

Estimativas da radiação global incidente em superfícies inclinadas com base na razão de insolação

Adilson P. de Souza¹ & João F. Escobedo²

¹ 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

² 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

Equações de estimativas da radiação global foram propostas com base na razão de insolação para superfícies horizontal e inclinadas a 12,85, 22,85 e 32,85°, com face para o Norte, em Botucatu, SP, em agrupamentos de dados mensais, sazonais e anuais. Empregaram-se correlações lineares simples (para definição dos coeficientes lineares e angulares do modelo de Angström-Prescott), 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 o brilho solar. Os desempenhos estatísticos dos modelos foram avaliados pelos indicativos do erro absoluto médio (MBE), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o índice de ajustamento (d). As transmissividades mínimas da radiação global variaram de 14,35% em agosto (12,85°) e 27,86% em dezembro (32,85°) e as transmissividades máximas oscilaram entre 62,10% e 78,90%, para junho (32,85°) e dezembro (12,85°). O incremento do ângulo de inclinação propiciou aumento dos espalhamentos com diminuição dos índices de ajustamento e desempenho. Os piores resultados foram encontrados para aplicação dos modelos sazonais e anuais nos meses de outono e inverno para 32,85° (RMSE abaixo de 42,93% e ajustamento superior a 0,4693).

Palavras-chave: fotoperíodo, indicativos estatísticos, modelo Angström-Prescott, transmissividade atmosférica

Estimates of the global radiation incident on inclined surfaces based of sunshine duration

ABSTRACT

Estimating equations of global radiation based on the sunshine duration were proposed for horizontal surface and with inclination of 12.85, 22.85 and 32.85° facing the North in Botucatu, SP, Brazil, in monthly, seasonal and annual groupings of data. Simple linear correlations were applied (for definition of the linear and angular coefficients of Angstrom-Prescott model), in a database measured in all three inclinations in different periods (22.85°: 04/1998 to 07/2001; 12.85°: 08/2011 to 02/2003; and 32.85°: 03/2003 to 12/2007) concomitant with horizontal measures and sunshine duration. The statistical performance of the model was analysed by the means absolute error (MBE), the square root of the mean square error (RMSE) and the index adjustment (d). The minimum global radiation transmissivity varied from 14.35% in August (12.85°) to 27.86% in December (32.85°) and the maximum transmissivity ranged between 62.10% and 78.90%, for June (32.85°) and December (12.85°). Increasing the angle of inclination surface increased the scattering and decreased the index of adjustment and performance. The worst results were found for application of the seasonal and annual models in the months of autumn and winter for 32.85° (RMSE below 42.93% and adjustment superior to 0.4693).

Key words: photoperiod, statistical indicators, Angström-Prescott model, atmospheric transmissivity

Introdução

O Brasil, país com grande potencial agrícola e florestal se mostra, atualmente, em pleno desenvolvimento tecnológico nas áreas das fontes renováveis de energia como: conversão fototérmica e fotovoltaica, biomassa e biodiesel, entre outras. Neste contexto, a radiação solar pode ser considerada a fonte de energia primária para o ambiente, pois, influencia os fenômenos meteorológicos, processos físicos e bioquímicos que ocorrem no planeta. Existe uma demanda crescente por informações locais da radiação solar para aplicações em simulações de crescimento de plantas (planejamento agropecuário), sistemas alternativos de produção de energia, conservação de alimentos, construções e ambiência e modelos de transferência solo-vegetação-atmosfera, entre outros (Almorox et al. 2005; Liu et al. 2009; Carvalho et al. 2011).

A configuração da topografia local se torna fator imprescindível para determinar a quantidade de energia solar incidente em um local na superfície terrestre, haja vista que a variabilidade de altitude, inclinação (declividade), orientação (azimute) e sombreamento podem afetar, direta ou indiretamente, os níveis energéticos disponíveis (Iqbal, 1983; Dubayah & Rich, 1995), com aplicações mais precisas em projetos de engenharia para coletores solares, projetos de arquitetura (conforto térmico), planejamento urbano, estudos fisiológicos e fitotécnicos sobre vegetações e em estudos micrometeorológicos sobre circulação local.

A medida da radiação solar foi, durante muito tempo, difícil e onerosa, em razão dos custos elevados limitarem as aquisições de radiômetros, restringindo seu uso aos centros de pesquisa (Blanco & Sentelhas, 2002; Tiba et al. 2005; Turco & Rizatti, 2006; Rensheng et al., 2006; Robaa, 2008; Moradi, 2009; Carvalho et al. 2011); assim, muitos modelos estatísticos e/ou paramétricos de estimativa foram desenvolvidos com base em parâmetros meteorológicos, geográficos, atmosféricos e astronômicos. Neste contexto, Angström (1924) propôs um modelo estatístico linear, que foi simplificado por Prescott (1940), em função das dificuldades de medidas em dias com ausência total de nuvens e que correlaciona a transmissividade atmosférica da radiação solar global (K_T^d) (razão entre a radiação global e a radiação no topo da atmosfera) e a razão de insolação (n/N) (razão entre o brilho solar e o fotoperíodo).

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura apresentando os valores dos coeficientes dessa regressão linear simples, para várias localidades brasileiras (Campello Junior, 1998; Blanco & Sentelhas, 2002; Dantas et al., 2003; Dallacort et al., 2004; Tiba & Fraideinrach, 2004; Valiati & Ricieri, 2005; Tiba et al., 2005; Dornelas et al., 2006; Carvalho et al., 2011); todavia, em sua grande maioria, esses estudos foram direcionados apenas para planos horizontais visto que o desenvolvimento e a difusão das estações meteorológicas automáticas possibilitaram expansões confiáveis das medidas de rotina da radiação solar global, em diferentes partições temporais.

No Brasil, as medidas de rotina da radiação solar e das suas componentes em superfícies inclinadas são escassas; contudo, as avaliações de modelos de estimativa da radiação

solar incidente em planos inclinados dependem, pelo menos, da medida da radiação global na horizontal (Scolar et al. 2003; Turco & Rizatti, 2006; Souza et al. 2010). A Estação de Radiometria Solar, da UNESP de Botucatu monitora, desde abril de 1998, as radiações global e difusa pelo método anel de sombreamento; apesar disto e em razão dos custos envolvidos, foram realizadas medidas em diferentes ângulos de inclinação em diferentes períodos; todavia, concomitantes com as medidas na superfície horizontal.

Os monitoramentos da radiação solar em superfícies inclinadas são importantes por nortear as estimativas dos totais de radiação absorvida por superfícies topográficas com inclinações naturais e/ou forçadas, tal como para aplicações em estudos hidrológicos, agrônômicos e em projetos de conversão da energia solar. Por conseguinte, essas demandas corroboram para a necessidade da avaliação de modelos simplificados de estimativas da radiação para planos inclinados (Kamali et al. 2006; Li et al. 2008; El-Sebaei et al. 2010; Li et al. 2011; Muzathik et al. 2011; Viana et al. 2011).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as correlações existentes entre a radiação global e a razão de insolação, em diferentes agrupamentos de dados, para a horizontal e superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face para o Norte, em Botucatu-SP.

Material e Métodos

As medidas foram realizadas 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. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é do tipo Cwa, caracterizado como temperado úmido, com inverno seco e verão quente (Cepagri, 2011).

As leituras foram feitas a cada segundo e as médias armazenadas em intervalos de 5 minutos. Utilizou-se um sistema de aquisição de dados Microllogger Campbell Scientific, Inc., modelo CR23X, operando na frequência de 1Hz; na transferência dos dados foi empregado um módulo de memória SM192, também da Campbell, com interface SC532 para microcomputador operado pelo software PC 208W. Os valores da radiação global (I_G) foram obtidos com piranômetros Eppley-PSP com fator de calibração de 7,45 $\mu V W^{-1}m^{-2}$ e linearidade de $\pm 0,5 \%$ (0 a 2800 $W m^{-2}$) e por piranômetros CM3 da Kipp & Zonnen, calibrados a cada dois anos (WMO, 2008).

Obteve-se a radiação global inclinada com o emprego de plataformas com a face voltada para o Norte, dispostas nas seguintes inclinações: 12,85° (latitude local + 10°), 22,85° (latitude local) e 32,85° (latitude local - 10°); apesar disto, as medidas ocorreram em diferentes períodos: entre 09/2001 e 02/2003, 04/1998 e 08/2001, 03/2004 e 12/2007, respectivamente, e concomitantes com a medida no plano horizontal. Os valores da radiação solar global diária horizontal (H_{GH}) e inclinada (H_{GP}) foram obtidos através da integração das respectivas curvas de radiação, entre o nascer ao pôr do sol; enfim, as correlações foram avaliadas com 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.

$$\frac{H_{GH}^d}{H_{0H}^d} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

$$\frac{H_{G\beta}^d}{H_{0\beta}^d} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

em que: H_{GH}^d é a radiação global horizontal; $H_{G\beta}^d$ é a radiação global inclinada; H_{0H}^d é a radiação no topo da atmosfera para a horizontal; $H_{0\beta}^d$ é a radiação no topo da atmosfera para as superfícies inclinadas; β é o ângulo de inclinação (graus); “n” e “N” são o brilho solar e o fotoperíodo (horas); “a” e “b” são coeficientes ajustados; O subscrito “d” indica a partição diária. As radiações foram expressas em MJ m⁻² dia⁻¹. O brilho solar (n) foi medido por um heliógrafo Campbell Stokes, sendo a radiação no topo da atmosfera (H_0) para a horizontal e inclinações (Iqbal, 1983).

$$H_{0H}^d = \left(\frac{24}{\pi} \right) H_{CS} E_0 \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s) \right] \quad (3)$$

$$H_{0\beta}^d = \left(\frac{24}{\pi} \right) H_{CS} E_0 \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega'_s (\sin \delta \sin (\phi \pm \beta)) + (\cos \delta \cos (\phi \pm \beta) \sin \omega'_s) \right] \quad (4)$$

em que: H_{SC} é a constante solar diária (4921 KJ m⁻² h⁻¹); ϕ é a latitude local; δ é a declinação solar diária; E_0 é o fator diário de correção da excentricidade da órbita terrestre, dependente da época do ano ($E_0 = 1 + 0,033 \cos ((360/365)*DJ)$); ω_s e ω'_s são os ângulos horários diários para a horizontal e para as superfícies inclinadas, respectivamente, obtidos segundo Iqbal (1983).

Empregou-se a curva média para diminuição dos espalhamentos dos dados, caso em que os 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 (δK_T^d) para as quatro superfícies, conforme as propostas de Escobedo et al. (2007) e Escobedo et al. (2009). Na avaliação do desempenho das equações de estimativas diárias nas superfícies inclinadas quanto nas horizontais, foram empregados os indicadores estatísticos MBE (erro absoluto médio), RMSE (raiz quadrada do erro quadrático médio) e o índice de ajustamento (d) de Willmott (1981), dados por:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (7)$$

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 $O_i - O_i$.

O indicativo MBE representa o desvio das médias e provê informações quanto à performance do modelo a longo prazo, sendo que valores negativos indicam subestimativa do modelo testado e vice-versa e, quanto menor o valor absoluto de MBE melhor é a performance do modelo testado (Stone, 1993). O RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo com a desvantagem de que alguns erros de grande proporção na soma, podem causar acréscimos significativos no seu valor e não diferenciam superestimativas e subestimativas, contexto em que, quanto menores os valores obtidos para RMSE, melhor a performance dos modelos; já o índice de ajustamento “d” varia entre 0,0 e 1,0 e representa o quanto os valores estimados se ajustam aos valores medidos (Willmott, 1981).

A utilização dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e o índice de ajustamento “d”, em conjunto, podem ser considerados uma boa alternativa para validação de modelos estatísticos por permitem análise simultânea do desvio da média identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo, em relação às medidas.

Resultados

As correlações entre o índice de transmissividade atmosférica da radiação global e a razão de insolação, são lineares independentemente do ângulo de inclinação, com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,93, permitindo boas estimativas em agrupamentos anuais de dados (Figura 1). Dornelas et al. (2006) e Carvalho et al. (2011) encontraram, analisando a distribuição da mesma correlação apenas para superfícies horizontais, valores de R^2 acima de 0,81 e 0,82, em diferentes agrupamentos de dados, para Brasília (DF) e Seropédica (RJ), respectivamente. Liu et al. (2009) verificaram, para partições diárias em 31 cidades chinesas, em agrupamentos anuais, valores de R^2 variando entre 0,61 e 0,89.

Os coeficientes lineares (a) apresentaram os maiores valores no plano horizontal e com tendência crescente com o aumento da intensidade de inclinação, sinalizando que para um dia completamente nublado a transmissividade mínima da atmosfera para as superfícies estudadas se situa entre 22,84 e 25,16%; já para dias com céu completamente aberto (quando a razão de insolação tende a 1), com exceção da horizontal, observou-se uma inversão com decréscimo da transmissividade atmosférica com o aumento da intensidade de inclinação (75,78 e 68,53% para 12,85° e 32,85°, respectivamente).

Em agrupamentos de cinco anos de dados de radiação global, Escobedo et al., (2007) verificaram valores de 0,2635 e 0,4736, para os coeficientes linear e angular, respectivamente.

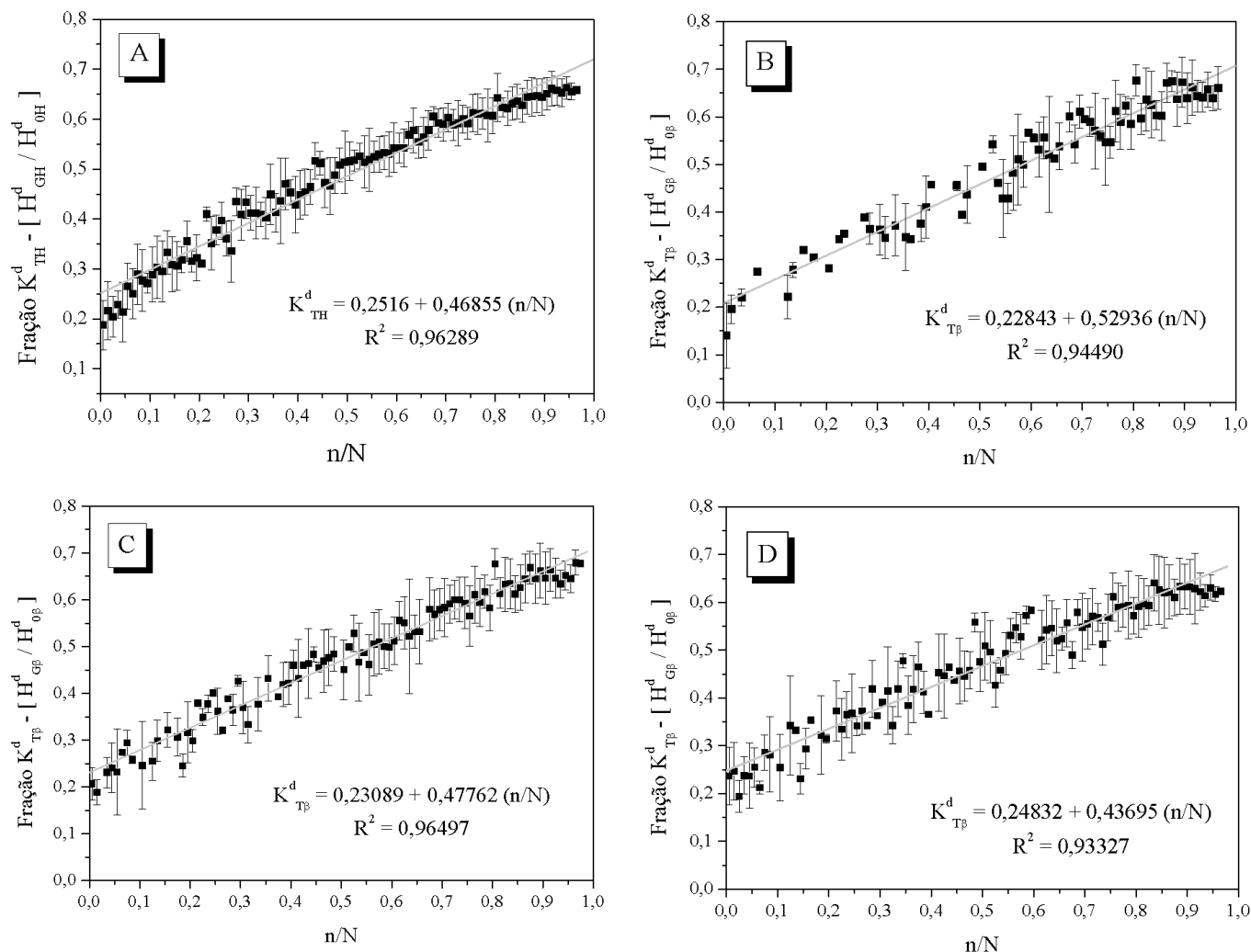


Figura 1. Correlações entre o índice de claridade (K_d) e a razão de insolação (n/N), em agrupamentos de dados anuais para superfícies horizontal (A), inclinadas com a face para o Norte a 12,85° (B), 22,85° (C) e 32,85° (D), em Botucatu, SP

Martínez-Lozano et al. (1984) apresentaram os valores desses coeficientes encontrados em 120 trabalhos científicos de diversas regiões da Terra e constataram que condições geográficas e climáticas podem modificar os valores para agrupamentos anuais, sazonais e mensais, com uma faixa de variação entre 0,14 e 0,35 para “a” e de 0,35 a 0,79 para “b”, corroborando com os valores encontrados. Esta grande faixa de variação decorre da dependência da latitude, altitude, época do ano, mudanças no tipo e espessura de nuvens e concentração de poluentes (Almorox et al., 2005; Rensheng et al., 2006; Robaa, 2008).

As equações encontradas para correlações em agrupamentos sazonais (Tabela 1), apresentaram coeficientes de determinação no verão e no outono inferiores aos agrupamentos anuais para as três inclinações estudadas, em decorrência da não aplicação da curva média nessas correlações, o que possibilitou uma dispersão maior dos dados em relação à equação ajustada. As transmissividades mínimas possuem uma variação sazonal específica com maiores percentuais no verão e na primavera, corroborando com os resultados encontrados por Almorox et al. (2005) para superfícies horizontais, em Toledo (Espanha). No verão, o menor valor do coeficiente “a” foi de 0,24152 para 22,85° e o máximo de 0,25364 para 12,85° e na primavera foram

Tabela 1. Coeficientes sazonais da regressão linear [$H_G/H_0 = a + b (n/N)$] e coeficientes de determinação (R^2) para estimativas em superfícies horizontais e inclinadas

Estação	Coefficiente linear (a)	Coefficiente angular (b)	R^2	Transmissividade máxima (%)
Horizontal				
Verão	0,24883	0,49394	0,95244	74,28
Outono	0,23598	0,47442	0,94084	71,04
Inverno	0,22872	0,47350	0,94189	70,22
Primavera	0,25423	0,49113	0,96226	74,54
12,85°				
Verão	0,25364	0,50750	0,88787	76,11
Outono	0,23570	0,49317	0,86445	72,89
Inverno	0,19901	0,54483	0,93144	74,38
Primavera	0,22672	0,58302	0,94624	80,97
22,85°				
Verão	0,24152	0,51575	0,94648	75,73
Outono	0,19617	0,48731	0,89834	68,35
Inverno	0,18679	0,48496	0,92641	67,18
Primavera	0,24266	0,51338	0,94142	75,60
32,85°				
Verão	0,24350	0,49311	0,88142	73,66
Outono	0,20431	0,44350	0,91225	64,78
Inverno	0,18663	0,46278	0,93032	64,94
Primavera	0,21099	0,48829	0,91009	69,93

de 0,210 e 0,243 para 32,85° e 22,85°. Rensheng et al. (2006) verificaram para 86 localidades chinesas com avaliações em

superfícies horizontais, variações dos coeficientes “a” e “b” de 0,12 a 0,26 e de 0,46 a 0,67, respectivamente.

Para 22,85° e 32,85°, as máximas transmissividades também ocorreram no verão e na primavera, com máximos de 75,73%; 75,56%, 73,66% e 69,84%, respectivamente. Os valores encontrados são, principalmente para a horizontal, inferiores aos das proposições da FAO, que indica 0,25 e 0,50 para os coeficientes “a” e “b” (Allen et al., 1998) e aos valores mensais encontrados por Almorox et al. (2005) na Espanha de que em superfícies horizontais os valores máximos e mínimos foram de 0,329 (julho) 0,259 (outubro). Em Londrina – PR (24°17' S; 53°50'W), Dallacort et al. (2004) verificaram valores da razão de insolação variando entre 0,13 e 0,97, com maiores níveis no inverno e (K_T^d) para a horizontal no intervalo de 0,32 a 0,55, enquanto Dornelas et al. (2006) verificaram, na região de Brasília – DF, variações de 0,241 (outubro) a 0,345 (julho) e de 0,430 (janeiro) a 0,515 (setembro) para os valores dos coeficientes “a” e “b”, respectivamente.

Equações desenvolvidas com agrupamentos menores de dados possibilitam analisar maiores detalhes da sazonalidade regional evidenciando tendência de diminuição dos coeficientes lineares e da transmissividade máxima nos meses entre os equinócios, com valores mínimos em julho e agosto (Tabela 2). Neste período existem menores quantidades de vapor d'água na atmosfera local (estação seca), visto que Botucatu se enquadra como cidade com 57,65% dos dias com predominância de céu parcialmente aberto a aberto, cuja transmissividade de radiação global da atmosfera é superior a 57% (Escobedo et al., 2009; Teramoto & Escobedo, 2012). Isto implica no aumento da contribuição da componente direta no total de radiação incidente e na diminuição da radiação difusa e, conseqüentemente, na diminuição dos coeficientes lineares

(a). Os menores coeficientes de determinação (R^2) observados nos meses de junho para todas as superfícies decorrem da grande variação de cobertura céu, oriunda da entrada de frentes frias na região (Codato et al., 2008) e, nos meses de verão, do aumento das precipitações.

Analisando apenas os valores medidos, se observaram ganhos de radiação global nos planos inclinados de 13,85° e 38,24% entre maio e setembro para as inclinações de 22,85° e 32,85°, quando comparado com a horizontal (Figura 2). Este comportamento de ganhos e perdas da radiação global incidente no inverno e verão, respectivamente, e o aumento dos desvios médios mensais com o incremento do ângulo de inclinação, podem ser considerados normais, visto que a disponibilidade de energia no topo da atmosfera para os planos inclinados também apresenta este padrão de sazonalidade e inversa ao verificado para planos horizontais (Rensheng et al., 2006; Li & Lam, 2007; Li et al., 2008; El-Sebaili et al., 2010; Li et al., 2011; Muzathik et al., 2011; Viana et al., 2011).

Evidenciou-se, ainda, o efeito das variáveis climáticas, principalmente a nebulosidade (verão) pela diminuição dos totais de radiação incidente no início do ano, mesmo com declinação solar negativa, e a formação de menores ângulos zenitais para localidades no Hemisfério Sul.

Em todos os meses as equações mensais possibilitaram boas estimativas da radiação global enquanto nos equinócios (março e setembro), as equações anuais apresentaram desempenhos melhores do que as equações sazonais em função de traduzirem o comportamento médio anual (Figura 3). Em setembro (mês com medidas em todas as inclinações) foram obtidos valores de MBE de -0,17; -2,19; -0,67 e -1,08 MJ m⁻² d⁻¹ para os modelos sazonais e de 0,09; 0,60; 0,04 e 0,63 MJ m⁻² d⁻¹ para os modelos anuais, para a horizontal, 12,85°, 22,85° e

Tabela 2. Coeficientes mensais da regressão linear [$H_g/H_0 = a + b (n/N)$] e coeficientes de determinação (R^2) para estimativas em superfícies horizontais e inclinadas

Mês	Coeficiente linear (a)	Coeficiente angular (b)	R^2	TMax (%)*	Coeficiente linear (a)	Coeficiente angular (b)	R^2	TMax (%)
				Horizontal		12,85°		
Janeiro	0,24895	0,50363	0,91457	75,26	0,24195	0,51583	0,88247	75,78
Fevereiro	0,22639	0,52843	0,91445	75,48	0,23769	0,50929	0,82497	74,70
Março	0,25800	0,46822	0,91874	72,62	0,23519	0,49088	0,87058	72,61
Abril	0,24854	0,45518	0,92710	70,37	0,17521	0,54619	0,89524	72,14
Maio	0,23582	0,44701	0,92250	68,28	0,19328	0,51919	0,91656	71,25
Junho	0,25623	0,43224	0,83081	68,85	0,21853	0,48659	0,85320	70,51
Julho	0,20932	0,48094	0,93410	69,03	0,14869	0,5898	0,93509	73,85
Agosto	0,21136	0,47923	0,94099	69,06	0,1435	0,58749	0,95562	73,10
Setembro	0,24127	0,47736	0,93457	71,86	0,19455	0,57364	0,94469	76,82
Outubro	0,25719	0,48118	0,89808	73,84	0,23774	0,53588	0,84589	77,36
Novembro	0,24312	0,50500	0,94613	74,81	0,25446	0,53284	0,9385	78,73
Dezembro	0,25883	0,48264	0,90147	74,15	0,2718	0,51718	0,8767	78,90
				22,85°		32,85°		
Janeiro	0,24606	0,51689	0,96513	76,30	0,26227	0,48067	0,78096	74,29
Fevereiro	0,22791	0,53689	0,95582	76,48	0,2518	0,46236	0,83584	71,42
Março	0,24264	0,49108	0,90941	73,37	0,21946	0,47882	0,9126	69,83
Abril	0,17312	0,53376	0,92854	70,69	0,22878	0,43013	0,91082	65,89
Maio	0,15958	0,50535	0,91962	66,49	0,16573	0,47567	0,97301	64,14
Junho	0,22565	0,44541	0,78516	67,11	0,18471	0,4363	0,88827	62,10
Julho	0,16814	0,49133	0,95144	65,95	0,19838	0,43929	0,89537	63,77
Agosto	0,17797	0,49001	0,94801	66,80	0,18185	0,46777	0,90836	64,96
Setembro	0,19757	0,52527	0,93662	72,28	0,22264	0,46569	0,92635	68,83
Outubro	0,20875	0,55279	0,9512	76,15	0,25458	0,47501	0,8826	72,96
Novembro	0,23921	0,52715	0,93101	76,64	0,26954	0,49375	0,93329	76,33
Dezembro	0,26764	0,47465	0,8977	74,23	0,27859	0,48077	0,89526	75,94

*TMax: transmissividade máxima da radiação global

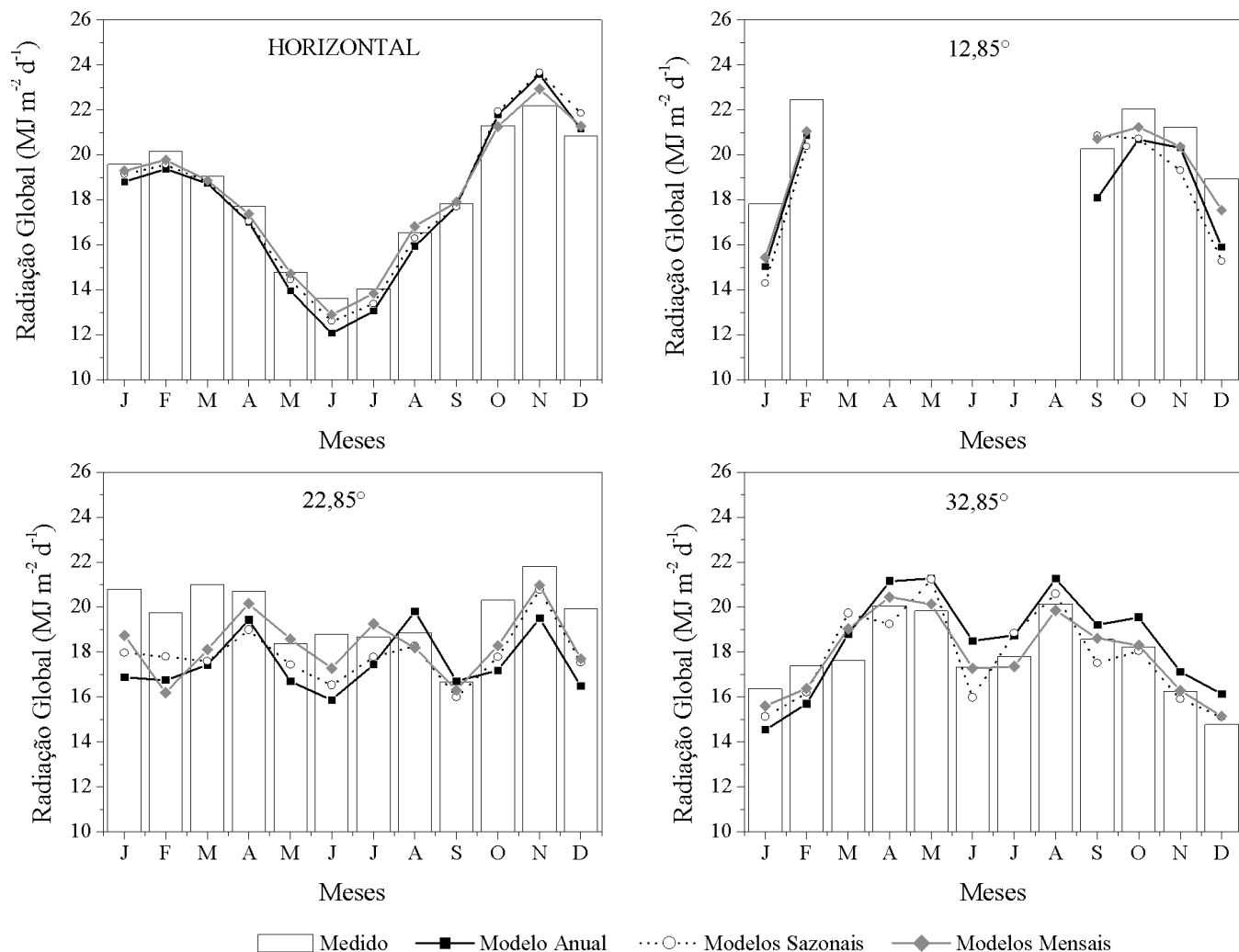


Figura 2. Médias mensais da radiação global medida e estimada por equações com diferentes agrupamentos de dados para a superfície horizontal e inclinadas com a face voltada para o Norte

32,85°, respectivamente; por conseguinte, neste mesmo mês os valores de RMSE (espalhamento) foram de 1,80; 4,70; 3,36 e 8,03 MJ m⁻² d⁻¹ para os modelos sazonais e de 1,73; 2,97; 0,27 e 7,83 MJ m⁻² d⁻¹ para os modelos anuais e para as mesmas superfícies supracitadas.

Para a horizontal ambos os modelos apresentaram tendência de subestimar a radiação global, com exceção dos meses de novembro e dezembro. À medida em que o ângulo de inclinação aumentou, ocorreu tendência dos modelos apresentarem superestimativas com máximos de 11,83% (2,09 MJ m²) obtidos em março, pelo modelo sazonal (verão/outono) em 32°85.

Os valores de MBE, RMSE e o ajustamento se encontram nas faixas normalmente apresentadas na literatura para esse tipo de correlação. Tiba & Fraideinrach (2004) avaliaram a homogeneidade de séries temporais da razão de insolação na estimativa da radiação global e verificaram distribuições normais com autocorrelações entre diferentes cidades; posteriormente, Tiba et al. (2005) evidenciaram, em 19 cidades das diferentes regiões brasileiras, que, na sua grande maioria este tipo de correlação propicia subestimativas da radiação global, com espalhamentos variando entre 4,0 e 14%. Liu et al. (2009) verificaram valores médios de RMSE

para correlações com (n/N) variando entre 1,39 e 3,08 MJ m⁻² para superfícies horizontais, corroborando com RMSE para a horizontal de 1,00 e 2,77 MJ m⁻² para julho e janeiro; já nos planos inclinados os percentuais de espalhamento aumentam com o incremento do ângulo de inclinação. Li et al. (2011) observaram apenas superestimativas empregando a razão de insolação, com espalhamentos inferiores a 1,67 MJ m⁻².

A razão de insolação empregada considerada o fotoperíodo obtido para superfícies horizontais e, notoriamente, para planos inclinados, visto que ocorre variação do ângulo zenital em intensidade igual à da inclinação e também se alteram o ângulo horário inclinado (ω'_s) (que se torna dependente da declinação solar (δ), a latitude (φ) e da inclinação da superfície (β)). Neste sentido poderia ocorrer, principalmente no inverno para o Hemisfério Sul (momento em que $\delta > 0$) um número de horas de fotoperíodo do inverno maior para superfícies inclinadas para o Norte, quando comparado com a superfície horizontal e entre no verão, o fotoperíodo diminuiria com o aumento dos ângulos de inclinação em decorrência dos menores valores do ângulo horário solar para as superfícies inclinadas na primavera e verão (Iqbal, 1983). Esse fato que justifica as oscilações e a diminuição do índice de ajustamento, em especial nos meses equinociais e de inverno, para as superfícies inclinadas.

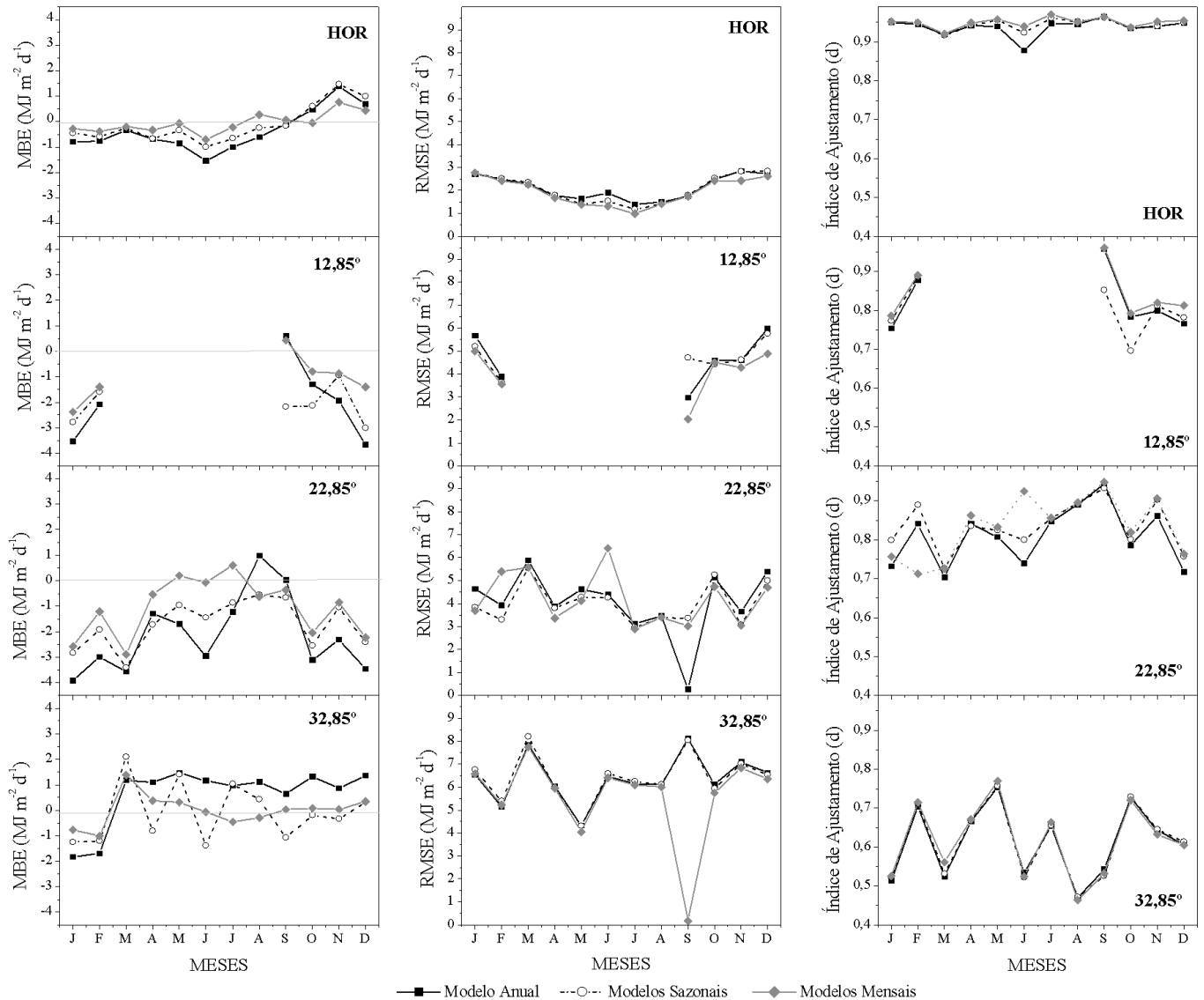


Figura 3. Índices estatísticos de desempenho das equações obtidas com diferentes agrupamentos de dados para estimativa da radiação global incidente na horizontal e nas inclinações com a face voltada para o Norte

Conclusões

As correlações entre a radiação solar global e a razão de insolação podem ser aplicadas em planos inclinados e permitem bons ajustes para estimativas de valores diários, com desempenho decrescente com o aumento do ângulo de inclinação e nos meses com maior variação de nebulosidade.

Para superfícies horizontais podem ser indicados os valores de “a” e “b” obtidos em agrupamentos sazonais e mensais enquanto para os planos inclinados os coeficientes mensais possibilitam melhores resultados.

Literatura Citada

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

Almorox, J.; Benito, M.; Hontoria, C. Estimation of monthly Angström-PreScott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, v.30, n.6, p.931-936, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2004.08.002>>.

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>>.

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.

Campelo Junior, J. H. Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no Sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.6, n.2, p.193-199, 1998. <http://www.sbagro.org.br/revistas/volumes_completos_do_1%C2%BA_ao_7%C2%BA_volume.pdf>. 30 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>>.
- Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas a Agricultura - Cepagri. 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.; Pai, A. D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil, *Theoretical and Applied Climatology*, v.93, n.1-2, p.57-73, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-007-0326-0>>.
- Dallacort, R.; Freitas, P. S. L.; Gonçalves, A. C. A.; Rezende, R.; Bertonha, A.; Silva, F. F.; Trintinalha, M. A. Determinação dos coeficientes da equação de Angström para a região de Palotina, estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.26, n.3, p.329-336, 2004. <<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v26i3.1831>>.
- Dantas, A. A. A.; Carvalho, L. G.; Ferreira, E. Estimativa da radiação solar global para a Região de Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v.27, n.6, p.1260-1263, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542003000600008>>.
- Dornelas, 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.8, p.1213-1219, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2006000800001>>.
- 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>>.
- 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>>.
- 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_etal_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_etal_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.
- Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various Sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, v.86, n.2, p.299-309, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013>>.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Toronto: Academic Press, 1983. 390 p.
- 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>>.
- Li, D. H. W.; Lam, T. N. T. Determining the optimum tilt angle and orientation for solar energy collection based on measured solar radiance data. *International Journal of Photoenergy*, v.8, n.1, p.1-9, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1155/2007/85402>>.
- Li, D. H. W.; Lam, T. N. T.; Chu, V. W. C. Relationship between the total solar radiation on tilted surfaces and the sunshine hours in Hong Kong. *Solar Energy*, v.82, n.12, p.1220-1228, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.06.002>>.
- Li, H.; Ma, W.; Lian, Y.; Wang, X.; Zhao, L. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. *Renewable Energy*, v.36, n.11, p.3141-3145, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.019>>.
- Liu, X.; Mei, X.; Li, Y.; Zhang, Y.; Wang, O.; Rauns, J.; Porter, J.R. Calibration of the Angstrom-Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.149, n.3/4, p.697-710, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.027>>.
- Martínez-Lozano, J. A.; Casanovas, A. J.; Utrillas, M. P. Comparison of global UV (290 -385 nm) and global irradiation measured the warm season in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, v.14, n.1, p.93-102, 1994. <<http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370140108>>.
- Moradi, I. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy*, v.34, n.1, p.01-06, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.006>>.
- Muzathik, A. M.; Ibrahim, M. Z.; Samo, K. B.; Wan Nik, W. B. Estimation of global solar irradiation on horizontal and inclined surfaces based on the horizontal measurements. *Energy*, v.36, n.2, p.812-818, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.035>>.
- Prescott, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, v.64, n.1, p.114-118, 1940.
- Rensheng, C.; Shihua, L.; Ersi, K.; Jianping, Y.; Xibin, J. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. *Energy Conversion and Management*, v.47, n.7/8, p.865-878, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.015>>.
- Robaa, S. M. Evaluation of sunshine duration from cloud data in Egypt. *Energy*, v.33, n.5, p.785-795, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.12.001>>.
- 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://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2003000300004>>.
- Souza, A. P.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Dal Pai, A. Estimativa da radiação global incidente em superfícies inclinadas por modelos isotrópicos e índice de claridade. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, n.4, p.339-350, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000400001>>.
- Stone, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, v.51, n.4, p.289-291, 1993. <[http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90124-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(93)90124-7)>.

- Teramoto, E. T.; Escobedo, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.9, p.985-992, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000900009>>.
- 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>>.
- Tiba, C.; Fraideinrach, N. Analysis of monthly time series of solar radiation and sunshine hours in tropical climates. *Renewable Energy*, v. 29, n.7, p.1147-1160, 2004. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.016>>.
- Turco, J. E. P.; Rizzati, G. S. Avaliação de modelo matemático para estimar a radiação solar incidente sobre superfícies com diferentes exposições e inclinações. *Engenharia Agrícola*, v.26, n.2, p.257-267, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162006000100028>>.
- Valiati, M. I.; Ricieri, R. P. Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para região de Cascavel – PR. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.1, p.76-85, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162005000100009>>.
- 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>>.
- Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, n.2, p.184-194, 1981. <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/ritaynoue/aca-0433/2010/estatistica_modelos/Willmott_1981.pdf> 14 Nov. 2012.
- World Meteorological Organization - WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation. 7.ed. Geneva: WMO, 2008. 681p. <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf> 14 Nov. 2012.