

EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DAS FRAÇÕES SOLAR DIRETA (K_{Dh}) E DIFUSA (K_d) EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE (K_t) E RAZÃO DE INSOLAÇÃO (n/N).

J. F. Escobedo¹, E. T. Teramoto²; A. P. Oliveira³, J. Soares⁴, G. Codato⁵

^{1,2}Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP – Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, CEP 18.610-307, Botucatu, São Paulo, Brasil – Tel. (5514) 3880-7100, e-mail: escobedo@fca.unesp.br

^{3,4,5}Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP – São Paulo/SP/Brasil

Recibido: 03/08/12; Aceptado: 03/10/12

RESUMO: Neste trabalho é apresentado um conjunto de equações de estimativa (horária, diária e mensal) das frações direta na horizontal (K_{Dh}) e difusa (K_d) da radiação solar global na superfície em função do índice de claridade (K_t) usando o modelo de Liu- Jordan. São apresentados também equações de estimativa (diária e mensal) para o índice de claridade (K_t) e das frações direta na horizontal (K_{Dh}) e difusa (K_d) da radiação solar global na superfície em função da razão de insolação (n/N) usando o modelo de Angstrom- Prescott. Na modelagem utilizou-se uma base de dados de radiações de oito anos (1996 a 2003) e a validação de dois anos (2004 a 2005) medida em Botucatu/SP/Brasil. As equações de estimativa polinomiais de quarta ordem obtidas para o modelo de Liu- Jordan e as equações de estimativas lineares para o modelo de Angstrom- Prescott, apresentam elevados coeficientes de determinação R^2 . Os indicadores estatísticos MBE, RMSE e “d” de Willmott obtidos na validação mostram que o conjunto de equações derivadas neste trabalho pode ser utilizado para estimar K_t , K_{Dh} e K_d com precisão e exatidão para a maior parte das aplicações nas áreas de energia e agricultura.

Palavras-chave: radiação solar global, difusa e direta, modelos de estimativa de Liu y Jordan e Angström.

INTRODUÇÃO

Um programa de aproveitamento da energia solar deve sempre ser iniciado com o estudo da série de radiação solar para a região de interesse. Para locais em que a radiação solar não é monitorada, a solução é a utilização de modelos de estimativas. As correlações mais importantes utilizadas com radiação solar são: a de Angstrom a qual relaciona a fração da radiação global que atinge a superfície terrestre K_t (razão entre radiação global e a do topo da atmosfera) com a razão de insolação n/N (número de horas de brilho e fotoperíodo) e utiliza a medida do número de horas de brilho solar para estimar a radiação global; a de Liu e Jordan relaciona a razão das radiações difusa e global ou a direta na horizontal e a global por meio dos índices radiométricos K_d e K_{Dh} em função de K_t e utiliza a medida da radiação global para estimar as radiações difusa ou a direta na horizontal. A normalização das radiações global G por H_0 ($K_t=G/H_0$); direta na horizontal D_h por G ($K_{Dh}=D_h/G$) e difusa d por G ($K_d=d/G$) elimina dependência astronômica (declinação solar) e geográfica (latitude) respectivamente, do local e dia. Assim sazonalidade das frações K_t , K_{Dh} e K_d é apenas resultante das variações das concentrações da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis na atmosfera.

A Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu monitora desde 1995 a radiação solar global e direta na incidência, com objetivo de desenvolver equações de estimativa com as frações K_t , K_{Dh} , K_d e n/N as quais são de grande importância nos projetos de conversão térmica, fotovoltaica e produção de biomassa solar da região local que é de extrativismo de cana de açúcar e eucalipto.

Neste trabalho é apresentada a obtenção e validação das equações de Angstrom para estimativa das radiações global, difusa e direta em função da razão de insolação n/N nas partições diária e mensal, e as equações de Liu e Jordan para estimativas das frações da radiação difusa K_d e direta K_{Dh} em função do índice de claridade K_t nas partições horária, diária e mensal.

METODOLOGIA

Clima

O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. A figura 1 mostra a série climática da precipitação, número de horas de brilho solar, temperatura e umidade do período de 1970 a 2000.

¹ Prof. Adjunto III do Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP.

² Doutorando em Agronomia do Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP.

³ Prof. Adjunto do Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP.

⁴ Prof. Doutor do Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP.

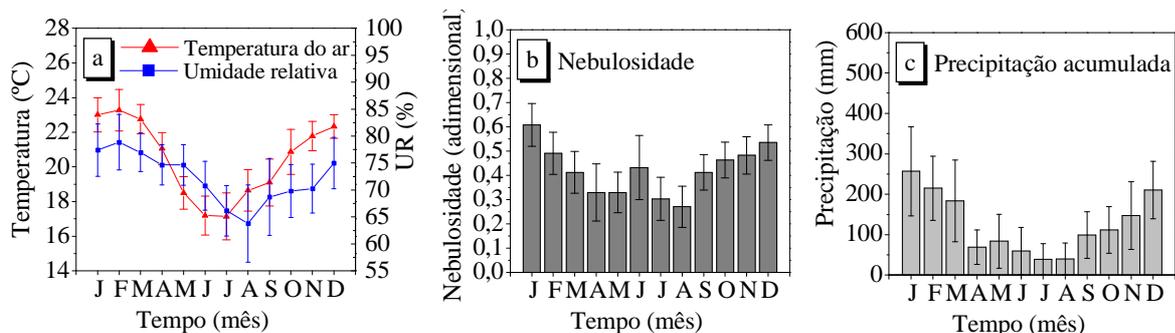


Figura 1: Séries Climáticas da Temperatura e Umidade Relativa (a), Nebulosidade (b), Precipitação (c) do período de 1970 a 2000.

Os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 161,56h e 115,28h respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. Os meses de fevereiro e julho são respectivamente, o mais quente e frio do ano, com temperaturas médias de 23,2°C e 17,1°C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

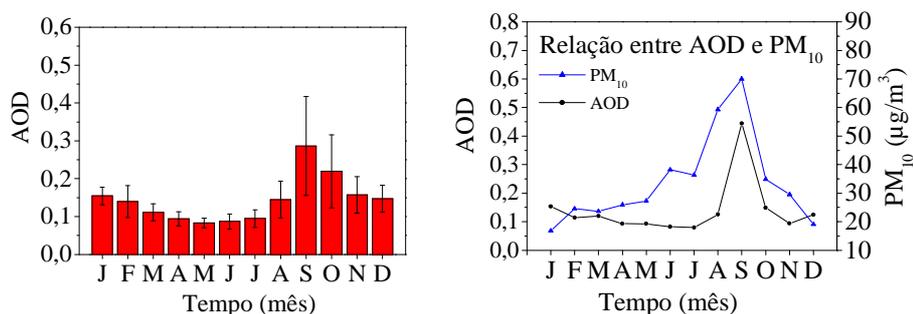


Figura 2: a) Evolução anual da profundidade ótica de aerossóis AOD média mensal, período de 2001 a 2004; b) Relação entre a AOD e a concentração de materiais particulados PM_{10} (expressa em $\mu g \cdot m^{-3}$) no ano de 2004.

A cidade de Botucatu está inserida em uma região rural com plantações de cana de açúcar e eucalipto. Nos meses de seca, de junho a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar. A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005 (fig. 2), mostra que no início das queimadas da cana de açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de $AOD=0,45$ em setembro, equivalente à concentração PM_{10} de $70,0 \mu g \cdot m^{-3}$ (Codato *et al.*, 2008).

Instrumentação

A Estação de Radiometria Solar mostrada na figura 1 está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°O e altitude 786m) monitora de rotina as radiações global e direta na incidência, desde 1996. A irradiância global (I_G) é monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a direta na incidência (I_D) por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley (fig 3). A irradiância difusa (I_d) é gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância I_G e a irradiância direta na horizontal I_{Dh} , medida na mesma frequência, por meio da equação: $I_d = I_G - I_{Dh} \cos z$, onde z é o ângulo zenital.



Figura 3: Vista parcial da Estação de Radiometria Solar de Botucatu.

Os erros das medidas da radiação global e direta estão associados à precisão dos aparelhos da Eppley: o piranômetro PSP que mede a radiação global possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o pireliômetro que mede a radiação direta de 1,5% a 2,0%. Assim de acordo com a teoria de propagação de erro, a radiação difusa que foi obtida por diferença por meio da equação: $I_d = I_G - I_b \cos z$ apresenta um erro estimado de 3,5% a 4,0%.

| INSTRUMENTAÇÃO | | |
|------------------------|---|---|
| Radiação | Direta | Global |
| Sensor - Marca | Pireliômetro - Eppley | Piranômetro - Eppley |
| Fator de Calibração | $7,59 \mu V/Wm^2$ | $7,45 \mu V/Wm^2$ |
| Range Espectral | 295-2800nm | 295-2800nm |
| Tempo de resposta | 1s | 1s |
| Linearidade | $\pm 0,5\%$ (0 a $1400 W/m^2$) | $\pm 0,5\%$ (de 0 a $2800 W/m^2$) |
| Cosseno | -- | $\pm 1\%$ ($0 < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ < Z < 80^\circ$) |
| Resposta à temperatura | $\pm 1\%$ de $-20^\circ C$ a $40^\circ C$ | $\pm 1\%$ de $-20^\circ C$ a $40^\circ C$ |

Tabela 1: Características operacionais dos detectores da radiação direta e global.

As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao cosseno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão apresentados na tabela 1.

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). Os dados passaram por um controle de qualidade onde foram eliminados e os valores espúrios e numa segunda etapa, os dados foram processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horárias, diárias e mensais.

O número de horas de brilho solar (n) foi medido por um heliógrafo, e a razão de insolação (r) calculada pela relação n/N , onde N é o fotoperíodo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Equações de Estimativa Horária e Validação

A figura 4 mostra as correlações horárias: (a) fração da radiação direta K_{Dh} e índice de claridade K_t ; (b) fração da difusa K_d e índice de claridade K_t . As correlações das frações K_{Dh} e K_d em função de K_t , são similares às correlações encontradas por De Miguel et al (2001); Erbs (1982), Reindl (1990), Hawlader (1984); Oliveira(2002) e Orgill y Hollands (1971), Louche et al., (1991) e Lam e Li (1996) em outros locais mostrados na literatura. Para cada intervalo de variação de K_t , há um largo intervalo de variação de K_{Dh} e K_d . A causa principal dessa variação é devido a variação da massa ótica, pois as irradiancias I_{Dh} e I_d diminuem à medida em que a massa ótica aumenta e cada intervalo de K_t .

As variações das frações K_{Dh} e K_d , são minimizadas em cada intervalo centesimal K_t quando transformadas em frações médias K_{Dh} e K_d , possibilitando o ajuste de uma função simples. Essa técnica foi utilizada por diversos pesquisadores para as frações difusa K_d e direta K_{Dh} , relacionadas aos intervalos centesimais de K_t (Bartoli et al., 1982). A soma das frações K_{Dh} e K_d é igual a 1, portanto as equações para K_{Dh} e K_d em função de K_t mostradas na tabela 2 são simétricas e complementares: a evolução da fração K_{Dh} é crescente, enquanto que a da fração K_d é decrescente, quando K_t aumenta em todo intervalo de variação entre de 0 a 1.

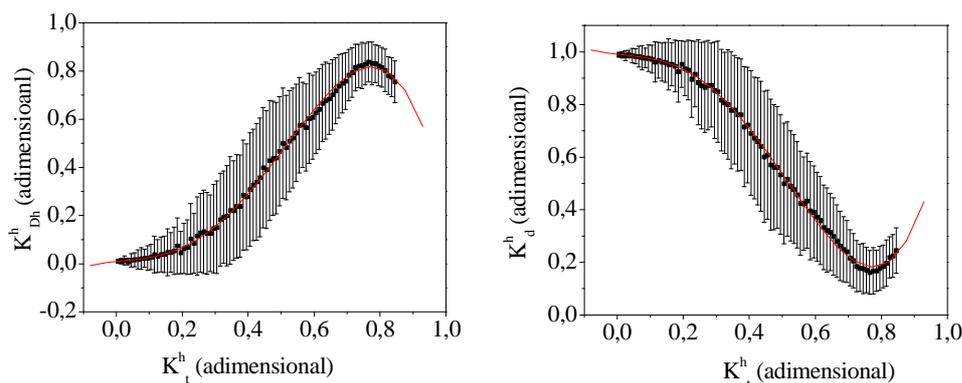


Figura 4: Correlações horárias: (a) fração da direta K_{Dh} e índice de claridade K_t ; (b) fração da difusa K_d e índice de claridade K_t .

A tabela 2 apresenta as equações de estimativa para as frações médias K_{Dh} e K_d em função de K_t , com os coeficientes de determinação R^2 . As equações polinomiais de 4º ordem apresentam coeficientes de determinação R^2 da ordem de 0,9994. O resultado próximo dos 100% mostra que as frações médias K_{Dh} e K_d estão bem correlacionadas ao índice de claridade K_t .

| | | |
|--|-----------------|-----|
| $K_{dh}^h = 0,00915 + 0,13136 Kt - 0,46097 Kt^2 + 7,50806 Kt^3 - 6,95862 Kt^4$ | $R^2 = 0,99936$ | (1) |
| $K_d^h = 0,99085 - 0,13136 Kt + 0,46097 Kt^2 - 7,50806 Kt^3 + 6,95862 Kt^4$ | $R^2 = 0,99936$ | (2) |

Tabela 2: Equações de Estimativa das frações médias K_{Dh} e K_d em função de Kt .

A tabela 3 apresenta os resultados da validação das equações (1) e (2) por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott. O indicativo estatístico MBE inferior a 7,3% mostra que o erro médio da estimativa para as frações K_{Dh} e K_d é pouco superior aos erros experimentais das medidas, e o sinal de MBE indica que a fração K_d estimada subestima, enquanto que a fração K_{Dh} superestima a medidas. A equação que estima a fração K_d apresentou o melhor desempenho.

| Frações | MBE% | RMSE% | “d” de Willmott |
|------------|-------|-------|-----------------|
| K_{dh}^h | 7,30 | 33,25 | 0,96165 |
| K_d^h | -4,58 | 20,87 | 0,96165 |

Tabela 3: Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativa horária.

O indicativo RMSE elevado mostra que o espalhamento entre a radiação medida e a estimada é alto, com melhores resultados para as frações, na seguinte ordem: K_d e K_{Dh} . Os coeficientes “d” de Willmott superiores a 0,9616 são elevados e mostram bom nível de ajustamento da radiação estimada em relação à medida para as duas frações K_{Dh} e K_d .

Equações de Estimativa Diária e Validação.

A Fig. 5 mostra as correlações diárias: (a) fração da direta K_{Dh} e índice de claridade Kt e (b) fração da difusa K_d e índice de claridade Kt . Nas duas correlações K_{Dh} e K_d em função de Kt , para cada intervalo de Kt , há um largo intervalo de variação de K_{Dh} e K_d . Similarmente, as correlações horárias, optamos por minimizar as variações das frações K_{Dh} e K_d por meio de frações médias K_{Dh} e K_d em cada intervalo centesimal de Kt .

As correlações das frações K_{Dh} e K_d em função de Kt são similares às correlações das frações horárias. porém, com coeficientes de determinação mais altos. Os níveis de espalhamento das frações K_{Dh} e K_d em função de Kt , na figura 2, decresceram em relação aos níveis das relações horárias da figura 1. Partições de tempo menores respondem com mais sensibilidade e rapidez às mudanças da atmosfera, permitindo melhor detalhamento da distribuição pontual das radiações e, conseqüentemente, produzindo uma variabilidade maior. Para partição de tempo maior, os efeitos da dinâmica da atmosfera são suavizados por meio da integração dos valores instantâneos em intervalos de tempo maior, diminuindo a variabilidade dos valores das frações K_{Dh} e K_d . No entanto, as informações pontuais sobre a distribuição das radiações são perdidas no momento da integração (Suehrcke y McCormick, 1989).

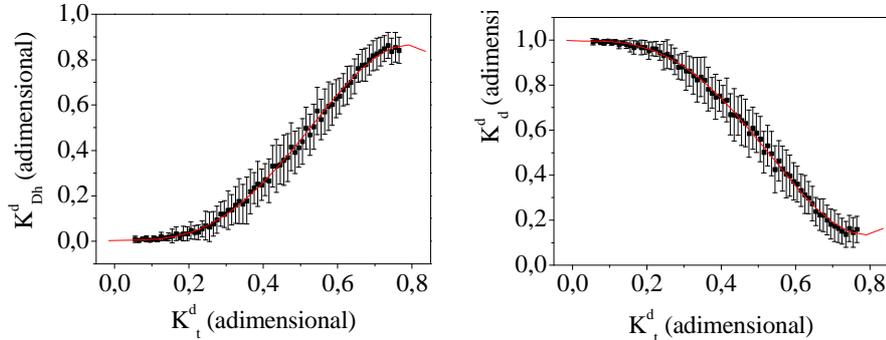


Figura 5: Correlações diárias: (a) fração da direta K_{Dh} e índice de claridade Kt ; (b) fração da difusa K_d e índice de claridade Kt .

A tabela 4 apresenta as equações de estimativa para as frações médias K_{Dh} e K_d em função de Kt com o respectivo coeficiente de determinação. Os coeficientes de determinação próximos dos 100,0% mostram que as frações K_{Dh} e K_d estão bem correlacionadas ao índice de claridade Kt . Os resultados dos ajustes são da mesma ordem de grandeza aos citados na literatura para a fração K_d (Erbs et al., 1982; Oliveira et al., 2002; Newland, 1989; Jacovides et al., 1996).

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

Tabela 4: Equações de estimativa diária das frações K_{Dh} e K_d em função de Kt .

A figura 6 mostra as correlações do índice de claridade Kt , fração direta K_{Dh} e fração difusa K_d em função da razão de insolação (n/N). As correlações entre frações e a razão de insolação (n/N) são lineares com elevados coeficientes de determinação, superior a 0,98 e mostram que as frações Kt , K_{Dh} e K_d estão bem correlacionadas com a razão de insolação (n/N).

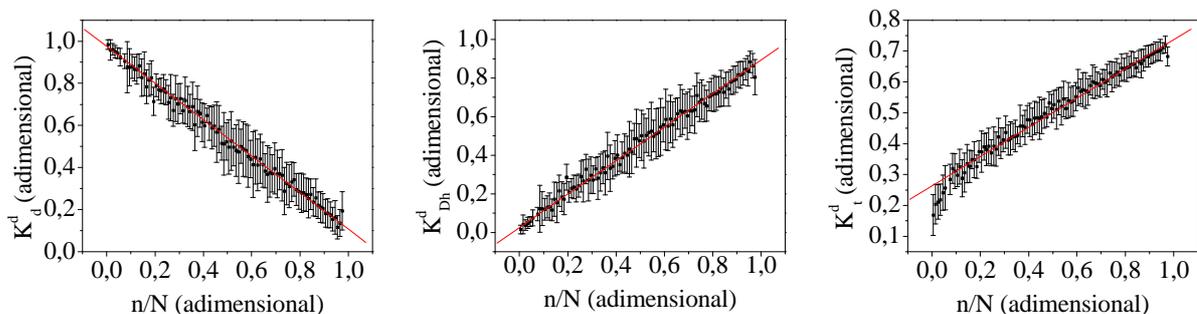


Figura 6: Correlações diárias: (a) índice de claridade K_t e razão de insolação (n/N); (b) fração da difusa K_d e razão de insolação (n/N); (c) fração da direta K_{Dh} e razão de insolação (n/N).

As curvas das figuras 5 mostram que a equação de regressão linear tende a superestimar e subestimar os valores medidos das frações K_t , K_{Dh} e K_d em função da cobertura de céu, principalmente nas coberturas de céu nublado e céu aberto. Para as correlações $K_t \times (n/N)$ e $K_{Dh} \times (n/N)$ a equação superestima a medida para baixa razão de insolação (cobertura nublada), e superestima na alta razão de insolação (cobertura de céu claro). A estimativa da correlação $K_d \times (n/N)$ subestima e superestima a medida, na alta e baixa razão de insolação, respectivamente.

A tabela 5 apresenta as equações de estimativa para as frações médias K_t , K_{Dh} e K_d em função da razão de insolação (n/N) com os respectivos coeficientes de determinação R^2 . A obtenção das frações K_t , K_{Dh} e K_d a partir da medida do número de horas de brilho solar constitui a técnica mais simples e econômica de se estimar as três radiações global, direta e difusa, pois a técnica utiliza apenas a medida de brilho solar por meio de um heliógrafo, instrumento muito comum e com a maior base de dados nos postos meteorológicos do Brasil.

| | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----|
| $K_t^d = 0,26354 + 0,47357 (n/N)^d$ | $R^2 = 0,98375$ | (5) |
| $K_{dh}^d = 0,02474 + 0,868(n/N)^d$ | $R^2 = 0,99479$ | (6) |
| $K_d^d = 0,97526 - 0,868 (n/N)^d$ | $R^2 = 0,99479$ | (7) |

Tabela 5: Equações de Estimativa das frações médias K_t , K_{Dh} e K_d em função de (n/N).

As equações para K_t , K_{Dh} e K_d em função da razão de insolação n/N são lineares com elevado coeficiente de determinação. As frações K_t e K_{Dh} são crescentes e K_d é decrescente, quando a razão de insolação (n/N) evolui da cobertura de céu nublado a céu aberto no intervalo de 0 a 1. O coeficiente de determinação das equações de estimativa para K_{Dh} e K_d em torno de 0,995 é ligeiramente mais elevado que o da equação para K_t com $R^2 = 0,9840$.

A correlação entre K_t e (n/N) mostra que a transmissividade atmosférica mínima e máxima para a radiação global local é da ordem de 22% e 73%, respectivamente; a relação K_d e (n/N) indica que a máxima e mínima fração da radiação difusa da global são de 99% e 13%, respectivamente. A relação K_{Dh} e (n/N) mostra que a fração da radiação direta na radiação global possui mínimo e máximo de 1% e 87%, respectivamente.

A tabela 6 apresenta os resultados da validação das equações (3) e (4) do modelo de Liu-Jordan e as equações (5), (6) e (7) do modelo de Angstrom por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott. O indicativo estatístico MBE, obtido na validação das equações (3) e (4) do modelo de Liu-Jordan mostra que as equações K_{Dh} e K_d subestimam as medidas; o indicativo RMSE abaixo dos 20,0% mostra que a dispersão entre a radiação medida e a estimada é inferior a 25,0%, citados na literatura por De Miguel (2001), et al na Espanha; Erbs (1982); Lam e Li, Reindl (1990); Newland (1989) Orgill e Hollands.,1977, Hawlader (1984) e Oliveira et. al., (2002). O índice de ajustamento “d” de Willmott, superior a 0,9758 expressam a boa concordância entre a fração estimada e a medida para as duas equações K_{Dh} e K_d . Na análise geral dos indicativos estatísticos, a equação K_{Dh} apresentou o melhor desempenho, pois apresentou os indicativos estatísticos MBE e RMSE menores que os da equação K_d .

| Frações | MBE.% | RMSE.% | d | Equação |
|---------------------------|-------|--------|---------|---------|
| $K_{dh}^d \times K_t^d$ | -0,19 | 16,72 | 0,97581 | (3) |
| $K_d^d \times K_t^d$ | -0,90 | 18,16 | 0,97576 | (4) |
| $K_t^d \times (n/N)^d$ | 2,30 | 14,48 | 0,94378 | (5) |
| $K_{dh}^d \times (n/N)^d$ | 7,04 | 30,21 | 0,95528 | (6) |
| $K_d^d \times (n/N)^d$ | -2,68 | 11,52 | 0,95528 | (7) |

Tabela 6: Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativa diária.

O indicativo estatístico MBE da validação das equações (5) a (7) do modelo de Angstrom mostra que as equações das frações K_t e K_d superestimam as medidas com erros inferiores a 3,0%. A equação K_{Dh} subestima a medida com erro da ordem de 7,0%. O indicativo RMSE foi melhor para as frações na sequência K_t , K_d e K_{Dh} . Os valores do espalhamento das frações K_t e K_d de 14,5% e 11,5% respectivamente foi considerado significativo estatisticamente porque são inferiores aos RMSE das validações das frações K_t e K_d citados na literatura. O índice de ajustamento “d” de Willmott, superior a 0,94, expressa boa concordância entre a estimativa e a medida, para as equações K_t , K_{Dh} e K_d , com melhor resultado para as frações K_{Dh} e K_d mais alto que 0,95.

Equações de Estimativa Mensal e validação.

A figura 7 mostra a correlação mensal diária: (a) fração da direta K_{Dh} e índice de claridade K_t , (b) fração da difusa K_d e índice de claridade K_t . A correlação mensal diária é similar à encontrada por Jacovides, et al (1996), Page (1961), Newland (1989) e outros para a fração difusa. Diferentemente das duas correlações anteriores, horária e diária, devido a quantidade de pontos experimentais inferiores, as frações mensais diárias K_{Dh} e K_d foram obtidas em todo intervalo de variação de K_t sem necessidade do uso da técnica da média dos intervalos centesimais. A correlação das frações mensais diárias K_{Dh} e K_d é linear crescente e decrescente, respectivamente em função do índice de claridade mensal K_t .

As curvas da figura 6 mostra que a equação linear K_{Dh} superestima enquanto que a K_d subestima a medida na cobertura de céu aberto, para o índice de claridade $K_t > 0,6$. Por outro lado, equação linear K_{Dh} subestima enquanto que a K_{Dh} superestima a medida na cobertura de céu parcialmente nublado, onde o índice de claridade $K_t < 0,45$.

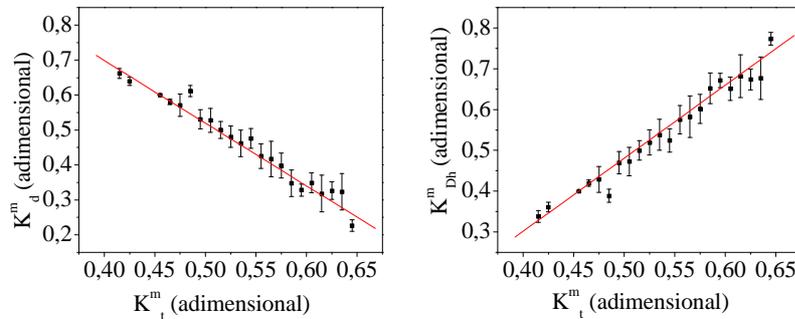


Figura 7: Correlação mensal diária: (a) fração direta K_{Dh} e índice de claridade K_t ; (b) fração difusa K_d e índice de claridade K_t .

A tabela 7 apresenta as equações de estimativa para as frações K_{Dh} e K_d em função de K_t , com seus respectivos coeficientes de determinação R^2 . Para a fração K_d , apesar da similaridade da equação com as citadas na literatura, os coeficientes linear e angular divergem, sendo consideravelmente mais elevados que os de outros países como Canadá; China e Ilha de Cypros, descritos nos trabalhos de Page (1961); Newland (1989) e Jacovides (1996). O resultado da equação local se aproxima das equações de Lalas et al. (1987), nas Ilhas Gregas e Oliveira et al.,(2002) em São Paulo.

| | | |
|---------------------------------------|-----------------|-----|
| $K_d^m = 1,41558 - 1,79223 K_t^m$ | $R^2 = 0,97668$ | (8) |
| $K_{Dh}^m = -0,41558 + 1,79223 K_t^m$ | $R^2 = 0,97668$ | (9) |

Tabela 7: Equações de Estimativa das frações mensais K_{Dh} e K_d em função de K_t .

A figura 8 mostra as correlações K_t , K_{Dh} e K_d em função da razão de insolação (n/N). A correlação das frações mensais diárias K_t e K_{Dh} é linear crescente e K_d é decrescente em função da razão de insolação mensal (n/N).

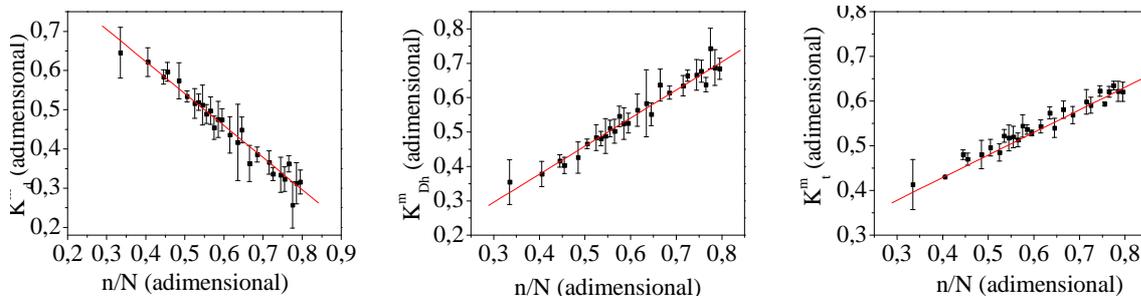


Figura 8: Correlação mensal diária: (a) K_t em função da razão de insolação (n/N); (b) K_{Dh} em função da razão de insolação (n/N); (c) K_d em função da razão de insolação(n/N).

A tabela 8 apresenta as equações de estimativa para as frações médias K_t , K_{Dh} e K_d em função da razão de insolação (n/N) com os respectivos coeficientes de determinação R^2 . A equação de Angstrom $K_t \propto (n/N)^\alpha$ com coeficientes linear $\alpha = 0,23$ e angular $\beta = 0,51$ é superior aos coeficientes de alguns locais, e inferior ao de outros, como mostram os trabalhos de Newland (1989), Iqbal (1979), Jain y Jain (1988), entre outros.

| | | |
|-------------------------------------|-----------------|------|
| $K_t^m = 0,22663 + 0,50529(n/N)^m$ | $R^2 = 0,98670$ | (10) |
| $K_d^m = 0,9496 - 0,8171(n/N)^m$ | $R^2 = 0,96896$ | (11) |
| $K_{Dh}^m = 0,0504 + 0,8171(n/N)^m$ | $R^2 = 0,96896$ | (12) |

Tabela 8: Equações de Estimativa das frações K_t , K_{Dh} e K_d em função de (n/N).

A tabela 9 apresenta os resultados da validação das equações (8) e (9) do modelo de Liu-Jordan e as equações (10), (11) e (12) os do modelo de Angstrom por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott.

O indicativo estatístico MBE, obtido na validação das equações (8) e (9) do modelo de Liu- Jordan mostra que há uma superestimativa de K_{Dh} e subestimativa de K_d em relação à medida experimental, com erro inferior a 12,5% na fração estimada, e melhor resultado para a equação K_d com erro de 5,0% aproximadamente.

O indicativo RMSE abaixo de 17,0% mostra que a dispersão entre a fração medida e a estimada é da mesma ordem de grandeza aos RMSE da validação de outras equações de estimativa para outros locais. O índice de ajustamento “d” de Willmott, superior a 0,89253, expressa a boa concordância entre a fração estimada e a medida para as duas equações K_{Dh} e K_d .

| Equações | MBE.% | RMSE.% | “d” de Willmott | Equação |
|---------------------------|-------|--------|-----------------|---------|
| $K_{dh}^m \times K_T^m$ | 12,51 | 16,25 | 0,89253 | (8) |
| $K_d^m \times K_T^m$ | -5,12 | 6,64 | 0,89253 | (9) |
| $K_T^m \times (n/N)^m$ | 2,01 | 4,60 | 0,94841 | (10) |
| $K_{dh}^m \times (n/N)^m$ | 12,47 | 16,17 | 0,87872 | (11) |
| $K_d^m \times (n/N)^m$ | -5,10 | 6,61 | 0,87872 | (12) |

Tabela 9: Indicativos Estatísticos da Validação das equações de estimativa mensal.

O indicativo estatístico MBE, da validação das equações (10) a (12) do modelo de Angstrom, mostra que as equações das frações K_t e K_{Dh} superestimam com erro de estimativa de 2,0% e 12,0% respectivamente, e K_d subestima as medidas com erro de estimativa da ordem de 5%. O indicativo RMSE foi inferior a 16,2% e melhor para as frações em seqüência K_t , K_d e K_{Dh} , respectivamente. O índice de ajustamento “d” de Willmott superior a 0,88 expressa a boa concordância entre a fração estimada e a medida para as equações K_t , K_{Dh} e K_d , com melhor resultado para a fração K_t maior que 0,94.

CONCLUSÕES

As equações de estimativa horária, diária e mensal para as frações K_{Dh} e K_d em função de K_t , e as equações de estimativa diária e mensal para as frações K_t , K_{Dh} e K_d em função da razão de insolação n/N , obtidas neste trabalho apresentam coeficiente de determinação R^2 próximos de 100,0% de correlação. Os resultados obtidos na validação por meio dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott mostram que as equações estimam as frações K_{Dh} e K_d em função de K_t , e as frações K_t , K_{Dh} e K_d em função da razão de insolação n/N , com precisão e exatidão para aplicações agrícolas ,as quais adotam como referencia o valor de 80,0% da equação de Angstrom- Prescott na estimativa da radiação global..

Agradecimentos à FAPESP, CNPQ.

REFERÊNCIAS

- Bartoli, B., Cuomo, , Amato, U. Diffuse and bean components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, 28, p.307-11, 1982.
- De Miguel, A., Bilbao, J., Aguiar, R., Kambezidis, H., Negro, E. Diffuse solar irradiation model evaluation in north Mediterranean belt area. *Solar Energy*, 70, 2, 143-53, 2001.
- Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28, 293-302, 1982.
- Hawladar, M. N. A. Diffuse, global and extraterrestrial solar radiation for Singapore. *International Journal of Ambient Energy*, 5, p.31-8, 1984.
- Hollands, K. G. T. A concentrator for thin-film solar cells. *Solar Energy*, 13, 149, 151, 1971.
- Iqbal, M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data - I, Monthly average daily horizontal radiation. *Solar Energy*, 1, 81-86, 1979a.
- Jacovides, C. P., Hadjioannou, L., Pashiardis, S., Stefanou, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. *Solar Energy*, 56, 6, 565-72, 1996.
- Jain, S. y Jain, P. C. A comparison of the Angstrom-type correlations and the estimation of monthly average daily global irradiation. *Solar Energy*, 40, 2, 93-8, 1988.
- Lalas, D. P., Petrakis, M., Papadopoulos, C. Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece. *Solar Energy*, 39, 5, 455-8, 1987.
- Liu, B. Y. H. y Jordan, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 3, 4, 1-19, 1960.
- Newland, F. J. A study of solar radiation models for the coastal region of south China. *Solar Energy*, 43, 4, 227-35, 1989.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J., Soares, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, 71, 59-73, 2002b.
- Orgill, J. F. y Hollands, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 19, 3, 357-359, 1977.
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., Duffie, J. A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45, 1, 1-7, 1990.
- Suehrcke, H. y McCormick, P. G. The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day. *Solar Energy*, 42, 4, 303-9, 1989.
- Lam, J.C., Li, D.H.W. Correlations between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Build. and Environ.*, 31, 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*, 46, 261-66, 1991.

Page, J.K. The estimation of monthly average values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. *Proc. U.N. Conf. on New Sources of Energy*, 4, 378-390, 1961.

**MODELING HORIZONTAL BEAM SOLAR RADIATION (K_{Dh}) AND DIFFUSE (K_d)
FRACTIONS OF GLOBAL SOLAR RADIATION AT THE SURFACE IN TERMS OF CLEARNESS
INDEX (K_t) AND INSOLATION RATIO (n/N).**

ABSTRACT: In this work a set of equations to estimate hourly, daily and monthly values of horizontal beam (K_{Dh}) and diffuse (K_d) fractions of global solar radiation at the surface in terms of clearness index (K_t) based on the Liu-Jordan model are derived. It is also derived equations to estimate daily and monthly values of clearness index (K_t) of horizontal beam (K_{Dh}) and diffuse (K_d) fractions of global solar radiation at the surface in terms of insolation ratio using Angstrom-Prescott model. These equations were derived considering observations carried out continuously in Botucatu, State of São Paulo, Brazil, during 10 years (1996-2005). Observations carried out between 1996 and 2003 (8 years) were used for developing the equations and between 2004 and 2005 (2 years) for validation. The set of fourth order polynomial equations for the Liu-Jordan models and linear equations for Angstrom-Prescott models developed here show very good performance indicated by large R^2 . The values of MBE, RMSE and “d of Willmott” parameter indicated that the set of equations obtained in this work can be used to estimate K_t , K_{Dh} and K_d with accuracy and precision required for energy and agriculture applications.

key-words: global solar radiation, diffuse solar radiation, horizontal beam solar radiation, Liu-Jordan model, Angström-Prescott model.