

UMA AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS CONVENCIONAIS SIMPLES PARA A ESTIMATIVA DA
RADIÇÃO SOLAR GLOBAL DIÁRIA INCIDENTE NA SUPERFÍCIE

Elisabete Caria Moraes
Fausto Carlos de Almeida

Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
12200 - São José dos Campos, SP - BRASIL

RESUMO

O conhecimento da intensidade da radiação solar incidente na superfície terrestre se faz necessário ao desenvolvimento de diversas atividades em Agrometeorologia. A obtenção desta variável, devido à escassa rede piranométrica existente no Brasil, em geral, é baseada em métodos que utilizam o número de horas de brilho solar, ou parâmetros meteorológicos convencionais (temperatura, pressão, etc). Estes métodos são denominados aqui de método semidireto e indireto convencional, respectivamente. O objetivo deste trabalho é comparar dados de verdade terrestre (medidas de piranômetro) com resultados de modelos simples, que estimam a radiação solar; considerando como representativo do método semidireto, o modelo de Bennett (1965), que é uma versão modificada do modelo de Ångström, e do método indireto convencional, os modelos de Brook (1959), para o cálculo da radiação solar direta, e o de Archer (1964), para o cálculo da radiação solar difusa. Os dados usados foram coletados em experimentos de campo realizados em São José dos Campos, SP, durante fevereiro de 1984 e abril e maio de 1985. Nas comparações constatou-se que o método semidireto apresentou alta variância. O método indireto convencional apresentou ótima concordância com os dados de verdade terrestre, devido à variável "parâmetro de poeira", que é ajustada a partir dos próprios dados. Ressalta-se a validade do método utilizado somente para condições de céu limpo e sugestões para melhorar a estimativa do método semidireto, bem como um método alternativo de estimativa da radiação solar incidente na superfície terrestre.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da intensidade de radiação solar incidente na superfície terrestre é importante para o desenvolvimento de diversas atividades em Agrometeorologia, dentre outras, como por exemplo, zoneamento agrícola, previsão de safras e armazenagem de grãos. No Brasil as medidas ou estimativas da radiação solar incidente na superfície geralmente são obtidas de medidas diretas (piranômetros) ou através de formulações envolvendo parâmetros meteorológicos convencionais. Estas medidas são coletadas somente em regiões onde existem estações agrometeorológicas, sendo que a maioria das estações apresentam somente instrumentos que fornecem o número de horas de brilho solar (heliógrafo), já que os instrumentos de medida direta apresentam comparativamente custo elevado. Devido a esta disponibilidade o método de estimativa da radiação solar mais utilizado é formulado utilizando as observações do número de horas de brilho solar. Outros métodos se utilizam de formulações mais complexas, onde as variáveis de entrada são parâmetros meteorológicos (temperatura, pressão, umidade relativa, etc).

2. METODOLOGIA

Neste estudo o intuito é comparar os métodos simples de estimativa da radiação solar com os dados de verdade terrestre (medidas diretas de piranômetros). Para isto foi escolhido como representativo do método que utiliza a duração de brilho solar, classificado aqui como método semidireto, o modelo de Bennett (1965), que é uma versão modificada do modelo de Ångström (1924) e Prescott (1940), incluindo na equação de regressão a altitude local. Seus coeficientes mensais são válidos para o intervalo de latitude de 30°N a 30°S (Nunes et alii, 1978). Então,

$$\bar{E}_g = \bar{E}_0 (a + b (n/N) + ch) \quad (1)$$

onde \bar{E}_g é a radiação solar global média mensal, \bar{E}_0 é a radiação solar média mensal incidente no topo da atmosfera, n é o número de horas de brilho solar, N é a duração astronômica do dia, h é a altitude local e a , b , c são coeficientes da equação de regressão.

Para o cálculo da radiação solar global foi escolhido como representativo dos modelos que utilizam parâmetros meteorológicos, aqui classificados como método indireto convencional, os modelos de Brooks (1959) para estimativa da radiação solar direta, válido somente para a situação de céu limpo, e o de Archer (1964) para a radiação solar difusa.

A radiação solar direta incidente na superfície ($S_d(\theta)$) é expressa por (Brooks, 1959):

$$S_d(\theta) = S_0 (\bar{R}/R)^2 \exp \left[-0,089(p.m/1013)^{0,75} + \right. \\ \left. -0,174 (u.m/20)^{0,6} -0,083 (d.m)^{0,9} \right]$$

onde θ é o ângulo solar zenital, S_0 é a constante solar, $(\bar{R}/R)^2$ é o quadrado da razão entre a distância média e instantânea entre a Terra e o Sol, e a parte exponencial representa a transmitância atmosférica para a radiação solar direta que depende da pressão atmosférica (p) [mb], da massa ótica de ar (m), da quantidade de água precipitável (u) [cm] na direção zenital e do parâmetro de poeira (d) (adimensional).

A radiação solar difusa (E_d) é expressa por (Archer (1964)):

$$E_d = \bar{E}_{d12} \cos \theta$$

onde \bar{E}_{d12} é a radiação solar difusa média incidente na superfície para a situação de Sol em zenite.

A radiação solar global instantânea incidente na superfície (E_g) é expressa por:

$$\bar{E}_g = S_d \cos \theta + E_d$$

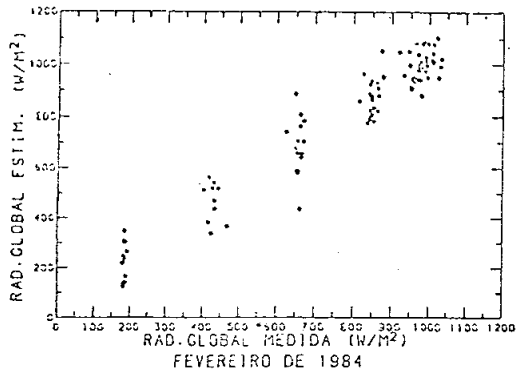
Os dados usados neste estudo foram coletados em experimentos realizados em São José dos Campos, SP, durante fevereiro de 1984 e abril e maio de 1985.

3. RESULTADOS

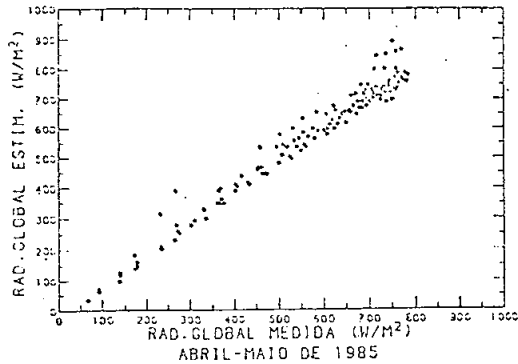
A análise instantânea do modelo de Brooks (1959) apresentou ótima concordância, com os dados de verdade terrestre, para abril e maio de 1985 (coeficiente de correlação de 0,98 e desvio padrão (s) de 22,31 $W m^{-2}$) e menor concordância para fevereiro de 1984 (coeficiente de correlação de 0,679 e desvio padrão (s) de 123,4 $W m^{-2}$). Esta diferença se deve à qualidade dos dados adquiridos, pois enquanto em 1985 o experimento foi quase todo automatizado, a coleta de dados de 1984 foi manual. A boa concordância obtida é devido ao ajuste da variável "parâmetro de poeira" (6,1 para São José dos Campos) aos dados de radiação. É importante ressaltar que na análise de variáveis da equação (Moraes, 1986), ficou evidenciado que o "parametro de poeira" é o fator mais influente na atenuação da radiação solar nesta metodologia. A análise instantânea da radiação solar difusa apresentou baixa correlação (0,5). Foram analisados outros modelos, como o de Barbaro et alii (1979) e Paltridge e Platt (1976) que apresentaram resultado equivalente ou inferior, respectivamente. Foi também verificado que a radiação solar difusa representou, com relação à radiação solar global, 15,9% para abril e maio de 1985 e 24,4% para fevereiro de 1984. A radiação solar global apresentou altos coeficientes de correlação (0,97 com desvio padrão (s) de 72,51 $W m^{-2}$ para fevereiro e 0,98 com s de 33,46 $W m^{-2}$ para abril e maio de 1985), como pode ser visualizado na Figura 1.

Para se fazer a análise diária foram integradas em áreas parciais, através do método do trapézio, as medidas de radiação solar direta, difusa e global, registradas na superfície. O intervalo de tempo para a integração deste método, foi definido de acordo com o intervalo de tempo de coleta de dados definidos para cada experimento, ou seja, em fevereiro de 1984, a coleta era obtida a cada duas horas e em abril e maio de 1985 a cada 15 minutos.

Na análise diária verificou-se pequenos erros relativos da radiação solar direta, difusa e global (respectivamente 7,95%; 15,09% e 5,96% para fevereiro de 1984 (Tabela 1) e 2,07%; 12,16% e 2,77% para abril e maio de 1985 (Tabela 2).



(a)



(b)

Fig. 1 - Relação entre a radiação solar global incidente na superfície estimada através do método indireto convencional e a registrada por piranômetro: (a) para o experimento de fevereiro de 1984, (b) para o experimento de abril-maio de 1985.

TABELA 1

MÉTODO INDIRECTO CONVENCIONAL - ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA
(EXPERIMENTO DE FEVEREIRO/84)

DIRETA					DIFUSA					GLOBAL				
DIA JULIANO	ESTIMADA (E) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA (R) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO $(E-R)/R$ (%)		DIA JULIANO	ESTIMADA (E) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA (R) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO $(E-R)/R$ (%)		DIA JULIANO	ESTIMADA (E) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA (R) $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO $(E-R)/R$ (%)	
45	335,00	313,53	6,85		45	85,47	104,79	-18,44		45	367,53	374,04	-1,74	
46	296,35	222,89	4,76		46	74,68	115,72	-35,47		46	326,20	348,18	-6,31	
47	191,64	192,69	-0,55		47	47,45	47,68	-0,48		47	229,61	230,78	-0,51	
48	192,63	232,55	-14,56		48	51,35	69,11	-25,70		48	207,05	243,66	-15,03	
49	206,27	260,47	-20,81		49	51,08	50,29	1,57		49	212,99	241,08	-11,65	
50	412,67	455,14	9,33		50	102,42	93,45	9,60		50	426,45	438,39	-2,73	
51	231,12	306,50	-5,02		51	74,68	86,60	-13,84		51	321,49	342,98	-6,27	
52	226,66	234,53	-3,36		52	58,24	58,59	-0,60		52	266,81	275,68	-3,22	
53	169,80	362,77	1,97		53	95,29	105,21	-9,43		53	395,61	393,95	0,42	
54	358,30	234,34	7,17		54	93,77	101,65	-7,75		54	360,21	361,16	-0,26	
55	329,74	203,15	5,80		55	84,54	90,19	-6,26		55	357,75	352,22	1,57	
56	251,18	257,97	-2,63		56	63,03	47,79	31,89		56	272,74	264,90	2,96	
57	332,41	394,27	-15,68		57	81,07	69,24	17,09		57	333,66	349,06	-4,36	
58	60,65	69,01	-12,11		58	14,55	19,33	-24,73		58	53,40	68,28	-21,79	
59	250,74	230,89	8,60		59	53,10	51,11	23,46		59	267,25	241,70	10,57	
				ERRO RELATIVO MÉDIO = 7,95 $\sigma = 32,40$					ERRO RELATIVO MÉDIO = 15,09 $\sigma = 127,87$					ERRO RELATIVO MÉDIO = 5,96 $\sigma = 39,01$

MÉTODO INDIRETO CONVENCIONAL RADIAÇÃO SOLAR INTEGRADA DURANTE O DIA
EXPERIMENTO DE ABRIL - MAIO/85

TABELA 2

a)

D I R E T A			
DIA	ESTIMADA $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO (E-R)/R (%)
114	252,02	244,07	3,26
117	111,02	117,13	- 5,22
118	93,58	94,34	- 0,81
119	104,52	107,10	- 2,41
124	167,36	165,48	1,14
125	153,43	152,02	6,93
126	271,07	273,33	- 0,83
127	253,23	252,90	- 0,13
128	155,42	149,56	3,92
ERRO RELATIVO MÉDIO = 2,07 σ = 2,99			

b)

D I F U S A			
DIA	ESTIMADA $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO (E-R)/R (%)
114	37,40	46,36	- 19,33
117	18,26	20,59	- 11,32
118	14,01	13,56	3,32
119	15,75	16,72	- 5,60
124	25,33	38,68	- 34,51
125	22,96	21,86	5,12
126	40,47	34,62	16,90
127	37,57	39,08	- 3,86
128	23,68	26,09	- 9,24
ERRO RELATIVO MÉDIO = 12,17 σ = 102,46			

c)

G L O B A L			
DIA	ESTIMADA $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	REGISTRADA $\text{kJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$	ERRO RELATIVO (E-R)/R (%)
114	253,98	262,19	- 3,13
117	97,07	103,47	- 6,19
118	101,26	101,76	- 0,49
119	113,98	117,30	- 2,83
124	163,48	177,07	- 7,68
125	148,41	146,23	1,49
126	268,79	265,87	1,10
127	258,33	259,58	- 0,48
128	156,15	153,78	1,54
ERRO RELATIVO MÉDIO = 2,77 σ = 6,54			

Segundo Schulze (1976), para cidades industrializadas, o valor máximo do parâmetro de poeira é metade do valor ajustado para São José dos Campos, ou seja, 3,0. Sua utilização no modelo, acarretou erros relativos médios maiores, ou seja, de 27,21% e variância (σ) de 13,86 para a radiação solar global, o que evidencia que o "parâmetro de poeira" de 6,1 é o valor mais propício para a região em questão. Vale ressaltar que este método é válido somente para situações de céu limpo.

O método semidireto é aplicável para cálculo da radiação solar global mensal. Neste estudo foi utilizado com certas restrições, devido à suposição de que seus coeficientes mensais fossem equivalentes aos coeficientes diários para os respectivos meses, e devido à validade da representatividade dos coeficientes de regressão para qualquer região do Brasil.

Na Tabela 3 é apresentada a estimativa da radiação solar global utilizando-se o método semidireto. Verifica-se boa concordância com os dados de verdade terrestre; com exceção de dois dias anômalos, ou seja, os dias julianos 118 e 120. Ao eliminá-los da análise foi encontrado, para o experimento de fevereiro de 1984, um erro relativo médio de 8,17% e uma variância de 31,70% e para o experimento de abril e maio de 1985, um erro relativo médio de 3,91% com uma variância de 13,30.

Um problema encontrado, principalmente para os casos anômalos, é a não consideração do período do dia solar em que ocorre a cobertura por nuvens. Isto implicou em uma superestimativa dos resultados quando as coberturas de nuvens ocorriam próximas ao meio dia solar, período em que a intensidade solar é máxima, pois o registro de brilho solar diário não mostra nada a respeito da intensidade solar.

Este tipo de problema já foi mencionado e tratado por Lanat et alii (1979) e Revfeim (1981), que consideram o comprimento da queima do heliograma mensal para cada horário. A formulação de Lanat et alii, a mais simples, é expressa por:

$$\bar{E}_g \dagger = \bar{E}_0 \left[\sum (CC) (P) + \sum \frac{(CN)(P)}{\alpha} \right]$$

onde P é o coeficiente de peso para cada horário, CC e CN são o intervalo de tempo de brilho solar horário para céu limpo e com nuvens, respectivamente e α é a taxa de radiação solar difusa para um mês seco.

As diferenças verificadas no total diário da radiação solar global incidente na superfície para os métodos semidireto e indireto, de vem-se ao fato de que os números de dados integrados para cada método são distintos.

MÉTODO SEMIDIRETO TOTAL DIÁRIO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

TABELA 3

EXPERIMENTO DE FEVEREIRO/84

DIA JULIANO	SEMI-DIRETO (SO) kJm ⁻² dia ⁻¹	REGISTRADA (R) kJm ⁻² dia ⁻¹	ERRO RELATIVO (SD-R)/R (%)
46	376,03	373,99	0,55
47	374,91	340,44	10,13
48	399,04	373,34	6,88
49	345,67	343,81	0,54
50	448,25	394,17	13,72
51	360,67	349,78	3,11
52	334,71	343,86	-2,66
53	430,92	374,89	14,95
54	423,87	372,83	13,69
55	381,90	344,12	10,98
56	335,53	289,96	15,72
57	351,39	340,95	3,06
59	404,45	366,74	10,28
ERRO MÉDIO RELATIVO =			8,17
			$\sigma = 31,70$

TABELA - 3 CONCLUSÃO

EXPERIMENTO DE ABRIL - MAIO/85

DIA JULIANO	SEMI-DIRETO (SD) kJm ⁻² dia ⁻¹	REGISTRADA (R) kJm ⁻² dia ⁻¹	ERRO RELATIVO (SD-R)/R (%)
118*	244,42	152,51	60,26
119	228,42	247,25	-7,62
120*	176,15	133,75	31,70
124	198,00	197,18	0,42
125	245,27	243,65	0,66
126	274,76	286,80	-4,20
127	275,20	279,88	-1,67
129	94,17	103,37	-8,90
			ERRO MÉDIO RELATIVO = 3,91 σ = 13,30

* Eliminado no cálculo do erro relativo médio.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi verificado que o método mais propício para ser utilizado para o cálculo da radiação solar global incidente na superfície é ainda o método semidireto (horas de brilho solar).

Embora o método indireto convencional utilizado neste estudo tenha apresentado ótimo coeficiente de correlação, a sua utilização, como estimador da radiação solar, torna-se inviável pois além de ser válido somente para situações de céu limpo, só pode ser empregado em locais onde haja condições de se determinar sazonalmente o "parâmetro de poeira", que neste caso foi inferido a partir dos dados de verdade terrestre, portanto sendo restrito a locais onde existam coletas regulares de dados agrometeorológicos.

Segundo Martinez - Lozano et alii (1984) existem cerca de 120 trabalhos baseados na formulação de Ångström e a grande variabilidade dos dois coeficientes (a e b) é principalmente devida a condições atmosféricas variáveis. É interessante lembrar que o modelo de Bennett (1965), validado para uma larga faixa de latitudes, se reduz, quando aplicado para um local (como é o nosso caso, para a cidade de São José dos Campos) a formulação proposta na equação de Ångström, onde o coeficiente linear de Ångström a' é dado pela soma dos coeficientes $a + c$ (h), de Bennett.

Uma possível melhora nas estimativas da radiação solar global diária, pelo método semidireto, envolve uma correção através de pesos para cada horário, já que a duração de horas de brilho solar não reflete a intensidade da radiação solar para regiões onde não existem estações agrometeorológicas de observação, outras alternativas devem ser buscadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅNGSTRÖM, A.K. Solar and atmospheric radiation *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50:121, 1924.

ARCHER, C.B. The relationship between radiation and solar altitude in Southern Africa. *Notes*, 13:21-24, 1964

- BARBARO, S.; COPPOLINO, S.; LEONE, C.; SINGARAS, E. An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation *Solar Energy*, 22(3): 225-228, Mar., 1979.
- BENNETT, I. Monthly maps of mean daily insolation for the United States. *Solar Energy*, 9(3):145-152, Mar., 1965.
- BROOKS, F.A. *An introduction to physical microclimatology*, Davis, University of California, 1959.
- LANAT, F.; ABBA, F.; BROMBRE, F.; DECAMPS, E.A. Correlation entre mesures de durées d'ensoleillement et d'énergie reçue au sol: Méthode du poids des heures. Application en zone sub-equatoriale d'altitude. *Revue Internationale d'Helietechnique*, I semestre:57-59, 1979.
- MARTINEZ-LOZANO, J.A.; TENA, F.; ONRU8IA, J.E.; DE LA RUBIA, J. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: review and bibliography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 33(2/3): 109-128, Dec., 1984.
- MORAES, E.C. *Comparação entre métodos de estimativa da radiação solar: satélite e convencional*, São José dos Campos, INPE, 1986. (INPE-4D25-TDL/242).
- NUNES, G.; ANDRÉ, R.G.B.; VIANELLO, R.L.; MARQUES, V.S. *Estudo da distribuição da radiação solar incidente sobre o Brasil*. São José dos Campos, INPE, 1978. (INPE-1190-NTE/110).
- PALTRIDGE, G.W.; PLATT, C.M.R. *Radiative processes in meteorology and climatology*. Amsterdam Scientific Publishing Company, 1976.
- PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation, *Trans. Roy. Soc. Sci. Aust.*, 64:114-125, 1940.
- REVFEM, K.J.A. Estimation solar radiation in come from 'bright' sunshine records. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 107 (451-452), 427-435, 1981.

SCHULZE, R.E. A physically based method of estimating the total solar radiation from suncards. *Agricultural Meteorology*.16(2):85-101, Feb., 1976.