

## Estimativas das radiações direta e difusa em superfícies inclinadas com base na razão de insolação

Adilson P. de Souza<sup>1</sup> & João F. Escobedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Campus de Sinop, Distrito Industrial, CEP 78550-000, Sinop-MT, Brasil. E-mail: adilsonpacheco@ufmt.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Departamento de Ciências Ambientais, Fazenda Experimental Lageado, s/n, CEP 18610-970, Botucatu-SP, Brasil. Caixa Postal 237. E-mail: escobedo@fca.unesp.br

### RESUMO

Foram obtidas e avaliadas equações estatísticas com agrupamentos de dados anuais, sazonais e mensais, para estimativa das componentes direta e difusa da radiação solar com base na razão de insolação (razão entre brilho solar e fotoperíodo) incidente na horizontal e em superfícies inclinadas a 12,85, 22,85 e 32,85° voltadas para o Norte, em Botucatu, SP. Empregaram-se as razões entre as duas componentes e a radiação no topo da atmosfera, em uma base de dados cujas medidas nas três inclinações ocorreram em diferentes períodos (22,85°: 04/1998 a 07/2001; 12,85°: 08/2011 a 02/2003 e 32,85°: 03/2003 a 12/2007) e concomitantes com as medidas na horizontal e com a insolação. As correlações apresentaram comportamentos linear e polinomial de segundo grau para a direta e a difusa, com maiores coeficientes de determinação em períodos com baixa variação da nebulosidade. Os maiores valores da radiação direta e difusa foram encontrados no inverno e no verão, respectivamente. O aumento do ângulo de inclinação diminuiu o desempenho das equações de estimativa em todos os agrupamentos de dados com aumento do espalhamento e diminuição do ajustamento. As equações mensais apresentaram desempenhos superiores para as duas componentes.

**Palavras-chave:** energia solar, indicadores estatísticos, modelo Angström-Prescott, transmissividade atmosférica

### *Estimates of direct and diffuse radiation incident on inclined surfaces based on ratio of sunshine duration*

### ABSTRACT

Statistical equations were obtained and evaluated with annual, seasonal and monthly data groupings for estimates of direct and diffuse components of solar radiation based on the sunshine duration (ratio of sunshine and photoperiod) incident on horizontal and inclined surfaces to 12.85, 22.85 and 32.85° with facing to North, in Botucatu, SP. The ratios between the two components and radiation at the top of the atmosphere were used, in a database whose inclinations were measured in three different periods (22.85°: 04/1998 to 07/2001; 12.85°: 08/2011 to 02/2003; and 32.85°: 03/2003 to 12/2007) and concomitant with horizontal measures and sunshine duration. The correlations showed a linear and second degree polynomial behavior for the direct and diffuse radiation, with higher coefficients of determination in periods of low variation in the coverage of the sky (cloudiness). The highest values of the direct and diffuse radiation were found in winter and summer, respectively for all surfaces evaluated. The increase in the inclination angle decreased the performance of equations in all groups of data with increase in scattering and decrease in index of the adjustment, however, the monthly equations allowed better performance for the two components.

**Key words:** solar energy, statistical indicators, Angström-Prescott model, atmospheric transmissivity

## Introdução

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar pode sofrer atenuação pelos fenômenos da reflexão, absorção e difusão em virtude do contato das ondas eletromagnéticas com os gases constituintes da atmosfera, nuvens e/ou com partículas em suspensão; todavia, esses fenômenos não são suficientes para reter todo o espectro de radiação solar, em que um percentual atravessa a atmosfera sem qualquer interação (radiação direta) e, em conjunto com a componente difusa (seletiva e não-seletiva, dependendo das dimensões da partícula atenuante) atinge a superfície do solo formando a radiação solar global que, por sua vez, ainda depende, em planos inclinados, da contribuição da componente refletida interceptada.

O conhecimento quantitativo das componentes da radiação solar incidentes em superfícies naturais e/ou forçadas com diferentes ângulos de inclinação e faces de exposição, pode ser aplicado em muitas áreas científicas e tecnológicas (Kamali et al., 2006; Gunerhan & Hepbasli, 2007; El-Sebaï et al., 2010). Nesses casos, a topografia é fator fundamental na determinação da quantidade de energia solar incidente em um local na superfície terrestre pois a variabilidade da altitude, inclinação (declividade), orientação (azimute) e sombreamento, podem afetar direta ou indiretamente, os níveis energéticos disponíveis que, por outro lado, interferem nos processos biofísicos de aquecimento do ar e do solo, além dos processos fisiológicos de produção (Dubayah & Rich, 1995; Noorian et al., 2008; Boland et al., 2008; Hoch & Witheman, 2010).

A busca pelo desenvolvimento de modelos propostos para estimar principalmente a componente difusa da radiação solar incidente em planos inclinados, tem-se mostrado fundamental para a elaboração e expansão de bases de dados visto que a projeção das radiações direta e refletida em superfícies inclinadas pode ser obtida por modelos matemáticos simplificados (Iqbal, 1983; Kamali et al., 2006; Gueymard, 2009). Como existe grande dificuldade do monitoramento de rotina dessas componentes nas estações brasileiras, o desenvolvimento de modelos estatísticos de estimativas, obtidos por meio de regressão linear ou polinomial em correlações entre as frações radiométricas e/ou com a razão de insolação, pode potencializar a análise dos potenciais energéticos disponíveis para as aplicações supracitadas.

Neste contexto, as propostas de Angström (1924) e as modificações de Prescott (1940) se tornaram as metodologias precursoras e bastante empregadas para diversas regiões brasileiras, em especial na definição dos coeficientes linear (a) e angular (b) com dependência das características climáticas locais, latitude, época do ano e altitude. A maioria dos estudos realizados com essa metodologia no Brasil enfocou apenas na estimativa da radiação global na horizontal (Blanco & Sentelhas, 2002; Tiba et al., 2005; Dornellas et al., 2006; Escobedo et al., 2007; Carvalho et al., 2011, entre outros). Existem alguns trabalhos desenvolvidos com avaliações para as componentes da radiação (Maduekwe & Chendo, 1995; Gopinathan & Soler, 1996; Alnaser & Al-Attar, 1999; Vartiainen, 2000; Power, 2001; Robledo & Soler, 2002; Bashahu, 2003; Mediavilla et al., 2005; Boland et al., 2008; Noorian et al., 2008; Koussa et al., 2009); todavia, em sua grande maioria não contemplam

estimativas para superfícies inclinadas e ainda no Brasil são mais escassas (Drechmer & Ricieri, 2006; Escobedo et al., 2007).

Em virtude dos custos envolvidos na aquisição e na manutenção dos instrumentos empregados nas medidas das radiações direta (pireliômetros) e difusa (piranômetros com sombreamento), este trabalho objetivou avaliar as correlações e os desempenhos de modelos de estimativa das componentes direta e difusa da radiação solar, com base na razão de insolação, para a horizontal e para superfícies inclinadas com a face para o Norte a 12,85°, 22,85° e 32,85°, em Botucatu, SP.

## Material e Métodos

O estudo foi realizado com o banco de dados das radiações direta e difusa obtidas em superfícies horizontais e inclinadas na Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu, SP (latitude 22°51' S; longitude 48°26' W; altitude 786 m), no período de abril de 1998 a dezembro de 2007. Segundo a classificação climática de Köppen, a região de Botucatu é caracterizada como do tipo Cwa - temperado úmido, com inverno seco e verão quente (Cepagri, 2011). Dentro do período supracitado as medidas nas inclinações com a face voltada para o Norte foram distribuídas em: 12,85° ( $|L| - 10^\circ$ ), 22,85° ( $|L|$ ) e 32,85° ( $|L| + 10^\circ$ ), entre 09/2001 e 02/2003; 04/1998 e 08/2001; 02/2003 a 12/2005, respectivamente e concomitantes com medidas na superfície horizontal. Para evitar a dependência de monitoramento das componentes direta e difusa da radiação solar foram avaliadas as correlações em agrupamentos anuais, sazonais e mensais com dados de 2 anos para 22,85° e 32,85°; 1 ano para 12,85° e 5 anos para horizontal, sendo os demais períodos empregados nas validações. Para tanto, foram avaliadas as seguintes correlações:  $[H_B / H_0] \times (n / N)$  e  $[H_D / H_0] \times (n/N)$ , que indicam as razões entre a radiação direta e a radiação no topo da atmosfera (sendo esta para a horizontal dada por eq. 1 e nas inclinações por eq. 2), com a razão entre o brilho solar e o fotoperíodo e a razão entre a radiação difusa e a radiação no topo da atmosfera (eqs. 3 e 4).

$$\frac{H_{BH}^d}{H_{OH}^d} = a + b \left( \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

$$\frac{H_{B\beta}^d}{H_{O\beta}^d} = a + b \left( \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

$$\frac{H_{DH}^d}{H_{OH}^d} = a + b \left( \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

$$\frac{H_{D\beta}^d}{H_{O\beta}^d} = a + b \left( \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

em que:  $H_{BH}^d$  é a radiação direta horizontal;  $H_{B\beta}^d$  é a radiação direta inclinada;  $H_{DH}^d$  é a radiação difusa horizontal;  $H_{D\beta}^d$  é a radiação difusa inclinada;  $H_{OH}^d$  é a radiação no topo da atmosfera para a horizontal (eq. 5);  $H_{O\beta}^d$  é a radiação no topo

da atmosfera para as superfícies inclinadas (eq.6);  $\beta$  é o ângulo de inclinação; “n” é o brilho solar (horas), obtido por um heliógrafo Campbell Stokes; “N” é o fotoperíodo (horas) e “d” indica a partição diária. As radiações foram expressas em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

$$H_{OH}^d = \left(\frac{24}{\pi}\right) H_{CS} E_0 \left[ \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s (\sin \delta \sin \varphi) + (\cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s) \right] \quad (5)$$

$$H_{OP}^d = \left(\frac{24}{\pi}\right) H_{CS} E_0 \left[ \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s (\sin \delta \sin (\varphi \pm \beta)) + (\cos \delta \cos (\varphi \pm \beta) \sin \omega_s) \right] \quad (6)$$

em que:  $H_{SC}$  é a constante solar diária (4921 KJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) e  $E_0$  é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, obtido segundo Iqbal (1983).

Em decorrência de dificuldades no monitoramento e na obtenção diária da radiação difusa na horizontal em superfícies inclinadas, optou-se pela aplicação do método da diferença para todas as superfícies analisadas (eqs. 7 e 8), como segue:

$$H_{DH}^d = H_{GH}^d - H_{BH}^d \quad (7)$$

$$H_{DP}^d = H_{GP}^d - H_{BP}^d - H_{RP}^d \quad (8)$$

em que:  $H_{GH}^d$  é a radiação global horizontal;  $H_{GP}^d$  é a radiação global inclinada;  $H_{RP}^d$  é a radiação refletida incidente no plano inclinado.

As medidas da radiação global ( $H_G$ ) foram obtidas com auxílio de piranômetros Eppley-PSP, com fator de calibração de 7,45 μV/Wm<sup>-2</sup> e linearidade de ± 0,5 % (0 a 2800 W/m<sup>2</sup>), em conjunto com piranômetros CM3 (Kipp & Zonen), com fator de calibração de 21,36 μV/Wm<sup>-2</sup> e acurácia de ± 2,0% quando comparado com o Eppley-PSP, calibrados conforme recomendações da WMO (2008). Para a radiação direta na incidência ( $H_{BN}$ ) empregou-se um pireliômetro Eppley-NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 Eppley, com fator de calibração de 7,59 μV/Wm<sup>-2</sup> e linearidade de ± 0,5 % (0 a 1400 W/m<sup>2</sup>). A projeção da irradiância direta na horizontal ( $I_{BH}$ ) foi dada pelo produto entre ( $I_{BN}$ ) e o cosseno do ângulo zenital. Nos planos inclinados aplicou-se o fator geométrico ( $R_B$ ) (eq. 9), dado pela razão entre radiação incidente no topo da atmosfera para um plano inclinado e para um plano horizontal (Iqbal, 1983).

$$R_B = \frac{(\pi/180) \omega_s \sin \delta \sin (\varphi \pm \beta) + \cos \delta \cos (\varphi \pm \beta) \sin \omega_s}{(\pi/180) \omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s} \quad (9)$$

em que:  $\phi$  é a latitude local;  $\delta$  é a declinação solar;  $\omega_s$  é o ângulo horário diário para a horizontal;  $\omega_s'$  é o ângulo horário diário para uma inclinação.

A componente refletida incidente em uma superfície inclinada pode ter comportamento isotrópico e anisotrópico, sendo que esta última componente pode ser aplicada somente em dias com céu claro e limpo, casos em que a reflexão

não é perfeitamente difusa (Iqbal, 1983); assim, a fração da energia refletida pelo solo que atinge a superfície inclinada foi considerada apenas com base na reflexão isotrópica (eq. 10).

$$H_{RP}^d = \frac{1}{2} H_{GP}^d \rho (1 - \cos \beta)$$

em que:  $\rho$  é o albedo da superfície (empregando-se como referência 23%); o termo  $[1 - \cos(\beta)/2]$  é a razão entre a irradiação incidente na superfície inclinada sobre a radiação refletida pelo solo.

Nos agrupamentos anuais de dados empregou-se a curva média para diminuição dos espalhamentos, cujos valores de (n/N) foram discretizados em intervalos centesimais (de 0,01 em 0,01 unidades), possibilitando a avaliação da tendência média de variação de ( $K_T^d$ ). Em cada um desses subintervalos foi calculada a média de ( $K_T^d$ ) e do desvio ( $\delta K_T^d$ ).

Na avaliação do desempenho das equações de estimativas diárias nas superfícies inclinadas quanto nas horizontais, foram empregados os indicativos estatísticos MBE (erro absoluto médio), RMSE (raiz quadrada do erro quadrático médio) e o índice de ajustamento (d) de Willmott (1981), dados por:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (10)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (11)$$

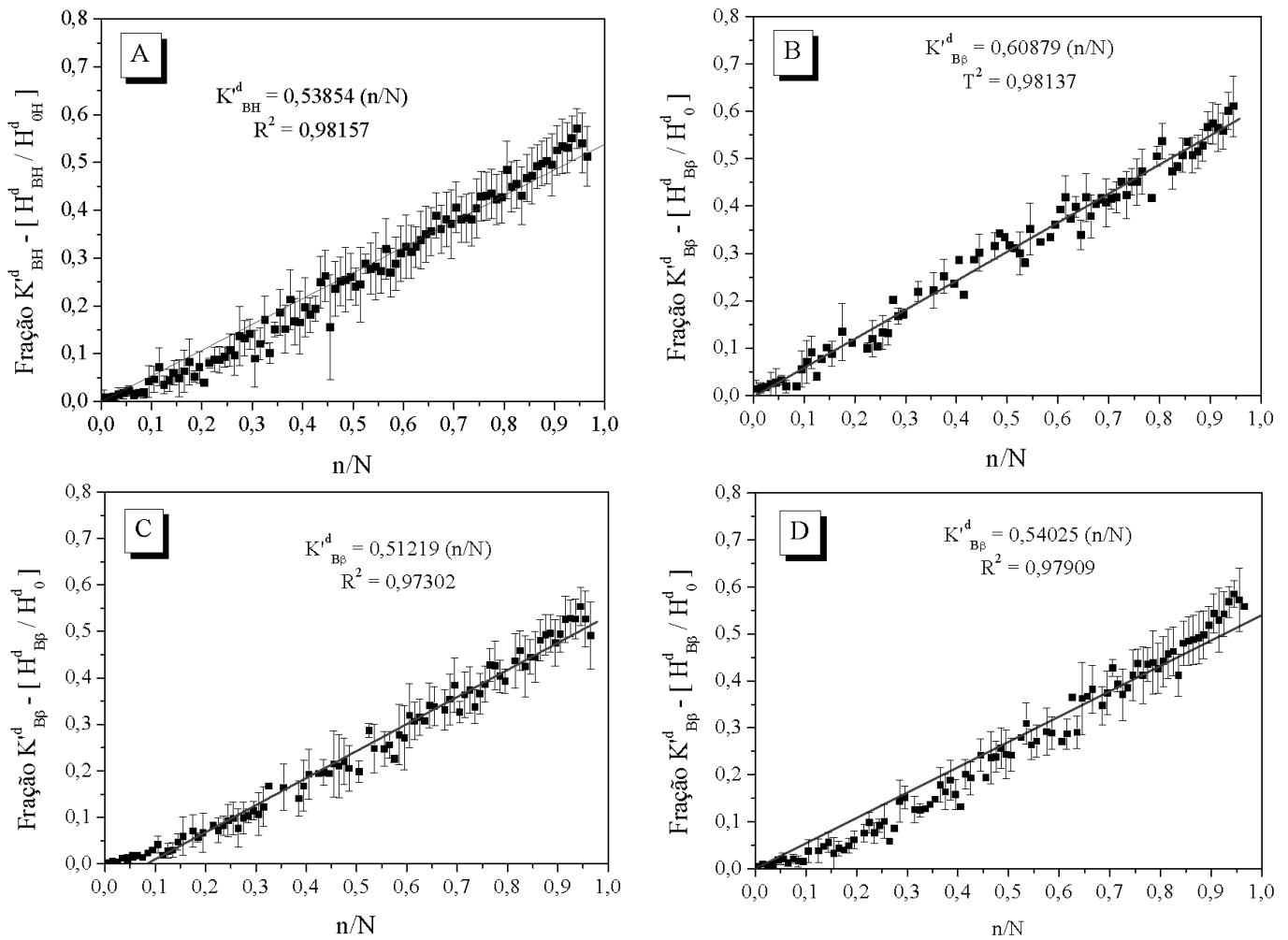
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (12)$$

em que:  $P_i$  é o valor estimado;  $O_i$  é o valor medido;  $N$  é o número de observações;  $|P_i|$  é o valor absoluto da diferença  $P_i - O_i$ ;  $|O_i|$  é o valor absoluto da diferença  $O_i - O_i$ .

## Resultados

As correlações entre a fração direta da radiação no topo da atmosfera e a razão de insolação, foram crescentes (Figura 1) em decorrência do aumento da transmissividade atmosférica com a diminuição do percentual de cobertura de céu. A análise de regressão pela curva média foi efetuada considerando-se coeficientes lineares nulos que garantem a inexistência de resíduos na estimativa quando (n/N) for zero, corroborando com as observações de Power (2001). Observa-se que a transmissividade direta, traduzida pelo coeficiente angular (b) variou entre 51,22 (22,85°) e 60,88% (12,85°) para o agrupamento anual dos dados.

Escobedo et al. (2007) encontraram, para estimativa da fração direta da radiação global, apenas para a horizontal,



**Figura 1.** Correlações entre a fração direta da radiação no topo da atmosfera e a razão de insolação ( $n/N$ ), em agrupamentos de dados anuais para superfícies horizontal (A), inclinadas com a face para o Norte a 12,85° (B), 22,85° (C) e 32,85° (D), em Botucatu, SP

a seguinte equação:  $[H_B/H_{GH} = 0,02474 + 0,868 (n/N)]$ , indicando que em dias completamente nublados a componente direta na horizontal representa em torno de 2,47% da radiação global. Para superfícies inclinadas correlações com a fração direta da radiação global incidente apresentam limitações, por necessitar de medidas da radiação global inclinada.

Na Figura 2 são apresentadas as estimativas para a fração difusa da radiação no topo da atmosfera com comportamento polinomial de segundo grau indicando que, para a variação da razão de insolação e conseqüentemente da cobertura de céu, ocorre um valor de transmissividade máxima para a radiação difusa que, no entanto, não ocorre em uma condição de céu completamente nublado ( $n/N = 0$ ). Este comportamento polinomial decorre das variações da presença de vapor d'água e/ou partículas em suspensão em conjunto com a sazonalidade anual da radiação no topo da atmosfera; visto em um dia de inverno com céu aberto, tende-se a aumentar a contribuição da componente direta em detrimento da difusa e, em contrapartida, a fração difusa tende a diminuir. Muitos trabalhos apresentaram modelos polinomiais para estimativas da radiação difusa com base na razão de insolação e/ou no índice de claridade (Gopinathan & Soler, 1996; Alnaser & Al-Attar, 1999; Bashahu, 2003; Jiang, 2009; Koussa et al., 2009; Posadillo & Luque, 2009; El-Sebaili et al., 2010).

Os coeficientes de determinação para o agrupamento anual dessas correlações, variaram entre 0,66 e 0,88 e foram inferiores aos das equações de estimativa da componente direta. Iqbal (1983), Sclar (2003) e Dal Pai (2005) citam que a componente difusa apresenta comportamento anisotrópico e isotrópico e, normalmente, é composta pelas subcomponentes circunsolar, brilho horizontal (multirreflexões) e radiação difusa isotrópica e que, em muitos modelos de estimativa, não são contempladas, como no caso da correlação com a razão de insolação.

O aumento do ângulo de inclinação propicia piores coeficientes de determinação para coeficientes de estimativa da radiação direta em agrupamento mensal (Tabela 1), devido à maior contribuição da componente refletida no total de radiação incidente e pelas maiores amplitudes da radiação no topo da atmosfera para esta superfície inclinada (Iqbal, 1983); todavia, os valores de  $R^2$  neste agrupamento de dados foram superiores a 0,85. Os maiores valores do coeficiente angular são encontrados no inverno e na primavera indicando uma transmissividade direta da atmosfera maior nesses meses decorrentes das baixas razões de nebulosidade que possibilitam maior número de dias com céu parcialmente nublado tendendo a aberto (Drechmer e Ricieri, 2006; Codato et al. 2008).

Louche et al. (1991) apontaram que em correlações do tipo Angstrom-PreScott é mais difícil se estimar a direta

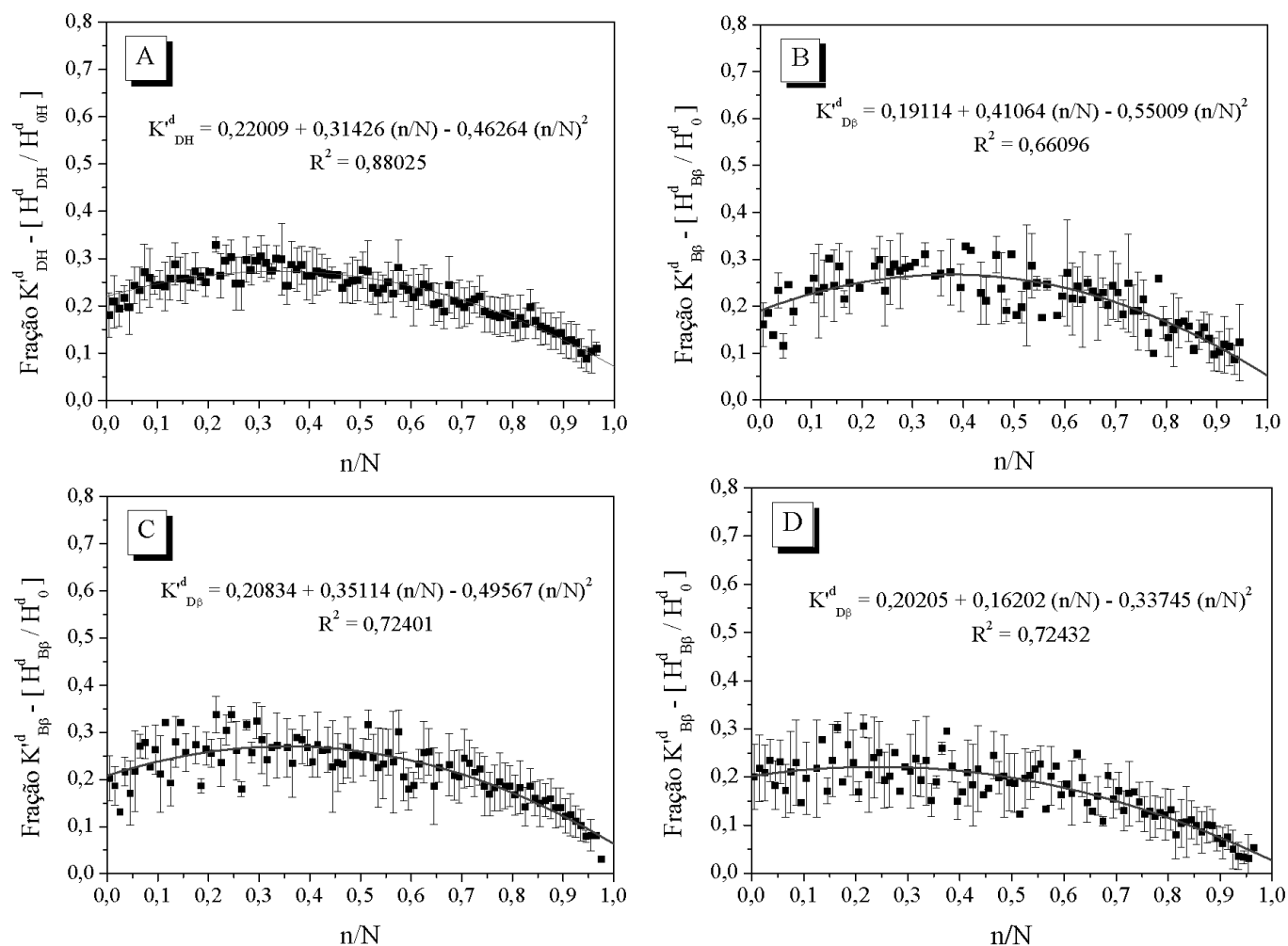


Figura 2. Correlações da fração difusa da radiação no topo da atmosfera ( $H_0$ ) e a razão de insolação ( $n/N$ ), em agrupamentos de dados anuais para superfícies horizontal (A), inclinadas com a face para o Norte a 12,85° (B), 22,85° (C) e 32,85° (D), em Botucatu, SP

Tabela 1. Coeficientes mensais da regressão linear simples [ $H_B/H_0 = a_0 (n/N)$ ] coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e para estimativa da fração direta da radiação no topo da atmosfera com base na razão de insolação em superfícies horizontais e inclinadas

Mês	Horizontal		12,85°		22,85°		32,85°	
	$a_0$	$R^2$	$a_0$	$R^2$	$a_0$	$R^2$	$a_0$	$R^2$
Janeiro	0,56151	0,96292	0,66392	0,95830	0,54188	0,94749	0,51552	0,92275
Fevereiro	0,55707	0,96178	0,57888	0,96944	0,52188	0,93695	0,55269	0,87804
Março	0,56402	0,94104	0,61304	0,94523	0,54503	0,9636	0,5524	0,92408
Abril	0,56848	0,92252	0,62046	0,85761	0,55329	0,90492	0,55722	0,93881
Maio	0,55243	0,92087	0,61524	0,97074	0,53894	0,90764	0,55562	0,92569
Junho	0,53468	0,91601	0,5831	0,67070	0,51309	0,93393	0,61249	0,97790
Julho	0,56754	0,93813	0,64447	0,98526	0,53868	0,93186	0,57325	0,96199
Agosto	0,56808	0,92660	0,59064	0,97614	0,5411	0,9303	0,57672	0,90455
Setembro	0,55640	0,93728	0,58351	0,96859	0,53448	0,93215	0,55518	0,93522
Outubro	0,53550	0,92704	0,60680	0,93662	0,50366	0,91671	0,50721	0,97922
Novembro	0,55842	0,94438	0,60515	0,97316	0,53976	0,93277	0,56169	0,95388
Dezembro	0,53571	0,91098	0,62767	0,94271	0,50528	0,91732	0,54105	0,93294

na incidência do que a global, pois a direta é mais sensível à flutuação dos parâmetros meteorológicos (principalmente o vapor de água, turbidez atmosférica e massa óptica) e indicaram a necessidade da avaliação desses modelos de radiação, propostos em outras localidades, utilizando bases de dados maiores para se avaliar quais são os parâmetros que devem ser levados em consideração na busca da melhoria nas estimativas.

Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes do polinômio para estimativa da radiação difusa e permitem

avaliar as limitações desse tipo de estimativa. Em todas as inclinações as equações mensais apresentaram valores de  $R^2$  semelhantes aos encontrados nos agrupamentos anuais. As transmissividades máximas difusas (quando  $n/N$  for igual a zero) foram observadas para os meses de verão: 30,82 ( $n/N = 0,3766$ ); 36,08 ( $n/N = 0,4365$ ); 32,08 ( $n/N = 0,3769$ ) e 36,74% ( $n/N = 0,3990$ ), para horizontal, 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente; já os percentuais mínimos (quando  $n/N$  tende a 1,0) foram de 5,52; 4,53; 4,87 e 1,06% nos meses de outono e inverno. Em dias completamente nublados não foram

**Tabela 2.** Coeficientes mensais da regressão quadrática [ $H_D/H_0 = a_0 + a_1(n/N) + a_2(n/N)^2$ ], coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e coeficientes de transmissividade para estimativas da fração difusa da radiação no topo da atmosfera e a razão de insolação para diferentes superfícies

Mês	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$	TDCA	TMax (%)	TDCN
Horizontal							
Janeiro	0,22854	0,42298	-0,56151	0,78998	9,00	30,82	22,85
Fevereiro	0,19791	0,37996	-0,49049	0,77698	8,74	27,15	19,79
Março	0,23364	0,27213	-0,43424	0,64398	7,15	27,63	23,36
Abril	0,22547	0,21717	-0,36151	0,61972	8,11	25,81	22,55
Mai	0,20172	0,28945	-0,41458	0,65705	7,66	25,22	20,17
Junho	0,19626	0,32197	-0,44216	0,71823	7,61	25,49	19,63
Julho	0,18029	0,41087	-0,53447	0,71179	5,67	25,93	18,03
Agosto	0,17160	0,48775	-0,60411	0,65779	5,52	27,01	17,16
Setembro	0,19866	0,43696	-0,57598	0,68856	5,96	28,15	19,87
Outubro	0,23986	0,29640	-0,45144	0,71416	8,48	28,85	23,99
Novembro	0,22204	0,34168	-0,47560	0,76118	8,81	28,34	22,20
Dezembro	0,23357	0,21254	-0,32125	0,79865	12,49	26,87	23,36
12,85°							
Janeiro	0,25483	0,48736	-0,62168	0,63555	12,05	35,03	25,48
Fevereiro	0,17948	0,4495	-0,4903	0,61533	13,87	28,25	17,95
Março	0,18318	0,48031	-0,6035	0,6332	6,00	27,87	18,32
Abril	0,20828	0,03485	-0,19483	0,6483	4,83	20,98	20,83
Mai	0,13774	0,46774	-0,55481	0,63226	5,07	23,63	13,77
Junho	0,14740	0,42895	-0,48694	0,91640	8,94	24,19	14,74
Julho	0,14705	0,41162	-0,50255	0,71477	5,61	23,13	14,71
Agosto	0,16348	0,39231	-0,5105	0,67811	4,53	23,89	16,35
Setembro	0,20665	0,40665	-0,50912	0,68033	10,42	28,79	20,67
Outubro	0,18512	0,55317	-0,69258	0,68764	4,57	29,56	18,51
Novembro	0,20546	0,62394	-0,76434	0,64455	6,51	33,28	20,55
Dezembro	0,22804	0,60810	-0,69656	0,65573	13,96	36,08	22,80
22,85°							
Janeiro	0,24821	0,23381	-0,36167	0,58211	12,04	28,60	24,82
Fevereiro	0,21612	0,3889	-0,4956	0,58016	10,94	29,24	21,61
Março	0,24883	0,18504	-0,35759	0,61677	7,63	27,28	24,88
Abril	0,15977	0,55017	-0,66122	0,73388	4,87	27,42	15,98
Mai	0,15103	0,26412	-0,33747	0,58925	7,77	20,27	15,10
Junho	0,13813	0,33888	-0,4139	0,67616	6,31	20,75	13,81
Julho	0,15144	0,34786	-0,44604	0,66818	5,33	21,93	15,14
Agosto	0,13626	0,5046	-0,59	0,61809	5,09	24,42	13,63
Setembro	0,18773	0,40551	-0,51774	0,69973	7,55	26,71	18,77
Outubro	0,19393	0,52655	-0,63265	0,63937	8,78	30,35	19,39
Novembro	0,24325	0,41168	-0,54610	0,66592	10,88	32,08	24,33
Dezembro	0,26094	0,26301	-0,39437	0,67185	12,96	30,48	26,09
32,85°							
Janeiro	0,27783	0,33602	-0,51744	0,92242	9,64	33,24	27,78
Fevereiro	0,25357	0,57036	-0,71465	0,84077	10,93	36,74	25,36
Março	0,21001	0,08308	-0,23054	0,62806	6,26	21,75	21,00
Abril	0,15271	0,33155	-0,45142	0,76879	3,28	21,36	15,27
Mai	0,11621	0,30057	-0,39515	0,6408	2,16	17,34	11,62
Junho	0,11688	0,29911	-0,40161	0,88484	1,44	17,26	11,69
Julho	0,13381	0,29494	-0,41435	0,78112	1,44	18,63	13,38
Agosto	0,15375	0,37188	-0,51506	0,83072	1,06	22,09	15,38
Setembro	0,1999	0,39129	-0,56705	0,84826	2,41	26,74	19,99
Outubro	0,24902	0,27237	-0,49790	0,81451	2,35	28,63	24,90
Novembro	0,23432	0,30294	-0,49615	0,7765	4,11	28,06	23,43
Dezembro	0,25993	0,33961	-0,47349	0,64124	12,61	32,08	25,99

TDCA: transmissividade atmosférica da radiação difusa em um dia de céu aberto; Tmax: transmissividade máxima da radiação difusa; TDCN: transmissividade atmosférica da radiação difusa em um dia de céu totalmente nublado.

verificadas as maiores transmissividades da radiação difusa; entretanto, neste caso variaram entre 30-40%; 29-46%, 26-43% e 18-38%, para horizontal, 12,85°, 22,85° e 32,85°. Esses resultados são observados em outras regiões, com aumento da radiação difusa no verão (período chuvoso) e diminuição no inverno para superfícies inclinadas (Mediavilla et al. 2005; Noorian et al. 2008; Jiang, 2009; Koussa et al. 2009; Posadillo e Luque, 2009).

Entre os equinócios (março a setembro) os níveis médios mensais medidos da radiação direta foram superiores que na horizontal, em até 3,92 e 7,66 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (julho e maio) para 22,85° e 32,85° (Figura 3). Dentre as observações os valores

máximos da radiação direta foram de 12,97 (novembro), 13,71 (fevereiro), 14,13 (maio) e 18,23 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (agosto), para horizontal, 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente, com menores índices verificados em dezembro, janeiro e fevereiro, independentemente do ângulo de inclinação da superfície, decorrentes do aumento da razão de nebulosidade.

Para Viana et al. (2011) a região de Botucatu apresenta, para superfícies com inclinação igual à latitude local, um potencial anual de incidência de radiação direta de 1800 a 2000 kWh/m<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>. Neste trabalho foram observados, para as superfícies com medidas durante todo o ano, totais em torno de 4018,4; 4360,9 e 4868,8 MJ m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>, para a horizontal, 22,85° e

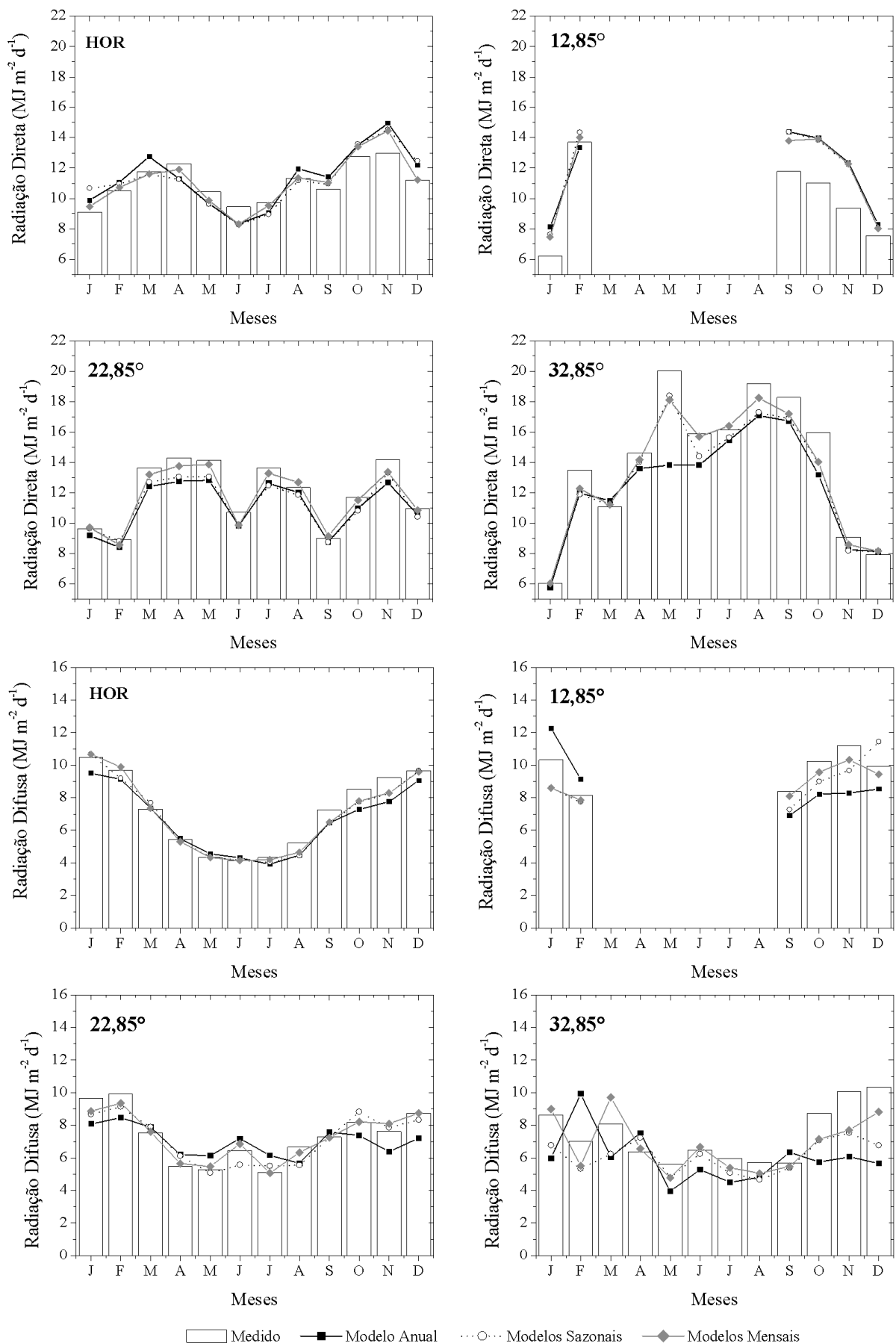


Figura 3. Valores médios mensais das componentes direta e difusa da radiação solar estimada por equações com diferentes agrupamentos de dados em superfícies horizontal (HOR) e inclinadas (12,85; 22,85 e 32,85°) com a face para o Norte

32,85°, respectivamente. Ramírez e Salgado (2005) verificaram, analisando superfícies inclinadas com ângulo igual a latitude local em 30 cidades mexicanas, que na parte Sul do país ocorre um aumento em torno de 30% no mês de dezembro e, na região Noroeste, ganhos por volta de 60% para a mesma época.

Tian et al. (2001) citam que durante o verão (Hemisfério Norte) as razões entre radiação direta em superfícies inclinadas com horizontais, aumentam com o incremento do ângulo de inclinação pois, em decorrência do Sol estar mais distante do local, o ângulo entre os raios solares e a normal da superfície inclinada decresce com o aumento da inclinação permitindo que essas razões possuam valores máximos em inclinações em torno de 70° nos quais os raios solares se tornam paralelos à normal da superfície inclinada; em contraste, o ângulo entre os raios solares e o zênite da superfície atinge seu valor mínimo no verão.

A evolução anual da radiação difusa propicia maiores valores no verão e menores no inverno, decorrentes das maiores e menores condições de cobertura do céu nas duas estações, respectivamente. Verificaram-se, em 22,85 e 32,85°, valores superiores de radiação difusa no mês de junho de 2,30 e 2,53 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Os modelos mensais possibilitaram estimativas mais próximas dos valores medidos das radiações direta e difusa quando comparados com equações de agrupamentos anuais e sazonais (Figuras 4 e 5). Para as estimativas da radiação direta na horizontal os níveis de MBE variaram entre -1,16 (junho) e 1,47 (novembro); -1,21 e 1,56; -1,54 e 1,98 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, para os modelos mensais, sazonais e anuais, respectivamente.

Para as demais superfícies ocorreram as mesmas tendências de variação de MBE, com exceção da inclinação de 12,85°, na qual a grande maioria dos modelos tende a superestimar a radiação direta. Para 22,85 e 32,85°, a maioria das equações encontradas subestimou os valores de radiação direta (MBE < 0), principalmente nos meses de inverno, não ultrapassando 1,24 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, com exceção de junho, para 22,85° com MBE de 2,44 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Ainda para a componente direta, os espalhamentos gerados pelos modelos mensais foram inferiores a 3,76; 3,92; 2,28 e 3,12 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para a horizontal; 12,85; 22,85 e 32,85°, respectivamente, enquanto para as mesmas superfícies os modelos anuais apresentaram RMSE iguais a 3,60; 3,99; 2,89 e 3,85 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

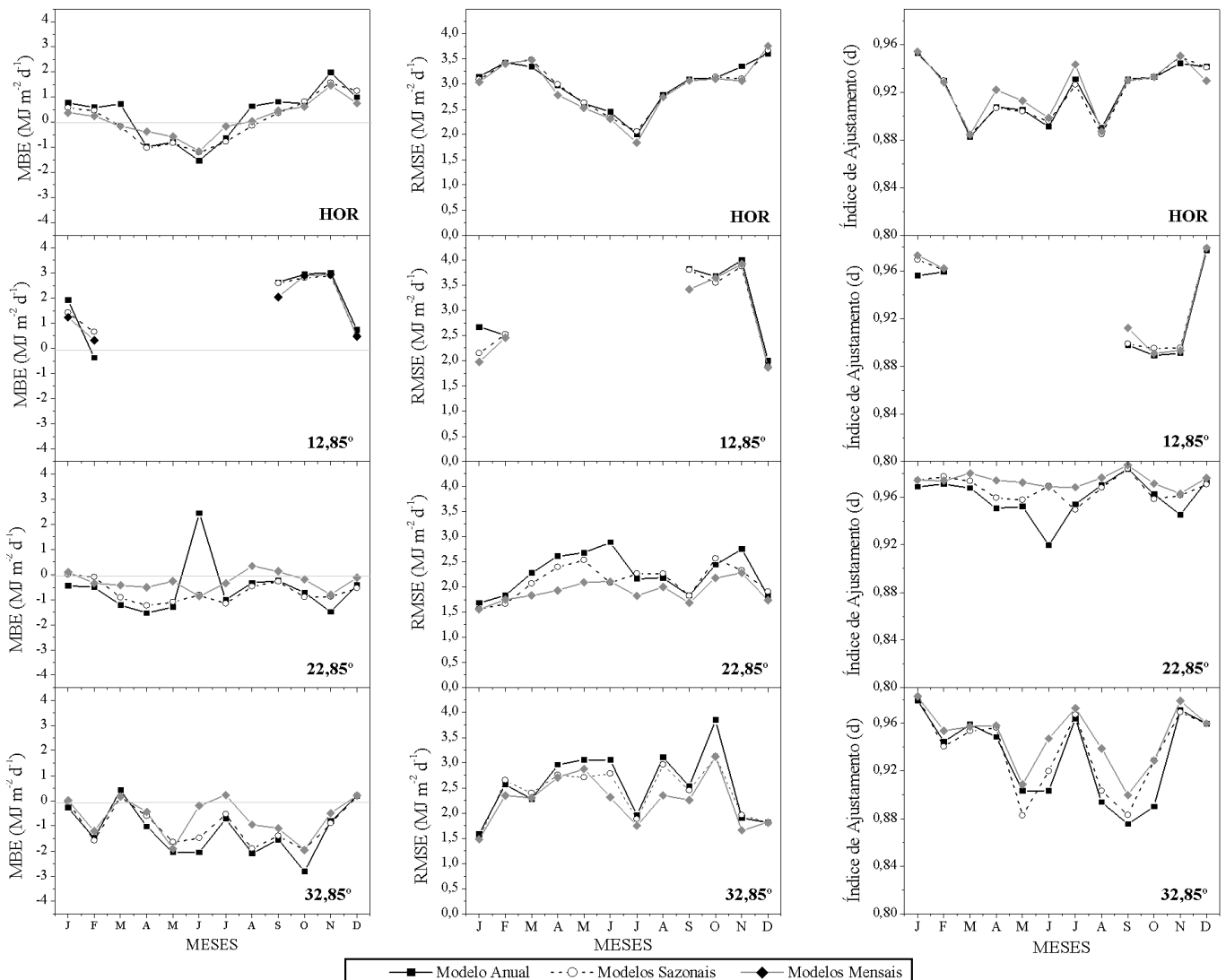
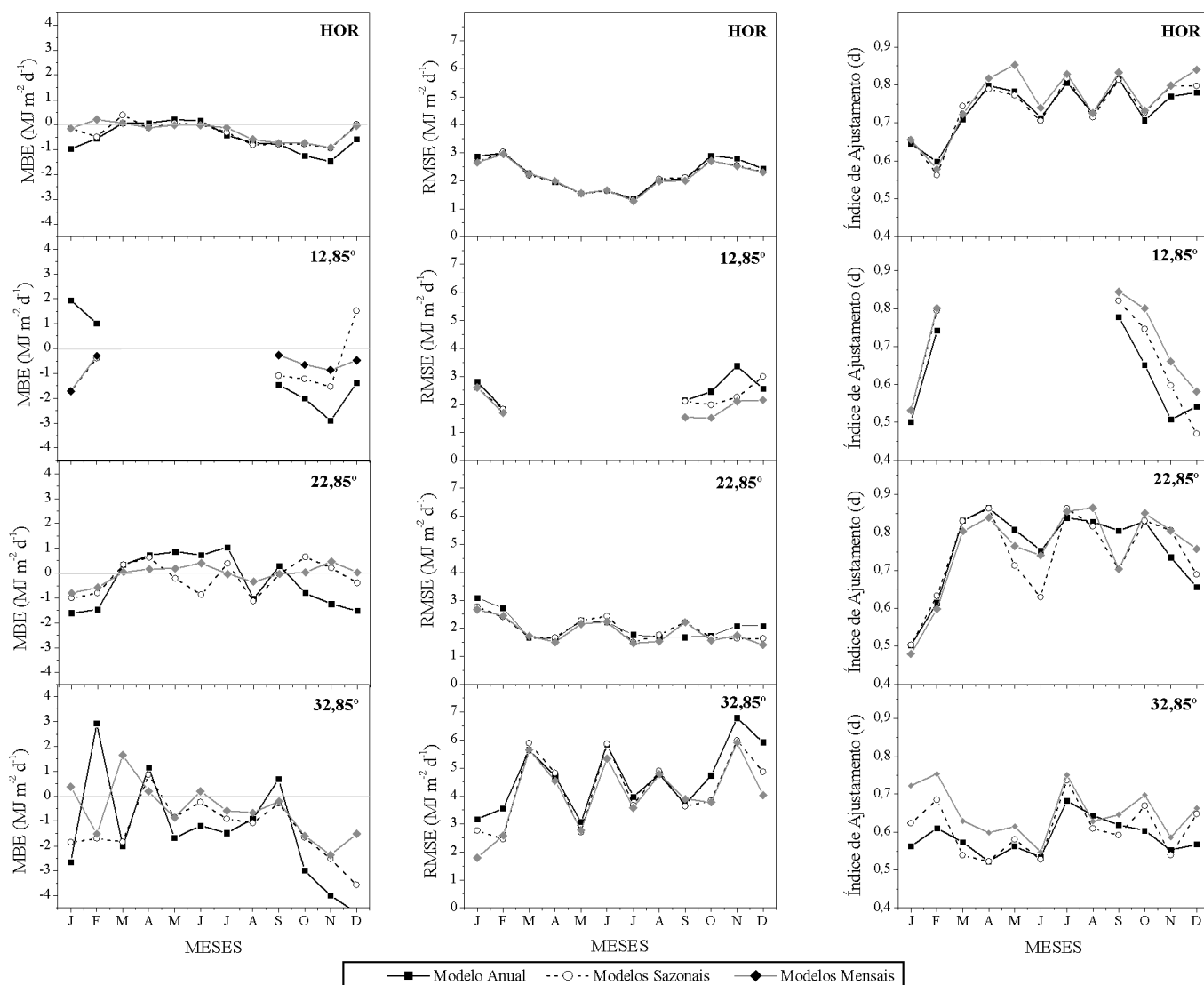


Figura 4. Índices de desempenho das equações com diferentes agrupamentos de dados para estimativa da radiação direta incidente nas superfícies horizontal e inclinadas com a face para o Norte





**Figura 5.** Indicativos de desempenho das equações com diferentes agrupamentos de dados para estimativa da radiação difusa incidente na horizontal (HOR) e inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte

Considerando as equações geradas pelos diferentes agrupamentos de dados, foram observadas variações de RMSE entre 1,48 e 3,99  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  para  $H_{\text{Bp}}^{\text{d}}$  e de 1,52 a 6,79  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  para  $H_{\text{Dp}}^{\text{d}}$ . Os espalhamentos maiores na estimativa da componente difusa são esperados em função das dependências das variações climáticas, astronômicas e das demais componentes que compõem o total de radiação incidente em um plano inclinado.

Os índices de ajustamento foram baixos nos meses com grande variabilidade da cobertura de céu e diminuíram com o aumento do ângulo de inclinação e do período considerado no agrupamento de dados. Para a radiação direta, os valores do índice “d” foram de 0,8875; 0,8909; 0,9632 e 0,8999 para as aplicações das equações mensais em estimativas nas superfícies horizontal, 12,85; 22,85 e 32,85°, respectivamente. Em geral, para aplicações das equações geradas pelos agrupamentos anuais ocorreram diminuições de até 2,50% no ajustamento.

## Conclusões

As correlações entre a componente direta e a razão de insolação apresentaram comportamentos lineares crescentes,

com bons ajustes para estimativas de valores diários e diminuição do desempenho com o aumento do ângulo de inclinação. O emprego e o desempenho de polinômios de segundo grau nas estimativas da radiação difusa dependem da sazonalidade da cobertura de céu e indicam maiores transmissividades dessa componente no verão. As equações obtidas com agrupamentos de dados mensais propiciam melhores estimativas diárias para as radiações direta e difusa.

## Literatura Citada

- Alnaser, W. E.; Al-Attar, R. Simple models for estimating the total, diffuse, direct and normal solar irradiation in Bahrain. *Renewable Energy*, v.18, n.3, p.417-434, 1999. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00788-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00788-5)> 08 Nov. 2012.
- Angström, A. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.50, n.1, p.121-126, 1924. <<http://dx.doi.org/10.1002/qj.49705021008>> 08 Nov. 2012.

- Bashahu, M. Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site. *Solar Energy*, v.75, n.1, p.43-51, 2003. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00213-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00213-5)> 06 Nov. 2012.
- Blanco, F. F.; Sentelhas, P. C. Coeficientes da equação de Antsröm-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, n.2, p.295-300, 2002.
- Boland, J.; Ridley, B.; Brown, B. Models of diffuse solar radiation. *Renewable Energy*, v.33, n.4, p.575-584, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.012>> 07 Nov. 2012.
- Carvalho, D. F.; Silva, D. G.; Souza, A. P.; Gomes, D. P.; Rocha, H. S. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.8, p.838-844, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000800011>> 03 Nov. 2012.
- Cepagri. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas a Agricultura. Clima dos municípios paulistas. <<http://www.cpa.unicamp.br>> 30 Ago. 2011.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Dal Pai, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v.93, n.1, p.57-73, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-007-0326-0>> 08 Nov. 2012.
- Dal Pai, A. Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa. 2005. 87f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005. <[http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2005/dalpai\\_a\\_dr\\_botfca.pdf](http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bla/33004064021P7/2005/dalpai_a_dr_botfca.pdf)> 13 Nov. 2012.
- Dornellas, K. D. S.; Silva, C. L.; Oliveira, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.9, p.1213-1219, 2006. <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/7268/4313>> 07 Nov. 2012.
- Drechmer, P. A. O.; Ricieri, R. P. Irradiação global, direta e difusa, para a região de Cascavel, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum Technology*, v.28, n.1, p.73-77, 2006. <<http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v28i1.1288>> 07 Nov. 2012.
- Dubayah, R.; Rich, P. M. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal Geographical Information Systems*, v.9, n.4, p.405-419, 1995. <<http://dx.doi.org/10.1080/02693799508902046>> 08 Nov. 2012.
- El-Sebaï, A. A.; Al-Hazmi, F. S.; Al-Ghamdi, A. A.; Yaghmour, S.J. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, v.87, n.2, p.568-576, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.032>> 06 Nov. 2012.
- Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Furlan Junior, C. R.; Oliveira, A. P.; Soares, J. Estimativa das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (Kt) e razão de insolação (n/N). In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 1, 2007, Fortaleza. Anais... Fortaleza: ABENS, 2007. CD-ROM. <[http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/projetos/Radiacao/Escobedo\\_et al\\_2007-Estimativas\\_das\\_radiacoes\\_global\\_direta\\_e\\_difusa\\_horaria\\_diaria\\_e\\_mensal\\_em\\_funcao\\_do\\_indice\\_de\\_claridade\\_\(KT\)\\_e\\_razao\\_de\\_insolacao\\_\(n\\_N\).pdf](http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro/projetos/Radiacao/Escobedo_et al_2007-Estimativas_das_radiacoes_global_direta_e_difusa_horaria_diaria_e_mensal_em_funcao_do_indice_de_claridade_(KT)_e_razao_de_insolacao_(n_N).pdf)> 03 Nov. 2012.
- Gopinathan, K. K.; Soler, A. Effect of sunshine and solar declination on the computation of monthly mean daily diffuse solar radiation. *Renewable Energy*, v.7, n.1, p.89-93, 1996. <[http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00108-5](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(95)00108-5)> 08 Nov. 2012.
- Gueymard, C. A. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications. *Solar Energy*, v.83, n.3, p.432-444, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.11.004>> 08 Nov. 2012.
- Gunerhan, H.; Hepbasli, A. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, v.42, n.2, p.779-783, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.012>> 07 Nov. 2012.
- Hoch, S. W.; Whiteman, C. D. Topographic effects on the surface radiation balance in and around Arizona's Meteor Crater. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.49, p.1114-1128, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1175/2010JAMC2353.1>> 03 Nov. 2012.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Canadá: Academic Press, 1983. 390p.
- Jiang, Y. Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. *Applied Energy*, v.86, n.9, p.1458-1464, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.002>> 09 Nov. 2012.
- Kamali, G. A.; Moradi, I.; Khalili, A. Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran). *Theoretical and Applied Climatology*, v.84, n.4, p.235-241, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-005-0171-y>> 09 Nov. 2012.
- Koussa, M.; Malek, A.; Haddadi, M. Statistical comparison of monthly mean hourly and daily diffuse and global solar irradiation models and a Simulink program development for various Algerian climates. *Energy Conversion and Management*, v.50, n.5, p.1227-1235, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.035>> 09 Nov. 2012.
- Louche, A.; Notton, G.; Poggi, P.; Simonnot, G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site. *Solar Energy*, v.46, n.4, p.261-266, 1991. <[http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90072-5](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(91)90072-5)> 09 Nov. 2012.
- Maduekwe, A. A. L.; Chendo, M. A. C. Predicting the components of the total hemispherical solar radiation from sunshine duration measurements in Lagos, Nigeria. *Renewable Energy*, v.6, n.7, p.807-8012, 1995. <[http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)91008-2](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1481(95)91008-2)> 09 Nov. 2012.

- Mediavilla, M. D.; Miguel, A.; Bilbao, J. Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). *Energy Conversion and Management*, v.46, n.8, p.2075-2092, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.10.023>> 09 Nov. 2012.
- Noorian, A. M.; Moradi, I.; Kamali, G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse radiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, v.33, n.6, p.1406-1412, 2008. <[http://193.10.130.23/members/imoradi/publications/moradi08\\_evaluation\\_re.pdf](http://193.10.130.23/members/imoradi/publications/moradi08_evaluation_re.pdf)> 09 Nov. 2012.
- Posadillo, R.; Luque, R. L. Hourly distributions of the diffuse fraction of global solar irradiation in Córdoba (Spain). *Energy Conversion and Management*, v.50, n.2, p.223-231, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.042>> 09 Nov. 2012.
- Power, H. C. Estimating clear-sky beam irradiation from sunshine duration. *Solar Energy*, v.71, n.4, p.217-224, 2001. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00049-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00049-4)> 09 Nov. 2012.
- Prescott, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society Science Australian*, v.64, n.1, p.114-118, 1940.
- Ramírez, V. E. C.; Salgado, R. A. Irradiaciones global, directa y difusa, em superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Ciudad Universitaria: UNAM, Instituto de Ingeniería, México, 2005. 68p. (Serie Investigación y Desarrollo) <<http://www.solartronic.com/download/radiacion.pdf>> 09 Nov. 2012.
- Robledo, L.; Soler, A. A simple clear skies model for the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, v.26, n.2, p.169-176, 2002. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00129-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00129-X)> 14 Nov. 2012.
- Scolar, J.; Martins, D.; Escobedo, J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.21, n.3, p.249-258, 2003. <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v21n3/a04v21n3.pdf>> 13 Nov. 2012.
- Tian, Y. Q.; Davies-Colley, R. J.; Gong, P.; Thorrold, B. W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.109, n.1, p.67-74, 2001. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00245-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00245-3)> 13 Nov. 2012.
- Tiba, C.; Aguiar, R.; Fraidenraich, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy*, v.30, n.6, p.957-966, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.08.007>> 13 Nov. 2012.
- Vartiainen, E. A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces. *Renewable Energy*, v.20, n.1, p.45-64, 2000. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00086-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00086-5)> 13 Nov. 2012.
- Viana, T. S.; Ruther, R.; Martins, F. R.; Pereira, E. B. Assessing the potencial of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, v.85, n.3, p.486-495, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.015>> 13 Nov. 2012.
- World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation. 7<sup>a</sup> ed. Geneva: WMO, 2008. 681p. <[http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf)> 14 Nov. 2012.