

Radiação solar em Manaus (*)

N. A. Villa Nova (1)
M. N. Góes Ribeiro (2)
C. A. Nobre (2)
E. Salati (1)

Resumo

Medidas de radiação solar global foram realizadas no período de um ano (1976/1977) na estação solarimétrica do INPA em Manaus (AM). É introduzido e testado um método para cálculo da máxima radiação solar possível (pequena cobertura de nuvens), revelando erros de estimativa menores que 7% em relação aos dados medidos. Estima-se uma transmissão máxima média anual de 81% da energia solar extraterrestre incidente.

INTRODUÇÃO

Medidas diretas de radiação solar são quase inexistentes na Região Amazônica. Até o momento, as estimativas de radiação solar foram obtidas a partir da razão insolação determinadas com heliógrafos, sendo que algumas séries razoáveis destes dados existem na Região, Villa Nova *et al.*, (1976) e Mota *et al.* (1977).

Pela análise sistemática das poucas séries de medidas da energia solar, encontraram-se grandes desvios entre os valores esperados e os medidos. Detectou-se que a causa principal desses erros era a falta de calibragem do aparelhamento que estava sendo utilizado Villa Nova *et al.*, (1976). A fim de se obterem valores de radiação global com maior precisão foi instalado no INPA um pireliômetro Eppley e feitas medidas contínuas para se determinar a radiação global. Esta é a primeira série de dados precisos de radiação solar obtida na região Amazônica.

Este trabalho tem por finalidade apresentar os dados obtidos no período maio/76 a abril/77 e também apresentar um método para a estimativa do fluxo máximo de energia solar a

partir das medidas (ou cálculo) da energia solar durante a passagem do Sol pelo meridiano local.

MATERIAL E MÉTODO MEDIDAS REALIZADAS

Foram realizadas medidas, pelo período de um ano, com Pireliômetro de Eppley de 10 junções, acoplado a um potenciômetro de 0,1mV de precisão na estação radiométrica localizada na sede do INPA, Manaus, Am. Os dados registrados no potenciômetro foram convertidos em calorias ($2,34\text{mV cal}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{min}^{-1}$) e depois integrados, dia a dia, com auxílio de um planímetro.

MÉTODO DE CÁLCULO DA MÁXIMA RADIAÇÃO (Q_m)

O total de radiação solar no topo da atmosfera (Q_o) é determinado basicamente pela função

$$Q_o = \frac{J_o}{R^2} \int_{T_n}^{T_p} \cos z \, dt \quad (1)$$

onde

$\frac{J_o}{R^2}$ = constante solar do período

z = ângulo zenital da hora

T_n e T_p = tempo de nascer e de pôr do sol

A função (1) integra então ao longo do tempo o produto da intensidade máxima fora

da atmosfera ($\frac{J_o}{R^2}$) pelo cosseno do ângulo zenital.

(*) — Trabalho subvencionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela FINEP (Projeto FINEP/USP-IF437 — "Levantamento Solarimétrico do Brasil").

(1) — Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) - Piracicaba, SP, Depto de Física e Meteorologia/ESALQ.

(2) — Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

Em um raciocínio análogo, para o caso de dias limpos, situação em que a curva de variação diária de radiação ao nível do solo aproxima-se bastante de uma cosenóide (Hirschmann, 1974), observa-se que o valor de cada instante é sensivelmente igual ao produto da Intensidade máxima do instante (I_m) pelo cosseno do ângulo zenital respectivo. A radiação máxima ao nível do solo (Q_m) ocorrida em dias limpos pode ser expressa analogamente a (1) como:

$$I_m \int_{T_n}^{T_p} \cos z \, dt \quad (2)$$

sendo I_m dependente da transmissibilidade da atmosfera, praticamente constante para determinadas épocas do ano. Nas presentes considerações, o valor de I_m é calculado na passagem zenital pela relação

$$I_m = \frac{I_{12}}{\cos z_{12}} \quad (3)$$

onde

I_{12} = intensidade medida na passagem meridiana (em dia limpo).

z_{12} = ângulo zenital na passagem meridiana.

O ângulo zenital na passagem meridiana é facilmente determinado, pois é um caso particular da relação fundamental.

$$\cos z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos h \quad (4)$$

sendo que, quando na passagem zenital $\cos h = 1$, resulta que

$$z_{12} = [\delta] - [\phi] \quad (5)$$

onde δ e ϕ são respectivamente a declinação do sol e a latitude do local considerado, observando-se os sinais respectivos.

Relacionando as equações (1), (2), (3) e (4), obteremos então

$$Q_{mp} = \frac{Q_o}{\frac{J_o}{R^2} \cos(\delta - \phi)} I_{12} \quad (6)$$

Considerando-se valores médios de Q_o , $\frac{J_o}{R^2}$

para um determinado mês, pode-se então estimar para cada latitude ϕ , o valor da máxima radiação possível (Q_{mc}) para o mês em questão, em função do valor médio medido de I_{12} em situação de céu claro, na passagem meridiana.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Na figura 1, pode-se observar a relação entre os valores instantâneos de radiação registrada (I_r) pelo Eppley e calculada (I_c) de acordo com a Lei de Lambert, ou seja, $I_c = \cos z$, sendo para cada hora do dia (h), $I_{12} \frac{\cos z}{\cos z_{12}}$, na latitude ($3^{\circ}08'$) e no dia considerado (25/07/77), $\cos z$ definido por,

$$\cos z = -0,0186 + 0,9391 \cos h \quad (7)$$

caso particular para Manaus, (no dia considerado) da equação geral (4). De acordo com os dados da figura 1 pode-se observar que nas primeiras horas da manhã e da tarde as diferenças entre I_c e I_r são maiores dadas as pequenas variações relativas ao número de massas óticas atravessadas. Ocorre, entretanto, que essas pequenas diferenças vão ocasionar erros nos resultados obtidos pela equação (6) de ordem de grandeza equivalente aos erros de cotação do pireliômetro (porque ocorrem a valores de baixa intensidade). No caso pre-

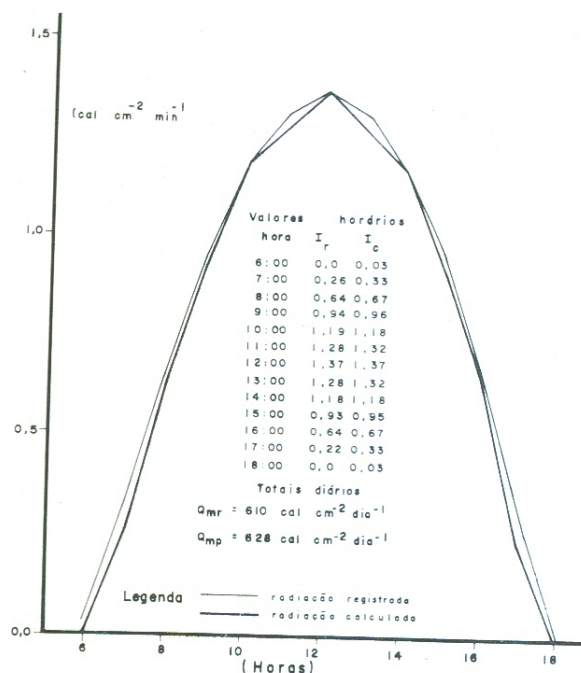


Figura 1 — Comparação entre os valores horários de radiação registrada (I_r) e radiação calculada (I_c) através do valor máximo registrado (I_{12}); Q_{mr} = radiação máxima diária registrada. Q_{mc} = radiação máxima diária calculada.

QUADRO I — Valores diários máximos possíveis de radiação global em cal/cm² dia (Q_{mp}), determinados em função do valor medido (I_{12}) na passagem meridiana. Q_0 = radiação extra terrestre; J_0/R^2 = constante solar do período; Z_{12} = ângulo zenital na passagem meridiana; I_{12} = intensidade medida (ou calculada) na passagem meridiana em dia limpo; Q_{mp} = radiação máxima possível (dia limpo); \bar{Q}_g = radiação média observada; \bar{Q}_g/\bar{Q}_0 = transmissibilidade de média mensal da radiação global; r = razão da insolação.

ESTAÇÃO: MANAUS - INPA — Latitude : 3°08'S

	Jan.		Fev.		Mar.		Abr.		Maio		Jun.		Jul.		Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.	
	15	30	15	28	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
Q_0	883	894	904	906	900	884	858	829	800	777	763	762	773	794	822	849	873	888	894	893	885	877	872	874
J_0/R^2	2,00	1,99	1,98	1,97	1,96	1,94	1,92	1,91	1,89	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,89	1,90	1,92	1,94	1,95	1,97	1,98	2,00	2,00	2,00
Z_{12}	18,18	14,82	10,90	5,22	0,97	6,48	12,87	17,55	21,96	24,69	26,47	26,28	24,67	21,80	17,20	12,40	6,18	0,54	5,33	10,40	15,33	18,43	20,12	20,17
$\cos Z_{12}$.950	.467	.982	.996	1.00	.994	.975	.953	.927	.909	.895	.897	.909	.928	.955	.977	.994	1.00	.996	.984	.964	.949	.939	.939
I_{12}	1,55	1,57	1,58	1,59	1,62	1,56	1,54	1,48	1,42	1,37	1,34	1,35	1,37	1,41	1,47	1,51	1,55	1,60	1,60	1,58	1,55	1,55	1,53	1,53
Q_{mp}	720	729	735	734	744	715	706	674	648	623	608	610	620	642	669	691	709	732	736	728	719	716	710	712
Q_{mp}/Q_0	.81	.81	.81	.81	.83	.81	.82	.81	.81	.80	.80	.80	.80	.81	.81	.80	.81	.82	.82	.81	.81	.82	.81	.81
\bar{Q}_q	458	353	353	336	320	418	422	488	525	559	459	432	380											
\bar{Q}_g/\bar{Q}_0	0,52	0,39	0,37	0,37	0,37	0,52	0,55	0,63	0,64	0,64	0,51	0,49	0,44											
\bar{r}	0,38	0,33	0,30	0,31	0,46	0,56	0,66	0,71	0,60	0,54	0,48	0,40												

sente, a radiação cotada foi de $610 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Q_{mr}) contra $628 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Q_{mp}) estimados por (6), que ocasionou um erro de 3% na estimativa. Aplicando-se o método proposto para outros dias limpos ou quase-limpos ocorrentes durante o ano, obtivemos erros de estimativa nunca maiores do que 7% o que nos permite aceitá-lo como um processo razoável de estimativa de "radiação máxima possível".

No quadro I, são demonstrados os valores calculados de Q_{mp} ao longo do ano em função dos valores obtidos na passagem do meridiano (I_{12}) registrados, para os dias 15 a 30 de cada mês. Tais valores oscilam entre 608 a $736 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em função da variação angular do sol. Nota-se também que a porcentagem transmitida nestas condições, em relação a radiação extra-terrestre (Q_0), como era de esperar-se, permanece mais ou menos constante aproxi-

QUADRO II — Valores diários de radiação global (Q_g) medidos na estação do INPA, Manaus, no período 1976/1977 (cal/cm² dia)

	1976						1977					
	Maí.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
1	444	386	279	—	633	327	531	—	268	553	187	325
2	422	397	378	521	628	456	639	440	623	174	592	159
3	424	431	263	558	639	529	333	478	547	327	301	143
4	188	537	480	456	456	354	—	215	628	541	529	316
5	540	553	507	580	633	644	397	338	456	186	585	424
6	488	512	556	588	644	403	456	—	386	352	581	580
7	446	—	523	625	628	419	134	301	553	663	250	419
8	497	298	491	545	590	408	118	—	241	505	448	450
9	528	486	325	590	628	220	436	590	682	369	379	590
10	503	177	510	504	590	569	456	598	451	454	206	480
11	351	252	—	573	628	327	129	558	376	425	—	518
12	531	365	314	564	646	338	505	470	585	321	—	330
13	322	204	488	580	612	488	494	633	526	380	—	160
14	292	548	400	572	606	633	451	499	327	204	—	418
15	338	515	545	574	644	472	537	397	190	651	467	259
16	399	446	537	570	606	—	488	419	434	401	519	100
17	284	349	529	545	494	—	440	397	463	175	296	324
18	467	510	566	562	574	462	670	161	363	135	209	110
19	456	563	515	580	580	—	392	343	414	233	271	321
20	505	408	558	540	574	386	569	199	489	162	161	115
21	481	284	564	306	561	—	—	274	314	324	293	352
22	352	295	566	—	392	231	139	284	535	260	243	257
23	317	488	584	177	596	440	649	486	401	312	122	398
24	564	544	370	252	456	370	547	197	452	358	249	218
25	531	424	610	628	392	633	435	228	410	234	300	359
26	157	456	590	584	606	617	—	426	674	246	490	171
27	510	510	558	580	451	510	—	486	569	539	311	349
28	349	456	403	596	531	617	—	164	494	389	513	311
29	587	467	521	—	429	515	—	368	479	—	252	375
30	243	397	612	521	349	—	—	437	408	—	54	275
31	438	—	643	560	—	569	—	263	—	—	268	—
\bar{Q}_g	418	422	493	530	559	459	432	380	458	353	336	320

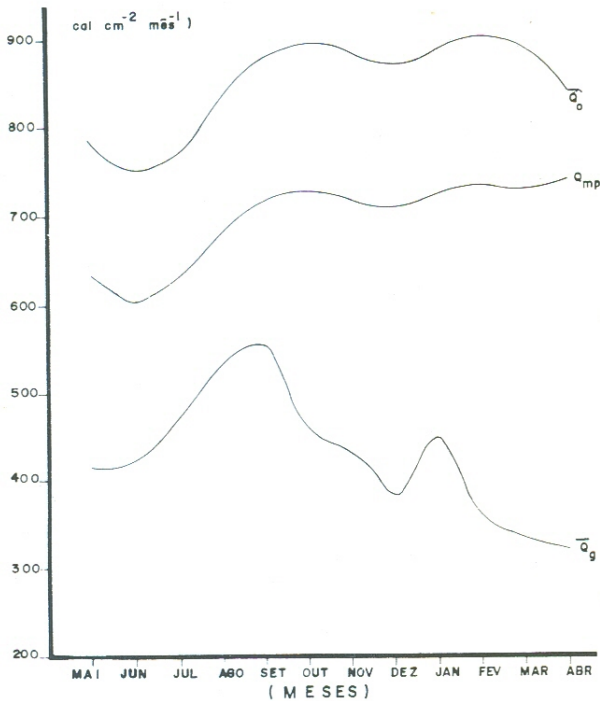


Figura 2 — Curvas anuais de \bar{Q}_o , Q_{mp} e \bar{Q}_g ; \bar{Q}_o = valor médio mensal da radiação extraterrestre; Q_{mp} = radiação máxima possível (dias limpos); \bar{Q}_g = radiação global média mensal registrada.

madamente igual 81%. Pode-se observar também que a transmissibilidade média mensal (real) da radiação global (\bar{Q}_g/\bar{Q}_o) registrada é bem menor variando ao longo do ano em função da razão de insolação (r). O quadro II e figura 2 demonstram os valores diários e médios mensais de Q_g , \bar{Q}_g , Q_{mp} e Q . Verifica-se, então, que os maiores valores médios mensais de Q_g se dão em agosto/setembro (530-559 cal/cm².dia), com valores mínimos em janeiro, fevereiro e março (353, 336 e 320 cal/cm².dia), funções mais diretas da distribuição de \bar{r} .

CONCLUSÕES

1. A radiação solar global média do ano é de 430 cal cm⁻².dia⁻¹.
2. O valor máximo obtido no período foi de 670 cal cm⁻².dia⁻¹, obtido em 18 de novembro de 1976.

3. A transmissão média deverá estar em torno de 81% para os dias limpos.
4. Os valores médios mensais maiores ocorrem no período de agosto-setembro, variando de 530 a 559 cal cm⁻².dia⁻¹.
5. Os valores médios mensais menores ocorrem no período de janeiro a março com média de 336 cal cm⁻².dia⁻¹.
6. O valor do máximo instantâneo de energia foi de 1,62 cal cm⁻².min⁻¹ obtido em 6 de janeiro de 1977.
7. A metodologia proposta para cálculo da "radiação máxima possível" (Q_{mp}), em função do valor da intensidade na passagem meridiana (I_{12}) em condições de céu claro, revelou erros menores do que 7%, em relação aos dados medidos.

SUMMARY

Measurements of global solar radiation was performed during a whole year period (1976-1977) in the Solarimetric Station of INPA in Manaus (AM). A method to estimate the maximum possible solar radiation (for bright sunshine periods) in a daily basis in introduced and tested. The estimated values showed errors less than 7% if compared to measured values. An estimation of the mean annual maximum atmospheric transmission which showed to be 81% of the incident extraterrestrial solar radiation.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- MOTA, F.S.; BEISDORF, M.I.C. & ACOSTA, J.C.
1977 — Estimates of Solar Radiation in Brazil. *Agricultural Meteorology*, 18:241-254.
- VILLA NOVA, N.A.; SALATI, E. & MATISUI, E.
1976 — Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. *Acta Amazonica*, 6(2): 215-228.
- VILLA NOVA, N.A.; SALATI, E.; SANTOS, J.M. & RIBEIRO, M.N.G.
1976 — Coeficiente de transmissão de radiação solar em Manaus em junho. *Acta Amazonica*, 6(3):319-322.

(Aceito para publicação em 11-05-78)