

Distribuição espectral e coeficientes de transmissão da radiação solar para condições de céu limpo em Manaus

Ronaldo de Almeida (*)
Eneas Salati (**)
Nilson Augusto Villa Nova (***)

Resumo

Medidas de radiação solar global e direta utilizando-se os filtros OG-530, RG-630 e RG-695 foram realizadas em Manaus-INPA. Os equipamentos disponíveis para estas medidas foram um piranômetro espectral e um pireliômetro de incidência normal da Eppley. Os sinais foram registrados com o auxílio de um potenciômetro LEEDS e NORTHROP modelo SPEEDOMAX-W. As medidas foram realizadas em dois dias claros. Com os dados obtidos foi possível estimar a variação horária do coeficiente de transmissão atmosférica correspondente a cada uma das faixas espectrais. Os autores apresentam uma distribuição horária dos fluxos de radiação solar global direta e difusa.

INTRODUÇÃO

Com a crise mundial de energia gerada pelo alto custo do petróleo, foram intensificadas em todos os países, pesquisas sobre formas não convencionais de energia. Uma das alternativas para auxiliar na solução do problema energético é a utilização da radiação solar. No Brasil, programas específicos foram traçados em coordenação, especialmente através da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos). Nos estudos preliminares sobre a energia solar disponível no Brasil, verificou-se a escassez de dados sobre radiação solar, obtidos com instrumentos de precisão. Nos últimos cinco anos um esforço grande tem sido realizado para se estabelecer um mapeamento solarimétrico para as diversas regiões do País.

Para a região Amazônica alguns dados sobre radiação solar foram publicados recentemente. Villa Nova *et al.* (1976a) apresentaram estimativas do balanço de energia para

diversos pontos da bacia Amazônica e a razão de insolação para 19 estações da região. Villa Nova *et al.* (1976b) apresentaram medidas do coeficiente de transmissão da radiação solar em Manaus no mês de junho. Villa Nova & Salati (1977) apresentaram uma estimativa da radiação solar no Brasil, baseada na energia solar medida na passagem meridiana, das 97 estações estudadas, 15 pertencem a região Amazônica. Mota *et al.*, 1977 apresentaram dados de radiação solar estimados para o Brasil e para a região Amazônica a partir das razões de insolação. Villa Nova *et al.* (1978) apresentaram dados medidos com precisão (utilizando pireliômetro Eppley) para radiação solar global na sede do INPA em Manaus.

Neste trabalho são apresentados os primeiros dados de radiação espectral obtidos na região Amazônica.

MATERIAL E MÉTODOS

INSTRUMENTAL

As medidas de radiação foram feitas em intervalos de 30 minutos na cidade de Manaus (3° 08'S e 60° 01'W) nos dias 23-7-78 (das 7:00 às 12:00 h) e 3-8-78 (das 12:00 às 17:30 h) quando o céu se apresentava isento de nuvens ou com poucas nuvens no horizonte.

A radiação global foi medida com um Eppley Precision Spectral Pyranometer acoplado a um registrador Speedomax-W, marca Leeds & Northrup previamente calibrado.

Os valores espectrais de radiação global foram obtidos adaptando-se rápida e suces-

(*) — Universidade do Amazonas e Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

(**) — Centro de Energia Nuclear na Agricultura-CNEN-SP e Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

(***) — Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-USP.

sivamente sobre o radiômetro filtros de vidro (Scott glass filters) com as seguintes características :

Código antigo	Código novo	"Center of cut-off"	Fator
OG 1	OG 530	529	1.095
RG 2	RG 630	623	1.095
RG 8	RG 695	686	1.090

A radiação incidente perpendicular à direção de propagação das ondas foi obtida com um Eppley Normal Incidente Pyrheliometer com os mesmos tipos de filtros já descritos, ligado a um milivoltímetro potenciométrico, marca Leeds and Northrup, modelo 8690-2, sendo depois adequadamente convertida para unidades usuais de radiação.

EQUAÇÕES UTILIZADAS

Radiação direta

Os valores medidos na direção dos raios solares foram multiplicados pelo cosseno do ângulo zenital no instante da observação, obtendo-se desta forma a radiação direta (E), ou seja : a intensidade do fluxo de radiação solar que atinge diretamente uma superfície horizontal.

O cosseno do ângulo zenital foi calculado através da equação clássica (1)

$$\cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \dots (1)$$

onde : z = ângulo zenital do sol no instante da observação

ϕ = latitude

δ = declinação do sol no instante da observação

h = ângulo horário do sol no instante da observação, determinado pela expressão : $h = (12 - H) 15^\circ$, onde H é a hora legal da observação em horas e décimos.

Radiação difusa

A radiação difusa foi calculada subtraindo-se da radiação global a radiação direta.

$$D = G - E \dots \dots \dots (2)$$

onde : D = radiação difusa

G = radiação global

E = radiação direta

Radiação instantânea fora da atmosfera

Os valores da radiação instantânea extraterrestre (G_0) foram obtidos pela expressão

$$\frac{dG_0}{dt} = \frac{J_0}{R^2} \cos z \dots \dots \dots (3)$$

onde : R = distância da Terra ao Sol expressa em termos do raio médio

J_0 = constante solar

Coefficientes de transmissão

Os coeficientes de transmissão da atmosfera para as faixas espectrais analisadas foram determinados através da equação (4)

$$I_i = J_i \Sigma \sec z \dots \dots \dots (4)$$

onde : Σ = coeficiente de transmissão da atmosfera

I = radiação incidente em uma superfície normal à direção dos raios solares ao nível do solo

J = radiação incidente em uma superfície normal à direção dos raios solares fora da atmosfera, integradas a partir da distribuição relatada por List (1966).

z = ângulo zenital no instante da observação

i = faixa espectral considerada.

Caracterização das faixas espectrais

Segundo o fabricante, cada tipo de filtro utilizado apresenta uma transmissividade elevada a partir de um determinado comprimento de onda (center of cut-off), sendo praticamente opaco para comprimentos de onda menores que este valor. Desta forma, medindo-se um mesmo feixe de radiação com filtros

QUADRO I Distribuição espectral da radiação solar (cal. cm⁻²min⁻¹) em Manaus (AM). Período da manhã (23/7/78). Período da tarde (3/8/78).

Hora	total 270 — 2500nm				violeta-azul 270 — 529nm				verde-amarelo 529 — 6623nm				vermelho 623 — 686nm				infra-vermelho 686 — 2500nm			
	G	E	D	I	G ₁	E ₁	D ₁	I ₁	G ₂	E ₂	D ₂	I ₂	G ₃	E ₃	D ₃	I ₃	G ₄	E ₄	D ₄	I ₄
7:00	0,23	0,15	0,08	0,66	0,05	0,02	0,03	0,09	0,04	0,02	0,02	0,10	0,02	0,02	0,00	0,07	0,12	0,09	0,03	0,40
7:30	0,37	0,25	0,12	0,73	0,10	0,05	0,05	0,13	0,06	0,04	0,02	0,13	0,04	0,02	0,02	0,07	0,17	0,14	0,03	0,40
8:00	0,55	0,38	0,17	0,85	0,14	0,07	0,07	0,17	0,08	0,06	0,02	0,13	0,07	0,04	0,03	0,09	0,26	0,21	0,05	0,46
8:30	0,70	0,53	0,17	0,91	0,19	0,11	0,08	0,20	0,09	0,08	0,01	0,13	0,07	0,06	0,01	0,10	0,35	0,28	0,07	0,48
9:00	0,86	0,66	0,20	1,02	0,24	0,15	0,09	0,22	0,13	0,10	0,03	0,16	0,09	0,06	0,03	0,10	0,40	0,35	0,05	0,54
9:30	0,93	0,72	0,21	0,99	0,24	0,16	0,08	0,22	0,15	0,12	0,03	0,17	0,10	0,07	0,03	0,09	0,44	0,37	0,07	0,51
10:00	1,05	0,82	0,23	1,03	0,28	0,20	0,08	0,24	0,18	0,14	0,04	0,18	0,10	0,08	0,02	0,10	0,49	0,40	0,09	0,51
10:30	1,14	0,90	0,24	1,07	0,30	0,22	0,08	0,25	0,20	0,15	0,05	0,18	0,10	0,08	0,02	0,10	0,54	0,45	0,09	0,54
11:00	1,24	0,98	0,26	1,10	0,33	0,24	0,09	0,26	0,21	0,16	0,05	0,18	0,11	0,09	0,02	0,10	0,59	0,49	0,10	0,56
11:30	1,33	1,02	0,31	1,12	0,37	1,24	0,13	0,27	0,22	0,18	0,04	0,19	0,12	0,10	0,02	0,11	0,62	0,50	0,12	0,55
12:00	1,36	1,09	0,27	1,19	0,35	0,25	0,10	0,27	0,21	0,17	0,04	0,20	0,14	0,11	0,03	0,11	0,66	0,56	0,10	0,61
* Totais	268,7	206,0	62,7	291,3	71,8	47,1	24,7	64,2	43,3	33,9	9,4	48,0	26,2	19,9	6,3	28,4	127,4	105,1	22,3	150,7
12:00	1,40	1,18	0,22	1,26	0,39	0,28	0,11	0,30	0,23	0,19	0,04	0,20	0,13	0,11	0,02	0,12	0,65	0,60	0,05	0,64
12:30	1,36	1,18	0,18	1,27	0,37	0,28	0,09	0,30	0,23	0,19	0,04	0,20	0,12	0,11	0,01	0,12	0,64	0,60	0,04	0,65
13:00	1,32	1,14	0,18	1,27	0,36	0,27	0,09	0,31	0,22	0,18	0,04	0,20	0,12	0,11	0,01	0,12	0,62	0,58	0,04	0,64
13:30	1,25	1,08	0,17	1,26	0,34	0,25	0,09	0,30	0,22	0,18	0,04	0,20	0,10	0,10	0,00	0,12	0,59	0,55	0,04	0,64
14:00	1,16	1,00	0,16	1,24	0,31	0,23	0,08	0,29	0,19	0,16	0,03	0,20	0,11	0,10	0,01	0,12	0,55	0,51	0,04	0,63
14:30	1,05	0,90	0,15	1,21	0,29	0,21	0,08	0,28	0,16	0,14	0,02	0,19	0,10	0,09	0,01	0,12	0,50	0,46	0,04	0,62
15:00	0,93	0,78	0,15	1,19	0,27	0,17	0,10	0,25	0,14	0,13	0,01	0,20	0,08	0,08	0,00	0,12	0,44	0,40	0,04	0,62
15:30	0,78	0,65	0,13	1,16	0,22	0,14	0,08	0,25	0,12	0,10	0,02	0,18	0,07	0,07	0,00	0,12	0,37	0,34	0,03	0,61
16:00	0,62	0,51	0,11	1,11	0,17	0,11	0,06	0,24	0,09	0,08	0,01	0,17	0,06	0,05	0,1	0,11	0,30	0,27	0,03	0,59
16:30	0,45	0,35	0,10	1,00	0,13	0,07	0,06	0,19	0,07	0,05	0,02	0,16	0,04	0,04	0,00	0,11	0,21	0,19	0,02	0,54
17:00	0,25	0,19	0,06	0,85	0,06	0,03	0,03	0,14	0,04	0,03	0,01	0,12	0,04	0,02	0,02	0,10	0,11	0,11	0,00	0,49
17:30	0,09	0,06	0,03	0,57	0,02	0,00	0,02	0,05	0,02	0,01	0,01	0,08	0,01	0,01	0,00	0,06	0,04	0,04	0,00	0,38
(*) Totais	296,1	251,2	44,9	367,5	81,5	57,0	24,5	80,9	48,1	40,0	8,1	57,8	26,8	24,8	2,0	36,8	139,7	129,4	10,3	192,0

(*) — Valores integrados pela regra de Simpson.

de características cromáticas diferentes, po-
de-se determinar por subtração a intensidade
da radiação na faixa espectral compreendida
entre os mesmos.

Em face ao exposto, as seguintes combi-
nações de filtros nos permitiram detectar as
diferentes faixas do espectro solar de acordo
com o seguinte quadro :

Combinação	Faixa detectada (nm)	Faixa correspondente	Índice
sem filtro	270 — 2500	270 — 2500 ("branca")	—
sem filtro e OG 1	270 — 529	270 — 510 (violeta-azul)	1
OG 1 e RG 2	529 — 623	510 — 610 (verde-amarela)	2
RG 2 e RG 8	623 — 686	610 — 700 (vermelha)	3
RG 8	686 — 2500	700 — 2500 (infra-vermelha)	4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

É muito difícil nesta época do ano ocorrer
em Manaus um dia que se apresente total-
mente sem nuvens, assim trabalhando no in-
tervalo do dia 20-7-78 a 10-8-78 obteve-se
uma manhã praticamente sem nuvens no dia
23-7 e uma tarde nas mesmas condições no
dia 3-8.

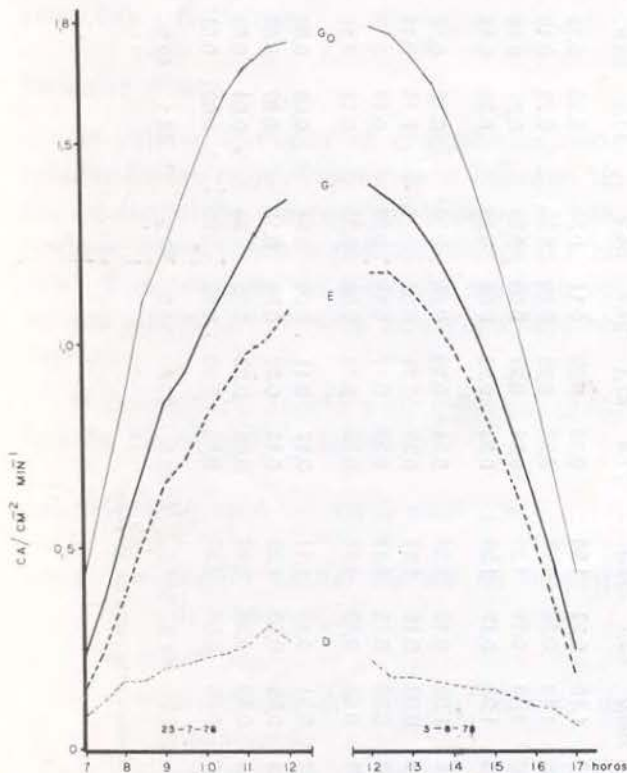


Fig. 1 — Distribuição horária da radiação extra-terrestre (G_0), global (G), direta (E), e difusa (D). Período da manhã para o dia 23-7-78 e o da tarde para 3-8-78. Manaus

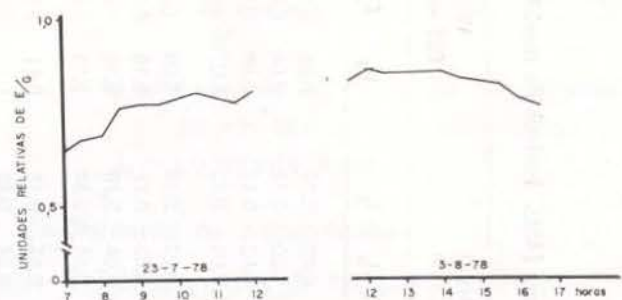


Fig. 2 — Variação horária da razão E/G

No quadro 1 estão indicados os valores instantâneos obtidos da radiação global (G), direta (E), difusa (D) e recebida perpendicularmente aos raios (I) para a energia total do espectro solar, bem como os valores correspondentes para as diversas faixas espectrais analisadas.

A Figura 1 apresenta os valores de G, E e D. A curva envolvente (G_0) indica a radiação incidente em uma superfície horizontal fora da atmosfera.

Os totais de radiação global recebidos nos períodos da manhã e tarde foram de $268,70 \text{ cal.cm}^{-2}$ e $296,10 \text{ cal.cm}^{-2}$ respectivamente. Estima-se pois, que em um dia sem nuvens, nesta época do ano, devem chegar ao solo cerca de 570 cal.cm^{-2} .

Na Figura 2 está indicada a relação horária entre a radiação direta e a global ao nível do solo. O valor médio obtido no período da manhã foi de 77% e no da tarde de 85%.

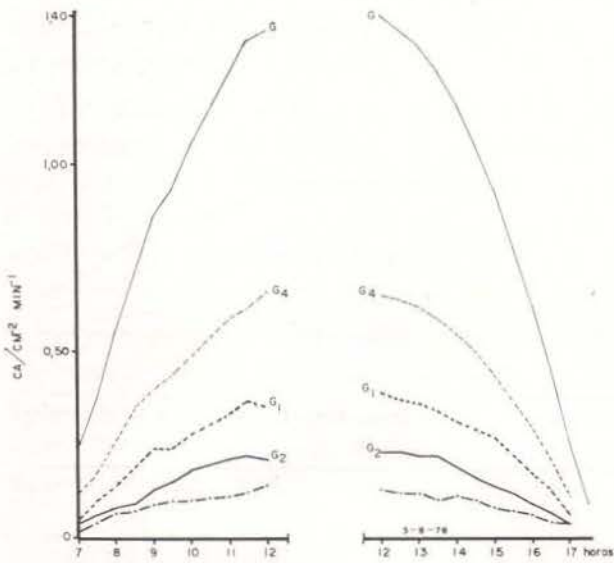


Fig. 3 — Distribuição espectral da radiação global. G — global total; G 1 — violeta azul; G 2 — verde — amarelo; G 3 — vermelho; G 4 — infra — vermelho

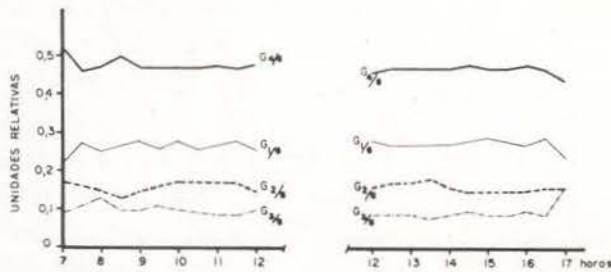


Fig. 4 — Relações entre as energias globais nas diversas faixas espectrais e a energia global total.

As curvas das Figuras 3 e 4 descrevem o comportamento da radiação global nas diversas faixas espectrais estudadas. O infra-vermelho representa em média 47% da radiação global recebida tanto pela manhã quanto pela tarde. Com menores contribuições seguem-se as regiões do violeta-azul com 27%, a do verde-amarelo com 16% e a do vermelho que participa com cerca de 10% do total. Nota-se também, que a composição espectral da radiação global se mantém praticamente constante durante todo o período.

A Figura 5 apresenta a radiação direta decomposta nas diversas faixas analisadas. A contribuição média de cada uma delas (Figura 6) segue a mesma ordem daquela apresentada para a radiação global, sendo 51% para

o infra-vermelho, 23% para o violeta-azul, 16% para o verde-amarelo e 10% para o vermelho. A composição espectral da radiação direta está sensivelmente enriquecida pelo infra-vermelho para ângulos zenitais aproximadamente maiores que 50°, (que corresponde aos períodos antes das 9:00h e depois das 15:00h).

A composição espectral da radiação difusa (Figura 7) apresenta-se formada, respectivamente nos períodos da manhã e da tarde, de 39% e 55% pela faixa violeta-azul, de 36% e 23% pela infra-vermelha, de 15% e 18% pela verde-amarela e de somente 10% e 4% pela faixa vermelha. Apesar dos períodos não serem de um mesmo dia, a sensível

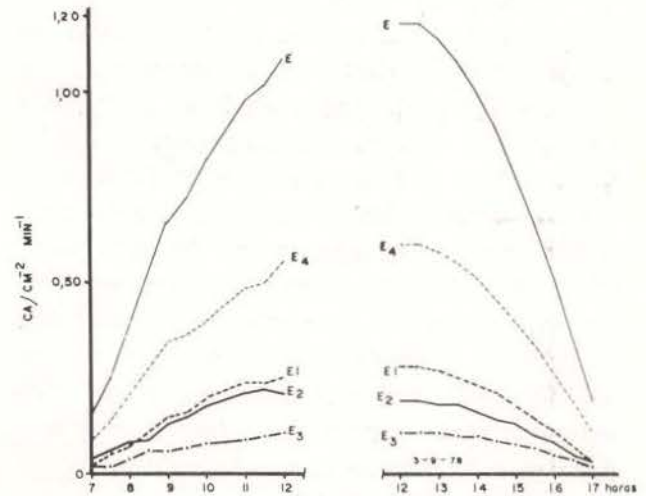


Fig. 5 — Distribuição espectral da radiação direta: E — direta total; E 1 — violeta - azul; E 2 — verde - amarela; E 3 — Vermelha; E 4 — infra — vermelha.

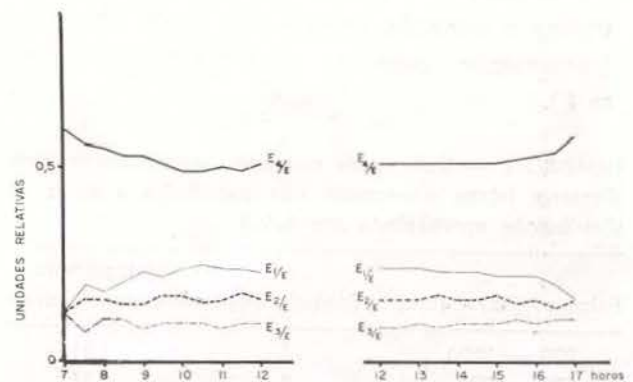


Fig. 6 — Relações entre as energias diretas nas diversas faixas espectrais e a energia direta total

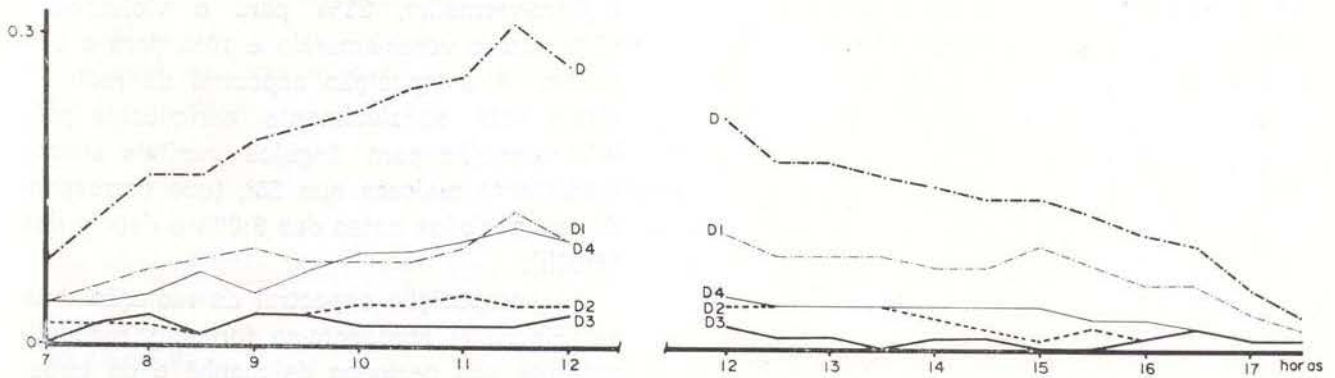


Fig. 7 — Distribuição espectral da radiação difusa. D — difusa total; D 1 — violeta — azul; D 2 — verde — amarela; D 3 — vermelha; D 4 — infra — vermelha

diferença entre os valores médios da parte da manhã e da tarde devem estar relacionados com as modificações da composição, da baixa atmosfera durante o transcorrer do dia.

A maior participação da faixa violeta-azul na radiação difusa, concorda com os dados da literatura, já que as moléculas formadoras do ar atmosférico interagem, preferencialmente, com os comprimentos de onda desta faixa intensificando, portanto, o seu espelhamento (scattering). Ademais, com o aumento do número de moléculas de água no ar, observa-se uma maior absorção da faixa infra-vermelha fazendo com que a importância desta faixa seja à tarde cerca da metade daquela do período da manhã.

O quadro 2 apresenta os valores de radiação extra-terrestre integrada nas diversas faixas espectrais analisadas (J_i). Substituindo-se os valores de J_i e I_i na equação (4) obtivemos a variação horária dos coeficientes de transmissão para as diversas faixas (Figura 8).

QUADRO 2 — Valores da radiação extra-terrestre nas diversas faixas espectrais (J_i) calculados a partir da distribuição apresentada em S.M.T.

Faixa espectral (nm)	Símbolo (J_i)	Intensidade cal. $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$
270 — 2500	J_0	1,91
270 — 529	J_1	0,51
529 — 623	J_2	0,24
623 — 686	J_3	0,16
686 — 2500	J_4	0,99

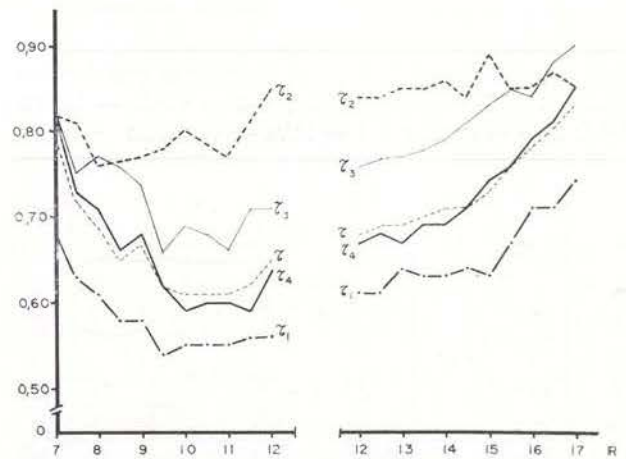


Fig. 8 — Coeficientes de transmissão para diversas faixas espectrais: 1 — total; 1₁ — violeta - azul; 1₂ — verde - amarela; 1₃ — vermelha; 1₄ — infra - vermelha.

CONCLUSÕES

A razão entre a radiação direta e a global foi em média 77% para o período da manhã e 85% para o período da tarde.

A composição espectral da radiação solar global mantém-se aproximadamente constante durante o período, sendo repartida em média 47% (infra-vermelho), 27% (violeta-azul), 16% (verde-amarelo) e 10% (vermelho). Uma distribuição percentual praticamente idêntica foi observada para a radiação direta.

No que diz respeito à distribuição espectral da radiação difusa, observou-se uma variação acentuada entre os períodos da manhã

e da tarde sendo 39 e 55% no violeta-azul, 36 e 23% no infra-vermelho e 15 e 18% na faixa verde-amarela.

Os valores médios dos coeficientes de transmissão estimados para os períodos da manhã e da tarde foram respectivamente 0,66 e 0,75 (radiação total), 0,58 e 0,67 (violeta azul), 0,78 e 0,86 (verde-amarelo), 0,66 e 0,75 para o infra-vermelho.

As determinações realizadas neste trabalho devem ser válidas para os dias limpos da estação seca, período no qual as características óticas das massas de ar predominante devem ser idênticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a pesquisadora Maria de Nazaré Góes Ribeiro, chefe do Setor de Meteorologia do INPA, pelo apoio durante a execução do trabalho.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da FINEP (Projetos FINEP-USP IF/437 e FINEP 447/CT) e da OEA (Projeto OEA-INPA: Utilização dos Recursos das Zonas Tropicais Úmidas — Ecologia da Floresta Tropical.

SUMMARY

Measurements of global and direct solar radiation utilizing OG-530, RG-630 and RG-695 filters were performed at INPA-Manaus. The equipment used for

these measurements was a set of Eppley Pyranometers. The signals were recorded with a Leeds and Northrup potentiographs. The measurements were performed during two clear days. With the data obtained it was possible to estimate the hourly variation of the atmospheric transmission coefficients corresponding to each spectral band. An hourly distribution of the global, direct and diffuse fluxes of solar radiation is presented.

BIBLIOGRAFIA

- LIST, R.J.
1966 — Smithsonian meteorological tables. 6 ed. Washington, Smithsonian Institution press. 527 p. **Smithsonian Miscellaneous Collections**, vol. 114.
- MOTA, F.S.; BEISDORF, M.I.C. & ACOSTA, J.C.
1977 — Estimates of Solar Radiation in Brasil. **Agricultural Meteorology**, 18 : 241-254.
- VILLA NOVA, N.A. & SALATI, E.
1977 — Radiação Solar no Brasil. Anais do II Simpósio Anual da Academia de Ciências do Estado de São Paulo. **Publicação ACIESP** (6) : 27-61.
- VILLA NOVA, N.A.; SALATI, E. & MATSUI, E.
1976a — Estimativa da evapotranspiração da bacia Amazônica. **Acta Amazonica**, 6(2) : 215-228.
- VILLA NOVA, N.A.; SALATI, E.; SANTOS, J.M. & RIBEIRO, M.N.G.
1976b — Coeficientes de transmissão de radiação solar em Manaus em junho. **Acta Amazonica**, 6(3) : 319-322.
- VILLA NOVA, N.A.; RIBEIRO, M.N.G.; NOBRE, C.A. & SALATI, E.
1978 — Radiação solar em Manaus. **Acta Amazonica**, 8(3) : 417-421.

(Aceito para publicação em 07/05/79)