

INSOLAÇÃO E RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE SANTA MARIA, RS: I -
ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE
A PARTIR DOS DADOS DE INSOLAÇÃO*

Hours of sunshine and solar radiation at region of Santa Maria, RS: I -
Estimate of incidente global solar radiation from hours of sunshine.

Valduíno Estefanel*, Flávio Miguel Schneider**,
Moacir Antonio Berlato***, Galileo Adeli Burio**** e
Arno Bernardo Heldwein**

RESUMO

Foram testados diversos modelos matemáticos para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global incidente (ly/dia) em função da insolação. Utilizaram-se os dados diários de densidade de fluxo de radiação solar global incidente e de insolação, registrados nas estações meteorológicas das estações experimentais de Silvicultura da Boca do Monte (Santa Maria), Fitotécnica de Júlio de Castilhos e de Forragicultura de São Gabriel, da Secretaria da Agricultura e Abastecimento. Concluiu-se que, para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global incidente para um determinado local da região de Santa Maria, deve-se usar o modelo de Angstrom modificado por PRESCOTT (15) e por PENMAN (14) com equações para cada mês. Nas estimativas regionais aconselha-se o uso do modelo proposto por BENNETT (4) também com equações para cada mês. Verificou-se ainda que a precisão das estimativas é considerada satisfatória quando realizada para períodos de, no mínimo, cinco dias.

UNITERMOS: Radiação solar, Insolação, Estimativa, Modelos de Regressão.

SUMMARY

Mathematical models were tested to estimate incident global solar radiation as a function of hours of sunshine. Were used daily data of incident global solar radiation and hours of sunshine registered on meteorological stations at Experimental Stations of Secretary of Agricultural, located at Júlio de Castilhos, Santa Maria and São Gabriel, RS. The results show that to estimate the incident global solar radiation, for specific place of Santa Maria region, must be used the Angstrom model modified by PRESCOTT (15) and by PENMANN (14) with equations for each month. On regional estimation can be used the BENNETT (4) model also with equations for each month. The precision of the estimates are satisfactory when they are calculated for periods, at least, five days.

* Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e da FAPERGS.

** Professor Adjunto do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria e bolsista do CNPq.

*** Engenheiro Agrônomo, Pesquisador do IPAGRO, Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e bolsista do CNPq.

**** Professor Titular do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria e bolsista do CNPq.

KEY WORDS: Solar Radiation, Hours of Sunshine, Estimation, Regression Models.

INTRODUÇÃO

O sol é a fonte primordial, praticamente inesgotável e não poluente de energia que sustenta a vida na Terra. Sua importância cresce à medida que se esgotam as reservas energéticas tradicionais. A medição direta da densidade do fluxo de radiação global exige aparelhos de custo elevado além de pessoal especializado para sua manutenção e para manipulação de seus gráficos. Em vista disso o número de estações meteorológicas com esses aparelhos é relativamente pequeno e sua instalação relativamente recente.

Por outro lado, estudos de evapotranspiração, do potencial de crescimento e desenvolvimento das plantas, de modelos agrometeorológicos de previsão da produção vegetal, assim como o planejamento de instalações para o aproveitamento da energia solar exigem o conhecimento da disponibilidade dessa energia. Isto torna obrigatório e freqüente o uso de modelos para estimar a densidade do fluxo de radiação solar global incidente a partir de dados de insolação, os quais são obtidos com aparelho mais simples e barato e por isso existentes num maior número de estações meteorológicas e com séries mais longas.

Uma das primeiras proposições de estimativa de radiação solar global baseada na insolação foi sugerida por ANGSTROM (3) e é a seguinte:

$$K_{\downarrow} = K_{A\downarrow} (a' + (1-a')n/N) \dots \dots \dots (1)$$

onde:

K_{\downarrow} = Densidade de fluxo de radiação solar global recebida em uma superfície horizontal ao nível do solo, num dia qualquer;

$K_{A\downarrow}$ = Densidade do fluxo de radiação global recebida em uma superfície horizontal ao nível do solo em um dia perfeitamente e completamente limpo;

n = Insolação (h/dia);

N = Duração do período diurno (h/dia); e

a' = Proporção média de radiação solar global recebida em um dia completamente coberto por nuvens.

O emprego desta equação apresenta algumas dificuldades na aplicação, pois o número de dias isentos de nuvens em que se pode efetuar as determinações de $K_{A\downarrow}$ é muito pequeno e a ocorrência desses dias tende a se concentrar em determinados meses do ano. Além disso, os valores de $K_{A\downarrow}$ são fortemente afetados por variações do teor de umidade do conteúdo de poeira na atmosfera, assim como da massa de ar atravessada.

Para contornar o problema, PRESCOTT (15) e PENMAN (14) modificaram a fórmula de Angstrom substituindo o valor $K_{A\downarrow}$ pelo valor de Angot ($K_{o\downarrow}$), resultando:

$$K_{\downarrow} = K_{0\downarrow} (b_0 + b_1 (n/N)) \dots\dots\dots (2)$$

onde:

$K_{0\downarrow}$ = Densidade diária de fluxo de radiação global recebida no topo da atmosfera. (valor Angot);

b_0, b_1 = Parâmetros estimados através da regressão linear.

BENNETT (4) adaptou o modelo para estudos regionais acrescentando a altitude do local (h):

$$K_{\downarrow} = K_{0\downarrow} (b_0 + b_1 n/N + b_2 h) \dots\dots\dots (3)$$

Os coeficientes b_0 e b_1 da equação (2) representam o valor de $K_{\downarrow} / K_{0\downarrow}$ quando $n/N=0$, e a taxa de variação de $K_{\downarrow} / K_{0\downarrow}$ em relação a n/N , respectivamente. O valor desses parâmetros depende de condições típicas de nebulosidade e do grau de turbidez atmosférica (BLACK et alii, 6; CLOVER e CULLOGH, 8; FRÈRE et al, 9; RIEWELT, 16). Desta forma seus valores variam de um lugar para outro e, num mesmo local, segundo a época do ano. Isto tem conduzido muitos pesquisadores a efetuarem calibrações para essa fórmula. Martinez-Lozano et al. (1984) citado por MORAES & ALMEIDA (11) revisaram cerca de 120 trabalhos analisando os coeficientes da equação de Angstrom obtidos numa ampla gama de variação das condições geográficas de nebulosidade e temporal. MORAES & ALMEIDA, (11) testaram o método de BENNETT (4) para as condições de São José dos Campos-SP, concluindo que este é o método mais adequado para a estimativa da condição solar global diária e que é possível melhorar a estimativa quando os coeficientes forem corridos a nível horário.

Em nenhum dos estudos existentes sobre a radiação solar que incluem a região de Santa Maria, os valores dos coeficiente b_0 e b_1 da equação (2) foram calculados a partir de valores de radiação solar global registrados no local. BERLATO (5) utilizou coeficientes ($b_0=0,23$ e $b_1=0,46$) válidos para todo o Estado. LOPES et al. (10) usaram coeficientes obtidos com observações feitas em Pelotas ($b_0=0,20$ e $b_1=0,49$); MOTA et al. (13) calcularam os coeficientes através da relação gráfica entre b_0 e b_1 e a média anual n/N , proposta por FRÈRE et al. (9).

A obtenção destes coeficientes, com dados locais, possibilitará o preenchimento de falhas existentes na série de valores de radiação solar global medidos, bem como o aproveitamento dos dados de insolação para estudos futuros de disponibilidade de energia solar na Região de Santa Maria, RS. Por isto, este trabalho teve por objetivo determinar equações de estimativa da densidade de fluxo da radiação solar global incidente a partir da insolação para alguns locais da região de Santa Maria, RS.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados os dados de radiação solar global e de insolação diários de quatro estações meteorológicas cujas coordenadas geográficas, período de observação e entidades a que pertencem constam da Tabela 1.

TABELA 1. Coordenadas geográficas, período de observação e entidades a que pertencem as estações meteorológicas utilizadas.

Estação	Coordenadas geográficas			Período de observação	Entidade
	Lat.(S)	Long (WG)	Alt.(m)		
Est. Exp. Fito-técnica (J. de Castilhos)	29°13'	53°48'	514	1956-1985	SAA*
Est. Exp. Silvicultura (Boca do Monte)	29°41'	53°48'	153	1964-1985	SAA
Dpto de Fito-tecnia (Campus da UFSM)	29°43'	53°42'	96	1968-1986	8ª DISME (MA)/ UFSM**
Est. Exp. Forragicultura (São Gabriel)	30°20'	54°19'	109	1965-1986	SAA

* SAA - Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado do Rio Grande do Sul.

** 8ª DISME - 8ª Distrito de Meteorologia (Ministério da Agricultura).

Os dados de radiação solar global foram obtidos em actinógrafos bimetálicos, modelo Robitzch (Fuess) e a insolação diária foi coletada com heliógrafos tipo Campbell-Stokes (Fuess). Para as estações de Júlio de Castilhos, após setembro de 1975, e Santa Maria (Campus da UFSM) até outubro de 1981, os actinógrafos eram de rotação diária. O restante dos registros foram feitos em actinógrafos de rotação semanal.

Os dados das estações pertencentes à Secretaria de Agricultura e Abastecimento foram copiados de planilhas existentes, ou recebidos em fita magnética (1974-1985). Para essas estações, os totais diários de radiação solar global foram obtidos pelo método de integração de Simpson com intervalo de duas em duas horas a partir das seis até as dezoito horas. Os totais diários de radiação solar global de Santa Maria (Campus da UFSM) foram obtidos copiando o gráfico para papel branco, recortando-o e fazendo a integração com um integrador eletrônico de áreas (Modelo Licor-3000). Os dados de insolação de todas as estações foram obtidos com precisão de décimos de hora.

No conjunto das quatro estações foram digitados 26.275 dias com radiação solar global e insolação. Para cada estação foi estudada a homogeneidade dos dados usando o método das duplas massas (OMETTO, 18).

Para cada estação, foram inicialmente calculadas equações mensais para

estimar a radiação solar global em função da insolação (equação 2) e listados, para revisão da radiação solar global, os dias, em número de 1955, em que a radiação solar global estimada tivesse se afastado da observada em mais de 100ly/dia. Para os 555 dias que, depois de recalculada a radiação solar global, ainda permanecia um afastamento daquela grandeza foi revisada a insolação. Em 78 dias, depois de revisada a radiação solar global e a insolação, a diferença entre o valor observado e estimado de radiação solar global foi maior que 200ly/dia. Para esses dias foi feito um confronto entre os gráficos do actinógrafo e do heliógrafo, sendo eliminados 23 dias por não haver concordância entre eles.

Além disso foram eliminados 197 dias por problemas de gráficos, como falta, incompletos ou ilegíveis. Foram também identificados e corrigidos dados duvidosos, como registros de insolação maior do que a duração astronômica do dia para a época do ano correspondente.

Com os dados assim consistidos, em número de 18.733 dias, foi estimada a radiação solar global a partir da insolação com vários modelos matemáticos nas seguintes situações:

- a) Modelo de Angstrom modificado por PRESCOTT (15) e PENMAN (14), (equação 2), calculando-se uma equação geral para todos os locais;
- b) Modelo (2), calculando-se uma equação anual para cada local;
- c) Modelo (2), calculando-se uma equação mensal válida para todos os locais;
- d) Modelo (2), calculando-se uma equação anual para cada local e mês;
- e) Modelo (2), com inclusão da declinação solar (D) em graus e calculando-se uma equação para cada local;

$$K_{+} = K_{0+} (b_0 + b_1 n/N + b_2 D) \dots \dots \dots (4)$$

- f) Equação linear de estimativa da radiação solar global em função da insolação (horas), calculando-se uma equação para cada mês e local;

$$K_{+} = b_0 + b_1 n + e \dots \dots \dots (5)$$

- g) Modelo proposto por BENNETT (4), (Modelo 3), calculando-se uma equação geral;
- h) Modelo (3), calculando-se uma equação para cada mês;
- i) Modelo (3), com inclusão da declinação solar (D) em graus calculando-se uma equação geral, válida para todos os meses e locais;

$$K_{+} = K_{0+} (b_0 + b_1 n/N + b_2 h + b_3 D) \dots \dots \dots (6)$$

- j) Equação linear de estimativa da radiação solar global em função da insolação (horas), altitude (h) em m, declinação solar (D), em graus e latitude (θ), em graus;

$$K_{+} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + e \dots \dots \dots (7)$$

A radiação solar diária incidente numa superfície horizontal paralela à superfície do solo no topo da atmosfera (K_{0+}) e a duração astronômica do dia

(N) foram calculados pelas fórmulas clássicas abaixo (OCCHIPINTI, 17).

$$K_o \pm = (1440/\pi) J_o (R_m/R)^2 (H \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \theta \pm \operatorname{cos} \delta \operatorname{cos} \theta \operatorname{sen} H) \dots (8)$$

e

$$N = 2H/15 \dots \dots \dots (9)$$

onde:

$$J_o = \text{constante solar (2,0 ly/min);}$$

R_m e R = distâncias terra-sol, média e instantânea, respectivamente, calculada pela expressão abaixo (ALVES, 1):

$$(R_m/R)^2 = 1,000110 + 0,034221 \operatorname{cos} \alpha + 0,001280 \operatorname{sen} \alpha + 0,000179 \operatorname{cos} 2\alpha + 0,000077 \operatorname{sen} 2\alpha \dots \dots (10)$$

onde:

$\alpha = (2\pi m)/n$, sendo "m" o número de ordem do dia do ano e "n" o número de dias do ano (365 ou 366);

θ = latitude do local;

δ = ângulo de declinação do sol;

H = ângulo horário ao nascer do sol ou por-do-sol, calculado pela expressão:

$$H = \operatorname{arc} \operatorname{cos} - (\operatorname{tg} \theta \times \operatorname{tg} \delta) \dots \dots \dots (11)$$

Obtidas as equações, foram estimados os coeficientes de determinação entre os valores de radiação solar global observados e aqueles estimados. Posteriormente, foram calculadas as médias de quinqüídios, de decêndios e mensais para as duas variáveis e calculados os coeficientes de determinação com essas médias. Também foram calculados os valores absolutos dos desvios entre os dados de radiação solar global observados e aqueles estimados ou seja, $D = Y - \hat{Y}$ que, neste trabalho, serão chamados simplesmente "desvios". Para esse cálculo foram usados os dados diários, médias de quinqüídios, de decêndios e mensais. Como quinqüídio considerou-se os dias 1 a 5, 6 a 10, ..., 26 até o fim do mês. Como decêndio considerou-se de 1 a 10, 11 a 20 e 21 até o fim do mês.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de homogeneidade mostrou que, para Júlio de Castilhos, podem ser visualizados dois períodos, cujo limite coincide com a troca do apare-

lho (Figura 1). Observando-se esta figura e os dados, verifica-se que os dados do período inicial até a troca do aparelho em 1975, são distintos e menores que os do período após a troca do aparelho. Por isso foram abandonados.

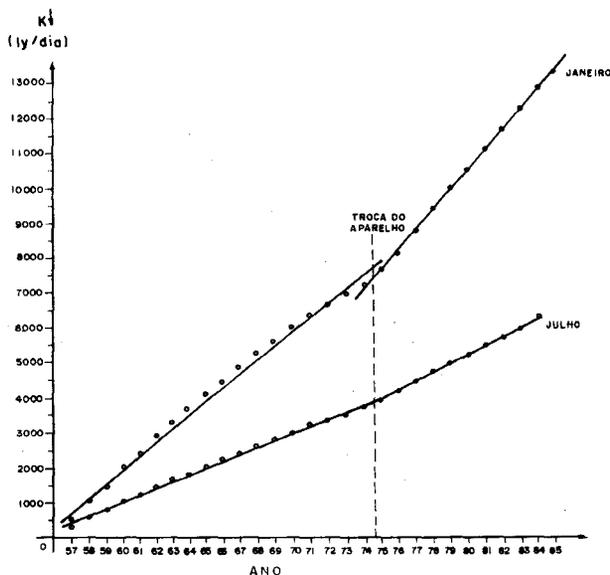


FIGURA 1 - Médias mensais acumuladas da densidade de fluxo da radiação solar global incidente (K_+) registradas na estação meteorológica de Júlio de Castilhos (RS).

Na estação meteorológica de Santa Maria, Campus da UFSM, a análise da homogeneidade dos dados mostrou também dois períodos distintos (Figura 2). O primeiro, desde a instalação do aparelho em 08/75 até 12/79, apresentou médias mensais de densidade de fluxo de radiação solar global maiores do que aquelas registradas na estação da Boca do Monte. Fato contrário aconteceu no segundo período (1980-86). Como as duas estações estão localizadas relativamente próximas (20 Km) e em ambiente geográfico semelhante, os registros obtidos na estação do Campus da Universidade foram abandonados.

Ao fazer um diagrama de dispersão entre a insolação diária (horas) e a densidade de fluxo da radiação solar global (ly/dia) e também entre as relações n/N e K_+/K_0+ verificou-se que os pontos ocupavam a área de uma elipse, indicando haver correlação entre as variáveis. Alguns dias, entretanto, apresentavam grande afastamento da nuvem de pontos. Esse afastamento acontecia quase sempre na parte inferior do diagrama de dispersão, indicando que nesses dias houve menor densidade de fluxo de radiação solar global que o esperado. Um exame comparativo entre actinograma e o heliograma correspondente mostrou que nem sempre esses dias continham erro. Muitas vezes, a insolação acontecia nas primeiras e/ou nas últimas horas do dia, horas de baixa densidade de fluxo de radiação solar global. Outras vezes, o valor do actinograma era mais baixo que o normal ou então tinha inúmeras flutuações, mas

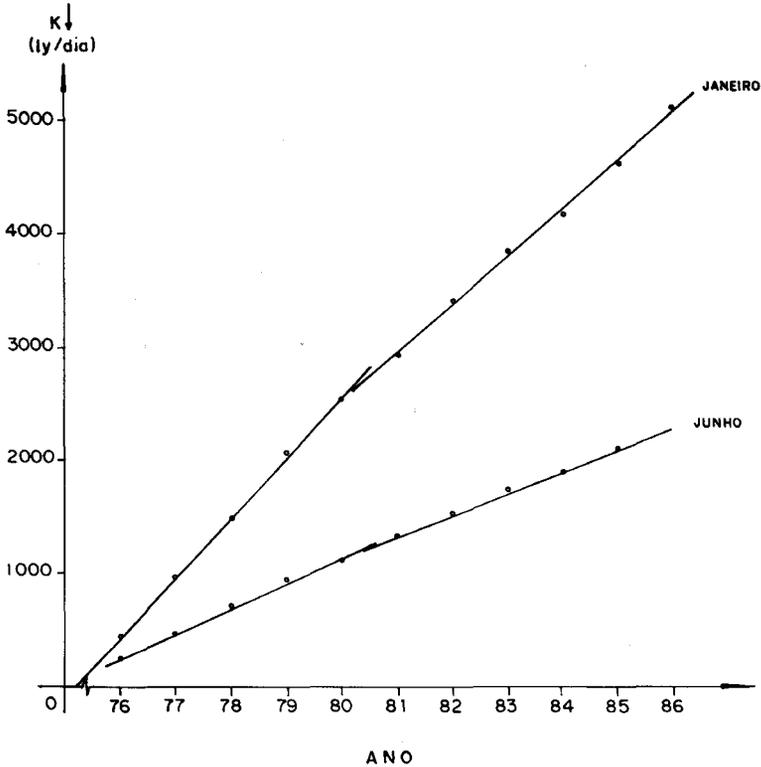


FIGURA 2 - Médias mensais acumuladas da densidade de fluxo da radiação solar global incidente ($K\downarrow$) registradas na estação meteorológica do Departamento de Fitotecnia (Campus da UFSM).

a fita do heliógrafo estava queimada de forma contínua. A Figura 3, mostra o diagrama de dispersão do mês de dezembro para Júlio de Castilhos, onde são assinalados três dias típicos. No dia 06/12/78 a insolação ocorreu somente nas horas finais do dia e apresentou um desvio de 223 ly/dia em relação ao valor estimado pela equação provisória. No dia 27/12/76, a insolação ocorreu somente nas primeiras e nas últimas horas do dia resultando num afastamento de 307ly/dia. Uma baixa densidade de fluxo de radiação solar global, mas suficiente para queimar a fita do heliógrafo durante todo o dia ocorreu em 15/12/79. Nesse dia, o afastamento foi de 243ly/dia.

Problemas desse tipo são inerentes aos elementos meteorológicos estudados. Entretanto, comparando os diagramas de dispersão encontrados com aqueles publicados por ALVES et al. (2) para Viçosa e por TARIFA (19) para Presidente Prudente (SP), conclui-se que na região de Santa Maria eles aparecem com maior intensidade.

CARDON & MALTEZ (7) tentaram contornar o problema sugerindo o uso da "insolação eficaz" na qual se atribui um peso diferente à insolação de acordo com a hora do dia em que ela ocorreu. Contudo não obtiveram o au-

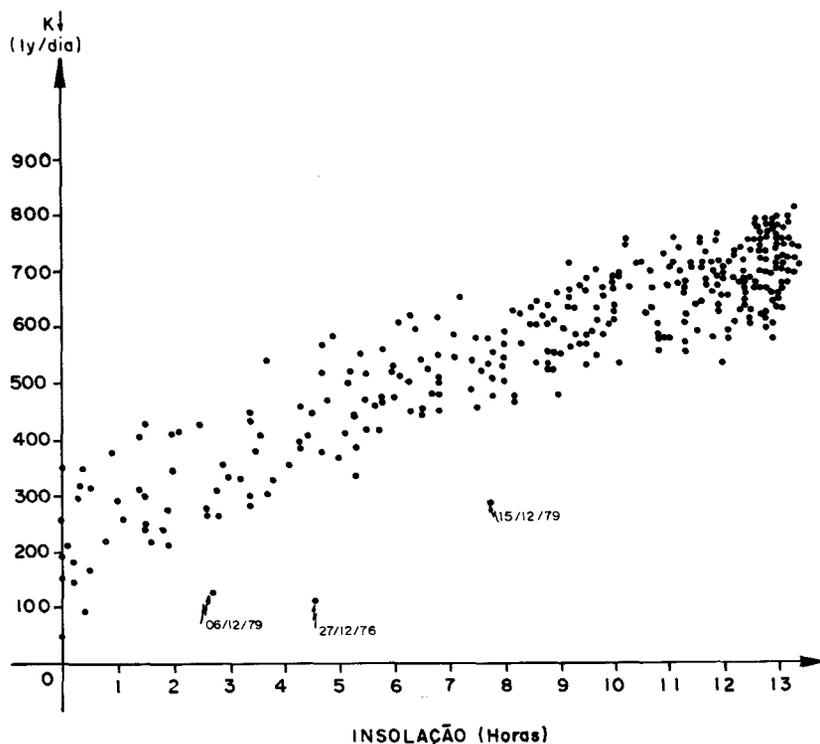


FIGURA 3 - Diagrama de dispersão relacionando a insolação e a densidade de fluxo da radiação solar global incidente (K_{\downarrow}) no mês de dezembro na estação meteorológica de Júlio de Castilhos no período 1976/86.

mento esperado no coeficiente de determinação, possivelmente devido às condições meteorológicas do local. Em Manaus, existe a tendência de sempre ocorrer precipitação na mesma hora do dia e isso faz com que, ao estimar os coeficientes, haja uma compensação. Talvez essa metodologia mostre resultados positivos na região de Santa Maria, onde existe maior aleatoriedade nas horas de insolação durante o dia.

A Tabela 2 mostra os coeficientes estimados com o modelo (2) para cada local e mês e para o modelo (5) com os respectivos coeficientes de determinação entre a densidade de fluxo de radiação solar global observada e aquela esperada. Verifica-se que os valores de b_0 do modelo (2) apresentam uma tendência a aumentar com o aumento da latitude. Já os valores de b_1 , que dependem principalmente da transmissividade da atmosfera, aumentam com o aumento da altitude e a diminuição da latitude, devido à variação da massa ótica associada a esses fatores geográficos.

Em cada local, o coeficiente b_1 foi mais elevado nos meses de inverno e mais baixo nos meses de verão. Esta tendência foi comprovada estatisticamente ajustando uma equação do 2º grau sendo "x" o número de ordem do

TABELA 2. Coeficientes da equação de Angstrom ($K_t = K_0 + (b_0 + b_1 n/N)$ (modelo 2) para as situações a e d, e da equação $K_t = b_0 + b_1 n$ (modelo 5, situação F) para estimar a radiação global em função da insolação (horas) e seus coeficientes de determinação.

Período	$K_t = K_0 + (b_0 + b_1 n/N)$			$K_t = b_0 + b_1 n$		
	b_0	b_1	R^2	b_0	b_1	R^2
Júlio de Castilhos						
Janeiro	0,228	0,4600	0,945	237,6	35,49	0,927
Fevereiro	0,225	0,4612	0,864	217,2	34,35	0,895
Março	0,200	0,5181	0,959	164,5	35,65	0,917
Abril	0,189	0,5156	0,912	126,5	30,53	0,901
Maió	0,171	0,5742	0,920	89,3	29,36	0,915
Junho	0,188	0,5643	0,927	87,5	25,98	0,922
Julho	0,170	0,5824	0,944	83,5	27,82	0,905
Agosto	0,170	0,5788	0,939	100,6	32,29	0,932
Setembro	0,169	0,5697	0,897	129,3	36,12	0,933
Outubro	0,200	0,5131	0,896	177,6	37,03	0,928
Novembro	0,201	0,4998	0,902	203,2	37,98	0,931
Dezembro	0,234	0,4701	0,800	248,8	36,24	0,906
Ano	0,191	0,5293	0,954			
Santa Maria (Estação Experimental da Boca do Monte)						
Janeiro	0,234	0,3670	0,909	245,8	28,17	0,894
Fevereiro	0,220	0,3937	0,916	212,1	29,29	0,892
Março	0,220	0,4113	0,896	180,2	28,23	0,895
Abril	0,209	0,4311	0,906	136,8	25,86	0,879
Maió	0,215	0,4435	0,886	111,3	22,56	0,865
Junho	0,225	0,4475	0,878	103,5	20,34	0,825
Julho	0,199	0,4656	0,936	96,4	22,05	0,834
Agosto	0,178	0,4897	0,914	105,2	26,92	0,889
Setembro	0,186	0,4793	0,916	139,5	30,39	0,899
Outubro	0,182	0,4673	0,942	163,3	33,39	0,916
Novembro	0,200	0,4187	0,915	203,5	31,63	0,916
Dezembro	0,235	0,3665	0,855	250,7	28,22	0,888
Ano	0,205	0,4338	0,938			
São Gabriel						
Janeiro	0,248	0,3471	0,913	260,0	26,67	0,898
Fevereiro	0,250	0,3453	0,915	240,1	25,62	0,883
Março	0,238	0,3848	0,897	194,4	26,26	0,885
Abril	0,249	0,3787	0,864	164,2	22,10	0,835
Maió	0,261	0,4025	0,805	134,0	20,20	0,842
Junho	0,239	0,4527	0,858	108,0	20,39	0,848
Julho	0,234	0,4603	0,891	106,9	21,55	0,862
Agosto	0,218	0,4999	0,894	127,9	24,61	0,876
Setembro	0,212	0,4420	0,903	159,1	27,66	0,887
Outubro	0,204	0,4452	0,939	182,8	31,70	0,917
Novembro	0,230	0,3894	0,897	233,6	29,40	0,894
Dezembro	0,256	0,3507	0,828	273,4	26,97	0,881
Ano	0,234	0,4032	0,935			

mês no ano e "y" os coeficientes. Isto indica que no inverno a transmissividade da atmosfera é maior que no verão, possivelmente devido à menor quantidade de poeira existente no ar e à freqüente entrada de massas de ar frias e secas. Essas massas são mais limpas que as massas tropicais e, por serem mais frias, têm menor turbulência resultando numa maior transmitância da atmosfera. Este resultado coincide com o de outros trabalhos realizados no sul do País (MOTA & BEIRSDORF, 12; MOTA et alii, 13).

Os coeficientes b_0 e b_1 do modelo (5) indicam as densidades de fluxo de radiação solar global diários esperados, respectivamente, em dias sem insolação e a cada hora de insolação. Verifica-se que ambos os coeficientes são menores nos meses de inverno. Para o coeficiente b_0 , isso acontece, porque, apesar de, proporcionalmente, os valores médios de densidade de fluxo de radiação difusa serem maiores no inverno, quantitativamente são menores do que no verão. O comportamento do coeficiente b_1 deve-se à maior inclinação com que os raios solares incidem na superfície, o que resulta numa menor densidade de fluxo de radiação solar global incidente em cada hora de insolação, durante os meses de inverno. Os coeficientes de determinação desses dois modelos são bastante próximos e torna-se difícil discernir qual o melhor deles, o que só pode ser feito examinando os desvios.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes dos demais modelos estudados e a Tabela 4 apresenta as médias, os desvios padrão e os valores máximos dos desvios além dos coeficientes de determinação entre os valores de densidade de fluxo de radiação solar global incidente observados e aqueles estimados. Examinando as estatísticas da Tabela 4, para dados diários, verifica-se que os coeficientes de determinação para as diversas situações são semelhantes, mas nenhum deles alcança o valor 0,90. A média dos desvios situa-se entre 44,0 e 47,6 L/dia, valores que podem ser considerados razoáveis para fins agrícolas. Entretanto, existe acentuada dispersão e os valores máximos são elevados. Cabe salientar que a distribuição dos desvios não é simétrica e os desvios mais elevados são menos freqüentes (Tabela 5). Os valores mais elevados são oriundos de dias atípicos como aqueles discutidos anteriormente (Figura 3). Examinando a Tabela 5, verifica-se que são poucos os desvios elevados sendo que em 93,2% dos dias são menores ou iguais a 100ly/dia.

Ao usar médias de quinqüídios houve uma diminuição nas médias, nos desvios padrão e nos valores máximos dos desvios e um aumento nos coeficientes de determinação que se situaram entre 0,928 e 0,946. O mesmo comportamento foi observado com médias de decêndios e médias mensais.

Para médias mensais de radiação solar global diária, as médias dos desvios situaram-se entre 15,9 e 21,2ly/dia, os valores máximos entre 74 e 107 ly/dia e os coeficientes de determinação entre 0,951 e 0,971. Os desvios padrão foram relativamente elevados e espelham o comportamento das médias devido a situações atípicas.

Também foram calculadas as equações com as médias de quinqüídios, de decêndios e mensais mas não se observou ganho de precisão em relação ao procedimento que foi apresentado acima, ou seja, cálculo das médias dos valores diários estimados com equações obtidas com dados diários. Além disso, o uso daquele procedimento tem o inconveniente de exigir um conjunto de equações para cada período estudado.

Examinando-se as estatísticas da Tabela 4 e a listagem dos desvios

TABELA 3. Coeficientes de alguns modelos usados para estimar a radiação solar global na região de Santa Maria, RS.

Situação *	Coeficientes				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
b Júlio de cast.	0,191	0,5293			
São Gabriel	0,234	0,4032			
Boca do Monte	0,205	0,4338			
c					
Jan	0,237	0,3814			
Fev	0,232	0,3903			
Mar	0,221	0,4283			
Abr	0,220	0,4312			
Mai	0,224	0,4567			
Jun	0,223	0,4770			
Jul	0,203	0,4890			
Ago	0,192	0,4931			
Set	0,192	0,4876			
Out	0,192	0,4725			
Nov	0,210	0,4283			
Dez	0,240	0,3888			
e	0,210	0,4498	0,000674		
g	0,195	0,4424	0,000089		
h					
Jan	0,211	0,3782	0,000136		
Fev	0,208	0,3860	0,000125		
Mar	0,198	0,4228	0,000124		
Abr	0,205	0,4302	0,000067		
Mai	0,217	0,4561	0,000034		
Jun	0,218	0,4757	0,000029		
Jul	0,194	0,4876	0,000046		
Ago	0,181	0,4920	0,000057		
Set	0,178	0,4847	0,000073		
Out	0,172	0,4702	0,000102		
Nov	0,187	0,4270	0,000109		
Dez	0,209	0,3837	0,000157		
i	0,192	0,4473	0,000089	0,000675	
j	-473,92	28,11	0,1265	-4,3781	-20,7539

- * b = Angstrom, modelo (2) (uma equação para cada local).
c = Angstrom, modelo (2) (uma equação para cada mês).
e = Angstrom com inclusão da declinação solar (graus), modelo (4).
g = Bennett, modelo (3) (uma equação geral).
h = Bennett, modelo (3) (uma equação para cada mês).
i = Bennett com inclusão da declinação solar (graus), modelo (6).
j = Equação linear estimando a radiação em função da insolação (horas), altitude (m), declinação solar (em graus) e latitude (graus).

TABELA 4. Médias, desvios padrão e valores máximos das diferenças absolutas entre a radiação global observada e aquelas estimadas, e os coeficientes de determinação R^2 entre a radiação global observada e aquela estimada para as estações de Boca do Monte, Júlio de Castilhos e São Gabriel.

Situa- ções	Período															
	Um dia (n=18733)*				5 dias (n=3804)				10 dias (n=1910)				Mês (n=644)			
	Média	s	Máx.	R^2	Média	s	Máx.	R^2	Média	s	Máx.	R^2	Média	s	Máx.	R^2
a**	47,6	37,5	388	0,877	29,4	23,2	230	0,928	25,0	19,7	143	0,940	21,2	17,2	98	0,951
b	44,6	36,2	323	0,888	26,1	21,2	222	0,942	21,5	17,4	138	0,956	17,2	14,4	93	0,968
c	45,8	37,1	322	0,880	27,7	22,7	242	0,931	23,4	19,4	148	0,943	19,4	16,8	107	0,953
d	43,0	35,4	312	0,893	24,8	19,8	231	0,946	20,3	15,8	140	0,959	15,9	12,9	87	0,970
e	44,0	36,1	313	0,888	25,4	20,6	229	0,942	20,7	16,5	140	0,956	16,2	13,4	90	0,968
f	44,0	35,4	313	0,890	25,8	20,6	229	0,941	21,5	16,8	144	0,954	15,8	12,5	74	0,971
g	45,9	37,0	332	0,882	27,2	21,8	227	0,938	22,5	17,9	140	0,952	18,3	15,0	92	0,964
h	44,0	36,3	334	0,888	25,4	20,6	240	0,942	20,9	16,5	145	0,956	16,6	13,5	86	0,968
i	45,3	37,0	320	0,882	26,4	23,0	234	0,938	21,8	17,2	142	0,952	17,4	16,9	88	0,964
j	45,9	37,8	332	0,882	27,3	21,7	250	0,935	22,5	17,3	137	0,950	17,8	13,9	82	0,964

* n = número de observações utilizadas.

- ** a = Angstrom, modelo (2) (uma equação geral).
 b = Angstrom, modelo (2) (uma equação para cada local).
 c = Angstrom, modelo (2) (uma equação para cada mês).
 d = Angstrom, modelo (2) (uma equação para cada local e mês).
 e = Angstrom com inclusão da declinação solar, modelo (4) (uma equação para cada local).
 f = Equação linear estimando a radiação em função da insolação, modelo (5) (uma equação para cada local e mês).
 g = Bennett, modelo (3) (uma equação geral).
 h = Bennett, modelo (3) (uma equação para cada mês).
 i = Bennett, com inclusão da declinação solar, modelo (6) (uma equação geral).
 j = Equação linear estimando a radiação em função da insolação, altitude, declinação solar e latitude (modelo 7).

TABELA 5. Distribuição do valor absoluto dos desvios ($|Y - \hat{Y}|$) calculados com dados diários usando as equações mensais do modelo (2), (situação d), apresentadas na Tabela 2.

Intervalo (ly/dia)	Frequências (dias)	Frequências acumuladas relativas (%)
0 - 50	12.300	65,66
50 - 100	5.163	93,22
100 - 150	1.012	98,62
150 - 200	188	99,62
200 - 250	54	99,91
250 - 300	11	99,97
300 - 350	5	100,00
Total	18.733	

individuais verifica-se que, para estimar dados locais (situações b, c, d, e e f) a situação "d" teve melhor desempenho geral. Aconselha-se, então, utilizar o modelo de Angstrom modificado por PRESCOTT (15) e por PENMAN (14), modelo (2), calculado mensalmente para cada local, cujos coeficientes estimados são apresentados na Tabela 2.

Para estimativas regionais de densidade de fluxo de radiação solar global incidente (situações a, g, h, i e j) observa-se que a situação h apresentou melhor desempenho. Aconselha-se então o uso do modelo proposto por BENNETT (4), equação (3), calculada mensalmente, cujos coeficientes estimados encontram-se na Tabela 3.

Supos-se que incluindo a declinação solar nas equações (2) e (3) essa variável absorvesse as diferenças mensais, permitindo o uso de uma equação anual, mas isso não aconteceu. O desempenho das equações com a declinação solar foi intermediário entre o uso da equação anual e de equações mensais.

A equação (7), estudada na situação j, apresentou bom desempenho para médias mensais, mas não foi muito eficiente para outros períodos estudados. Neste e nos outros modelos onde foi empregada a declinação solar, esta variável pode ser substituída pela duração astronômica do dia, obtendo-se o mesmo ajustamento.

A análise dos dados mostra que tanto o uso do modelo de Angstrom modificado por PRESCOTT (15) e PENMAN (14), para estimativas locais, como o modelo proposto por BENNETT (4), para estimativas regionais, quando utilizados para períodos de no mínimo cinco dias, possibilitam estimativas satisfatórias para estudos mesoclimáticos.

CONCLUSÕES

Considerando-se o período de observações e a metodologia usados, conclui-se que, na região de Santa Maria:

- 1 - Para estimar a radiação solar global local deve-se usar o modelo de Angstrom modificado por PRESCOTT (15) e por PENMAN (14) com equações para cada mês;
- 2 - para estimativas regionais aconselha-se o uso do modelo proposto por BENNETT (4) com equações para cada mês;
- 3 - a precisão das estimativas da densidade de fluxo da radiação solar global incidente é considerada satisfatória quando realizada para períodos de no mínimo cinco dias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Seção de Ecologia Agrícola do Instituto de Pesquisas Agrônomicas da Secretaria da Agricultura e Abastecimento que colocou à disposição os registros e gentilmente auxiliou na conferência dos dados, e ao Prof. Afrânio Almir Righes pela versão inglesa do resumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, R.A. Irradiância Solar Global em Superfícies de Diferentes Inclinações e Azimutes, para Viçosa, MG. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1981, 92p. (Tese de Mestrado).
2. ALVES, R.A.; VIANELLO, R.L.; SEDIYAMA, G.C. & COELHO, D.T. Estimativa da Radiação Solar Global Diária, a partir de Dados de Insolação, para Viçosa, Minas Gerais. *Experientiae*, v.27, n.10, p.210-222, 1981.
3. ANGSTROM, A. Solar and Terrestrial Radiation. *Journal of Royal Met. Soc.*, v.50, p.121-126, 1924.
4. BENNETT, I. Monthly Maps of Mean Daily Insolation for United States. *Solar Energy*, v.9, n.3, p.145-158, 1965.
5. BERLATO, M.A. Radiação Global no Estado do Rio Grande do Sul. *Agromonia Sulriograndense*, v.5, n.2, p.115-131, 1971.
6. BLACK, J.N.; BONYTHON, C.W. & PRESCOTT, J.A. Solar Radiation and the Duration of Sunshine. *Quarterly Journal Royal Meteorology Society*, v.86, p.231-235, 1954.
7. CARDON, D.A. & MALTEZ, M.G.L. Influência da Nebulosidade na Estimativa da Radiação Global de Belém. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA V, Belém, PA, 1987. *Coletânea de Trabalhos...*, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Belém, PA, 1987, p.202-210.
8. CLOVER, J. & Mc CULLOGH, J.S.G. The Empirical Relation Between Solar Radiation and Hours Sunshine. *Quarterly Journal Royal Meteorology Society*, v.84, p.172-175, 1958.
9. FRÉRE, M.; RIJKS, J.Q. & REA, J. *Estudio Agroclimológico de la Zona Andina*. FAO/UNESCO/OMM, Roma, 1975, p.375. (Informe Técnico).
10. LOPES, N.F.; GOMES, A da S.; MOTA, F.S. da; GARCEZ, J.R.B.; GOEDERT, C.O. & BOING, J. Estimativa da Radiação Solar Durante o Ciclo Vegetativo dos Cereais no Rio Grande do Sul. Pelotas, IPEAS. 1971. p.32. (Boletim Técnico, 73).

11. MORAES, E.C. & ALMEIDA, F.C. de Uma Avaliação dos Métodos Convencionais Simples para a Estimativa da Radiação Solar Global Diária Incidente na Superfície. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA V, Belém, PA, 1987. **Coletânea de Trabalhos...**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Belém, PA, 1987, p.217-229.
12. MOTA, F.S. da & BEIRSDORF, M.I.C. Novas Estimativas da Radiação Solar Sobre o Sul do Brasil. **Ciência e Cultura**, v.23, n.5, p.573-576, 1971.
13. MOTA, F.S. da; BEIRSDORF, M.I.C. & ACOSTA, M.J.C. Estimativa Preliminar da Radiação Solar no Brasil. **Ciência e Cultura**, v.29, n.11, p.1274-1283, 1977.
14. PENMAN, H.L. Natural Evaporation from Open Water, Bare soil and Grass. **Proc. Roy. Soc.**, v.193, p.120-145, 1948.
15. PRESCOTT, J.A. Evaporation from a Water Surface in Relation to Solar Radiation. **Trans. Roy. Soc. South Australia**, v.64, n.1, p.114-118, 1940.
16. RIEWELT, M.R. A New Method for Estimating the Regression Coefficients in the Formula Relating Solar Radiation to Sunshine. **Agricultural Meteorology**, v.19, p.243-252, 1978.
17. OCCHIPINTI, A.G. Radiação Solar Global e Insolação em Cananéia. In: SIMPÓSIO SOBRE ENERGIA SOLAR, I, Rio de Janeiro, 1959, **Atas...**, Rio de Janeiro, Centro de Estudos de Mecânica Aplicada, 1959, p.109-189.
18. OMETTO, J.C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo. Editora Agronômica Ceres, 1981, 425p.
19. TARIFA, J.R. Estimativa da Radiação Solar em Função da Insolação para Presidente Prudente. **Cadernos Ciências da Terra**, v.22, p.1-15, 1972.