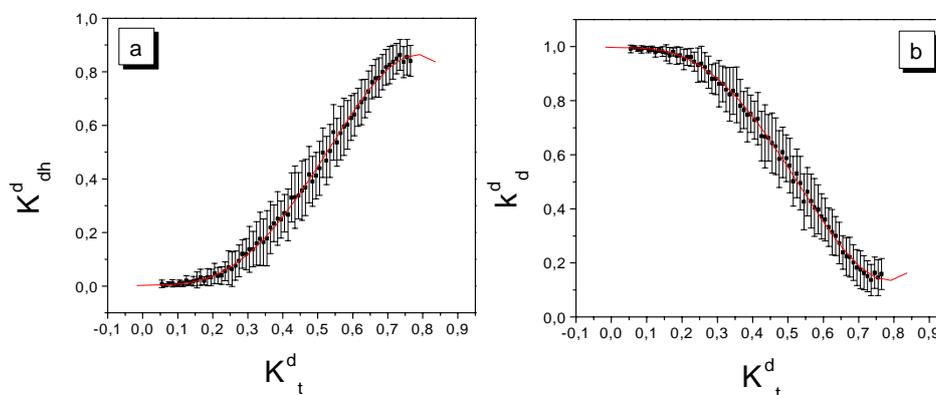


Figura 2. Correlações diárias: (a) fração da direta K_{dh}^d ; (b) fração da difusa K_d^d em função K_T^d .

Os níveis de espalhamento das frações K_{dh}^d e K_d^d em função de K_T^d , decresceram em relação aos níveis das relações horárias da figura 1. Partições de tempo menores respondem com mais sensibilidade e rapidez as mudanças da atmosfera, permitindo melhor detalhamento da distribuição pontual das radiações e como consequência geram uma variabilidade maior. Na Tabela 3 são apresentadas as equações de estimativas para as frações médias K_{dh}^d e K_d^d em função de K_T^d com seus respectivos coeficientes de determinação e mostram que as frações K_{dh}^d e K_d^d estão bem correlacionados com o índice de claridade K_T^d . Os resultados ajustes são melhores ou similares aos citadas na literatura para a fração K_d^d (Oliveira et. al., 2002; Jacovides et al., 1996). Na tabela 4 são apresentados os resultados da validação.

Tabela 3. Equações de estimativas diárias das frações K_{dh}^d e K_d^d em função de K_T^d .

$K_d^d = 0,99672 - 0,04941Kt + 0,97609Kt^2 - 9,42619Kt^3 + 8,25615Kt^4$	$R^2 = 0,99859$
$K_{dh}^d = 0,00328 + 0,04941Kt - 0,97609Kt^2 + 9,42619Kt^3 - 8,25615Kt^4$	$R^2 = 0,99859$

Tabela 4. Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativas diária

Frações	MBE. %	RMSE. %	d
$K_{dh}^d \times K_t^d$	-0,19129	16,71872	0,97581
$K_d^d \times K_t^d$	-0,89938	18,16101	0,97576

O indicativo estatístico MBE, mostram que as equações K_{dh}^d e K_d^d subestimam as medidas; o indicativo RMSE abaixo dos 20,0%, mostram que a dispersão é inferior aos RMSE em torno de

25,0% citados na literatura por De Miguel (2001), Oliveira et. al., (2002). O índice de ajustamento “d” de Wilmott, superior a 0,9758 expressa a boa concordância entre a estimativa e a medida, igualmente para as duas equações K_{dh}^d e K_d^d .

A figura 3 mostra as correlações mensais diárias: (a) fração da direta K_{dh}^m e índice de claridade K_T^m e (b) fração da difusa K_d^m e índice de claridade K_T^m . As correlações das frações mensais diárias K_{dh}^m e K_d^m são similares as encontradas na literatura. Na tabela 5 é apresentado as equações de estimativa para as frações médias K_{dh}^m e K_d^m em função de K_T^m com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 . Para a fração a K_d^m , os coeficientes linear e angular divergem, sendo consideravelmente mais elevados que outros pais como a Ilha de Cyprus, como mostram os trabalhos de Jacovides et al (1996). O resultado se aproxima das equações de Lalas, et al., (1987) nas Ilhas Gregas e Oliveira, et al.,(2002) em São Paulo.

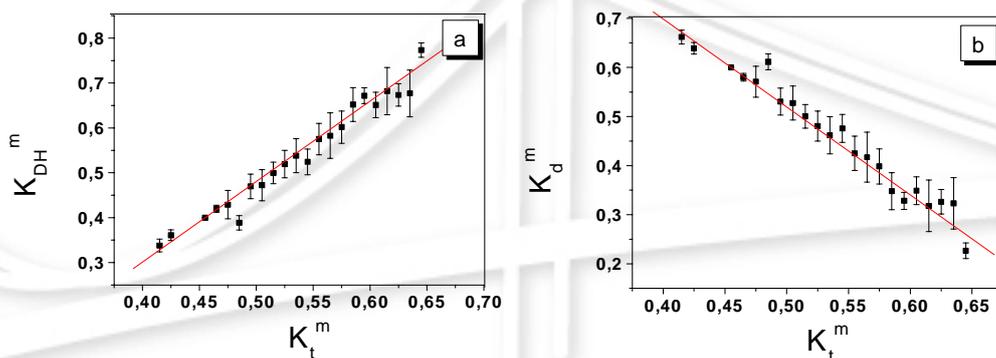


Figura 3. Correlações mensais : (a) fração da direta ; (b) fração da difusa K_d^m em função de K_T^m .

Tabela 5. Equações de Estimativa das frações mensais K_{dh}^m e K_d^m em função de K_T^m

$K_d^m = 1,41558 - 1,79223K_t^m$	$R^2 = 0,97668$
$K_{dh}^m = -0,41558 + 1,79223K_T^m$	$R^2 = 0,97668$

Na tabela 6 são apresentados os indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott. O indicativo estatístico MBE, mostram que as equações K_{dh}^m superestima e K_{dh}^m e K_d^m subestima a medida com erro na estimativa inferior a 12,5%, com melhor resultado para a equação K_d^m com erro de 5,0%.

O indicativo RMSE abaixo dos 17,0%, mostram que a dispersão entre a medida e a estimativa é inferior de outras equações de estimativa. O índice de ajustamento “d” de Wilmott, superior a 0,89253 expressa a boa concordância entre a estimativa e a medida, igualmente para as duas equações K_{dh}^m e K_d^m .

Tabela 6. Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativas mensais.

Equações	MBE.%	RMSE.%	“d” de Willmott
$K_{dh}^m \times K_T^m$	12,50865	16,25325	0,89253
$K_d^m \times K_T^m$	-5,11187	6,64217	0,89253

CONCLUSÕES

A base de dados das radiações global, direta na horizontal e difusa de 10anos medida em Botucatu/SP/Brasil, geraram equações de estimativas diária e mensal para as frações K_{dh} e K_d em função de K_T , todas com elevados coeficientes de determinação. No geral, os resultados da validação por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott, mostraram bom desempenho quanto a precisão e ajustamento entre a medida e a estimativa para as equações, K_{dh} e K_d nas três partições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTOLI, B., CUOMO, V., AMATO, U. Diffuse and bean components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, v.28, p.307-11, 1982.
- DE MIGUEL, A., BILBAO, J., KAMBEZIDIS, H., NEGRO, E. Diffuse solar irradiation model evaluation in north Mediterranean belt area. *Solar Energy*, v.70, n.2, p.143-53, 2001.
- JACOVIDES, C. P., HADJIOANNOU, L., STEFANOPOULOS, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. *Solar Energy*, v.56, n.6, p.565-72, 1996.
- LALAS, D. P., PETRAKIS, M., PAPADOPOULOS, C. Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece. *Solar Energy*, v.39, n.5, p.455-8, 1987.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, p.1-19, 1960.
- OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., SOARES, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *App. Energy*, v.71, p.59-73, 2002.
- 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.

Agradecimento: À FAPESP, e ao CNPq pelo apoio financeiro.