

# DEPENDÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CÉU NAS IRRADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA DO ESPECTRO INFRAVERMELHO EM BOTUCATU/SP/BRASIL

Taiza Juliana Rossi – taizarossi@fca.unesp.br

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Cícero Manoel dos Santos – ciceromanoel@fca.unesp.br

Maurício Bruno Prado da Silva – mauricio.prado19@hotmail.com

Enzo Dalpai-edalpai@fca.unesp.br

Departamento de Engenharia Rural – FCA/UNESP – Botucatu/SP/Brasil

**Resumo.** O trabalho descreve a obtenção de equações lineares para quatro coberturas de céu, as quais expressam a dependência das variações das concentrações da nebulosidade, vapor de água e aerossóis na atmosfera nas razões  $H_{GIV}^d/H_G^d$ ,  $H_{dIV}^d/H_d^d$  e  $H_{DIV}^d/H_D^d$ . O valor da fração  $H_{GIV}^d/H_G^d = 43,3\%$  é menor na cobertura nebulosa, enquanto que  $H_{GIV}^d/H_G^d = 46,9\%$  é maior na céu aberto. Ao contrário, a fração  $H_{dIV}^d/H_d^d = 41,0\%$  é maior na cobertura nebulosa, enquanto que a  $H_{dIV}^d/H_d^d = 25,0\%$  é menor na de céu aberto. O valor da fração  $H_{DIV}^d/H_D^d$  não varia em função da cobertura de céu: a razão  $H_{DIV}^d/H_D^d = 51,0\%$ , é igual nas coberturas nebulosa e aberta.

**Palavras-chave:** radiações solares global, difusa e direta, radiação infravermelha

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre as frações solares UV, PAR e IV no espectro total, no tempo e espaço, é importante em muitas áreas científica e tecnológica. A fração UV-global (0,28 a 0,385  $\mu\text{m}$ ) da radiação solar global G ( $K_{UV} = UV/G$ ) tem sido investigada em muitos países (Robaa, 2004, Cañada et al, 2003, Martinez-Lozano et al, 1999, Jacovides et al, 2006, Ogunjobi e Kim, 2004 e Escobedo et al, 2009 e 2011, Leal et al., 2011, Porfírio et al., 2012) entre outros. Os resultados mostram que a fração UV/G é altamente dependente das variações da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera do local, e seu valor varia entre 2.0 % a 9.5 %. Estudos sobre as frações UV-difusa na difusa total ( $UV_d/d$ ) ou UV- direta na radiação direta total ( $UV_D/D$ ) há pouca informação na literatura.

Igualmente, a fração PAR (0,385-0,7  $\mu\text{m}$ ) da radiação solar global G ( $K_{PAR} = PAR/G$ ) também já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas (Jacovides et al. 2007; Finch et al.2004; Rao 1984; de Papaioannou et al. 1996 e Escobedo et al 2009 e 2011). Os resultados mostram que a  $K_{PAR}$  – global também depende do clima local e a fração PAR/G varia entre 40.8% a 63.1%. Estudos com a radiação PAR- direta na radiação direta ( $PAR_D/D$ ) bem como da fração PAR-difusa na radiação difusa ( $PAR_d/d$ ) mostram dependência das variações da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera do local (Karalis, 1989, Alados, I., Alados-Arboledas, 1999).

A radiação IV (0,7 – 3,0  $\mu\text{m}$ ) é usada na técnica observacional por satélites e em aplicações nas áreas biológicas e agrônomicas. O efeito biológico da radiação IV nas plantas é importante para o desenvolvimento vegetativo da cultura como germinação das sementes, alongamento, floração e coloração dos frutos. A fração IV da radiação global G ( $K_{IV} = IV/G$ ) foi menos estudada que as demais radiações espectrais, e ainda há poucas informações sobre observações experimentais simultâneas das duas radiações na superfície terrestre. Estudos com a radiação IV-global mostram que a fração  $K_{IV}$  depende das condições de cobertura de céu, principalmente da presença de vapor de água na atmosfera, e varia entre 44,0% na cobertura de céu nublado a 51,5% na cobertura de céu aberto (Escobedo et al 2009). Para todas as coberturas de céu juntas, a fração  $K_{IV}$  varia entre 46.9% a 51.0%, como mostram os trabalhos de Bolsenga (1997; Zhang (2000), Escobedo et al., (2011). Similarmente a radiação UV, existem poucos estudos com as frações IV-difusa na difusa total ( $IV_d/d$ ) e IV- direta na direta total ( $IV/D$ ). Resultados recentes obtidos por Rossi et al (2015) mostram que para todos as coberturas de céu, a fração IV-difusa na difusa total ( $IV_d/d$ ) e a fração IV- direta na direta total ( $IV/D$ ) em Botucatu são da ordem de 38,2% e 51,1% respectivamente. Análise sazonal mostrou ainda que em relação à fração anual  $IV_d/d = 38,2\%$ , a fração sazonal  $IV_d/d$  é maior na primavera (40,1%), igual no verão (38,2%), e menores no outono (34,9%) e inverno (33,9%). Similarmente, em relação à fração anual  $IV/D = 51,1\%$ , a fração sazonal  $IV/D$  é menor no verão (49,0%) e primavera (49,3%), e maior no outono (52,7%) e inverno (53,9%).

Diante da necessidade de se conhecer melhor as relações entre as radiações dos espectros total e IV, neste trabalho é apresentado um estudo sobre os efeitos da cobertura de céu nos valores das razões das irradiações global, difusa e direta infravermelha nas irradiações global, difusa e direta do espectro total, para uma base de dados das radiações diárias G, d, IV-global e IV-difusa medidas em Botucatu, SP, Brasil no período de 4 anos, 2003 a 2006.

## 2. MATERIAS E METODOS

### 2.1 Análise climática local

A variabilidade dos valores das radiações global, difusa e direta na horizontal dos espectros total e infravermelho está fortemente associada às variações do clima local. O clima local é classificado como Cwa (Cepagri, 2012), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. As Fig. 1a, 1b, 1c e 1d mostram as séries climáticas da temperatura, umidade relativa, precipitação e nebulosidade, do período de 1970 a 2008 em Botucatu. A evolução anual da temperatura e umidade relativa Fig. 1a, mostra que fevereiro é mês mais quente e julho é o mais frio do ano, com temperaturas médias de 22,5 °C e 16,8 °C, respectivamente. Os meses de janeiro e agosto são mais e o menos úmidos, com percentuais de 76,5% e 61,20% respectivamente.

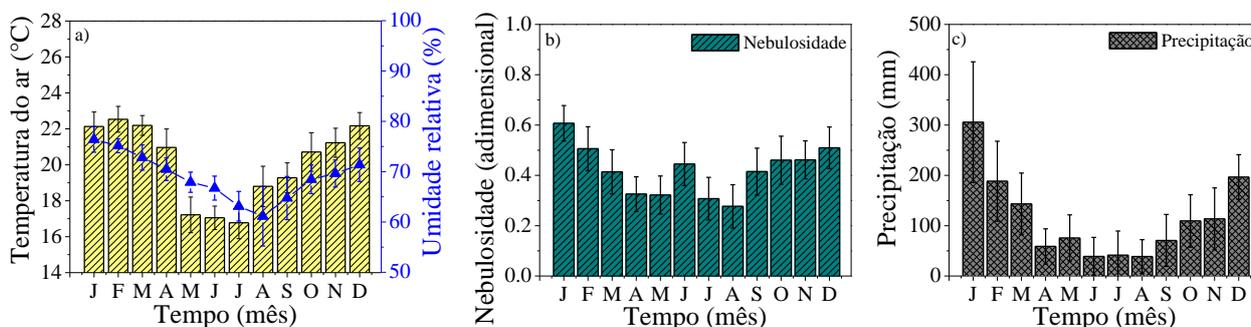


Figura 1 - Séries Climáticas da Temperatura e Umidade Relativa (a), Nebulosidade (b), Precipitação (c) do período de 1970 a 2008.

A nebulosidade ( $f$ ), calculada pela expressão  $f=1-(n/N)$ , expressa a fração do número de horas em que o sol fica encoberto por nuvens no dia, onde  $(n/N)$  é a razão de insolação,  $n$  é o número de horas de brilho solar e  $N$  é o fotoperíodo. A nebulosidade Fig. 1 b é mais elevada nos meses de janeiro ( $f = 0,61$ ) e menor em agosto ( $f = 0,28$ ). Por outro lado, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h, respectivamente.

A evolução anual da precipitação Fig. 1c segue a evolução da nebulosidade, e é constituído de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação de 100 mm, aproximadamente. No período chuvoso, de outubro a março (primavera e verão), a precipitação é de natureza microclimática originada do processo de convecção livre e macro-climáticas originadas dos eventos meteorológicos como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. O ZCAS atua desde a Bacia Amazônica até o oceano Atlântico Sul, como resultado da convergência de massas de ar quente e úmido oriundas da Bacia Amazônica e do oceano Atlântico Sul. O ZCAS gera aumento da nebulosidade e ocorrência de chuvas intensas e persistentes entre a primavera e verão (Carvalho et al., 2004). A frequência de ocorrência é de duas a quatro vezes ao ano, com duração média de 8 dias e de intensidade variável (Nogués-Paegle e Mo, 1997). A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 304 mm e a menor em junho e agosto com 38,8 mm.

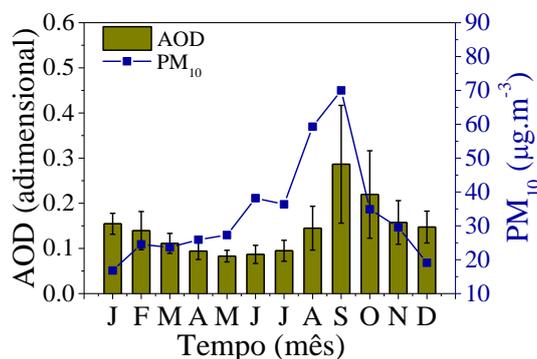


Figura 2 - Relação entre a evolução anual da profundidade ótica de aerossóis AOD médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005. Relação entre e a concentração de materiais particulados PM<sub>10</sub> em µg.m.

No período seco, de abril a setembro (outono e inverno), a precipitação é do tipo frontal originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região sudeste durante o outono, inverno. A distribuição da chuva frontal gera aumento na nebulosidade com ocorrência de chuvas generalizada na região. A intensidade da precipitação é fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria, e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente. ( Satyamurty et al., 1998). Segundo Lemos & Calbete

(1996), ocorrem em média 5 eventos de sistemas frontais por mês no Estado de São Paulo. A menor precipitação no período seco ocorre em agosto com 38,2 mm.

Ainda nos meses de seca, de junho à novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar. A evolução anual das médias mensais da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005 mostra que no início das queimadas da cana de açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de AOD = 0.45 em setembro, o que é equivalente à concentração PM<sub>10</sub> de 70.0 µg.m<sup>-3</sup> (Fig. 2) (Codato *et al.*, 2008).

## 2.2 Medida das radiações global e difusa dos espectros total e infravermelho

As medidas das radiações globais e difusas dos espectros totais e infravermelhas foram realizadas nos anos de 2003 a 2006, na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP da UNESP. As irradiâncias global do espectro total e infra-vermelho ( $I_G^d$  e  $I_{GIV}^d$ ) foram medidas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de 0,285 a 3,0 µm e 0,70 a 3,0 µm respectivamente. As irradiâncias difusas ( $I_d^d$  e  $I_{dIV}^d$ ) foram monitoradas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de 0,285 a 3,0 µm e 0,70 a 3,0 µm respectivamente, utilizando anéis de sombreamento tipo **MEO** (Melo e Escobedo, 1994) com as seguintes especificações: 80 cm de diâmetro, 10 cm de largura e 1 mm de espessura. O sistema operacional do anel de sombreamento **MEO** é inverso do anel de sombreamento de **Drummond**: ao invés da translação do anel, as variações na declinação solar são compensadas por meio da translação do piranômetro numa base móvel mantido sempre à sombra do anel. No sistema **MEO** o anel fixo é inclinado na latitude local, onde eixo central do anel é paralelo a direção polar.



Figura 3 - Piranômetro medindo A global total; b)piranômetro com anel de sombreamento medindo a difusa; c) piranômetro medindo a IV, e d) piranômetro com anel de sombreamento medindo a difusa infravermelho.

A medida da radiação difusa necessitou de correções para compensar a parcela de radiação difusa obstruída pelo próprio anel, os quais dependem fortemente de vários parâmetros, tais como: largura e diâmetro, latitude, declinação solar entre outros. Assim a radiação difusa medida pelo anel de sombreamento **MEO** neste trabalho passou primeiramente por um processo de correção denominado isotrópico (FC), as quais fazem correções em função da geometria do anel de sombreamento, do local e dia. O fator de correção isotrópico (FC usado para compensar as radiações difusa interceptada pelo anel de sombreamento **MEO**, foram calculados pelas expressões:

$$FC = [1 - (H'_d/H_d)]^{-1} \quad (1)$$

onde  $H_d$  ou  $H_{dIV}$  são as radiações difusas, enquanto que  $H'_d$  ou  $H'_{dIV}$  são as radiações difusas interceptadas durante o dia pelo anel de sombreamento.

A razão  $H'_d/H_d$  ou  $H'_{dIV}/H_{dIV}$  foram calculadas pela equação (2) proposta por Oliveira et al 2002 em função das dimensões do anel (largura e diâmetro) do dia (declinação solar) e local das medidas (latitude):

$$H'_d / H_d = \left( \frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[ \frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(z) d\omega \quad (2)$$

onde  $b$  e  $R$  são a largura e raio do anel,  $\delta$  é a declinação solar,  $\phi$  é a latitude,  $z$  é o ângulo zenital e  $\omega$  é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol. As incertezas das medidas das radiações difusas anel de sombreamento **MEO** em função do tipo de cobertura de céu são: 3,4% parcialmente nublada, 8,4% céu parcialmente nublado com dominância para claro e 12,0% céu aberto. Sobre todas as cobertura de céu juntas, a incerteza é da ordem de 4,6% (Dal Pai et al., 2011, 2014). Assim o erro da estimativa das irradiâncias direta e direta Infravermelha está associado à imprecisão das medidas de  $I_G$  e  $I_d$  pelos piranômetros da Eppley e à imprecisão das medidas de  $I_{GIV}$  e  $I_{dIV}$  pelos piranômetros PSP da Eppley, os quais possuem uma incerteza da ordem de 4,1% (Reda, 2008). Assim a radiação direta e direta Infravermelha obtida pelo método da diferença por meio das equações:  $I_D = I_G - I_d$  ou  $I_{DIV} = I_{GIV} - I_{dIV}$  possuem uma incerteza estimada de 12,8%.

Na aquisição dos dados, utilizou-se um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 5 minutos. Os dados de irradiancias passaram por um controle de qualidade onde foram eliminados os valores espúrios, e numa segunda etapa, foram processados as integrações das irradiações nas partições horária e diária (Chaves e Escobedo, 2000). A Estação de Radiometria Solar dispõe de um piranômetro da Eppley PSP, o qual é utilizado unicamente para aferição dos piranômetros de rotina, periodicamente pelo método comparativo sugerido pela OMM (Fröhlich e London, 1986).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Evolução temporal das radiações $H_G^d$ , $H_d^d$ e $H_D^d$ do espectro total e de $H_{GIV}^d$ , $H_{dIV}^d$ e $H_{DIV}^d$ do espectro IV

A evolução temporal de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  do espectro total e de  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  do espectro IV, período de 2003 a 2006 é periódica anualmente, e a sazonalidade, Fig. 4, é resultante das variações astronômica do sol (declinação solar) e climáticas (nuvens, vapor d'água e aerossóis) da atmosfera local.

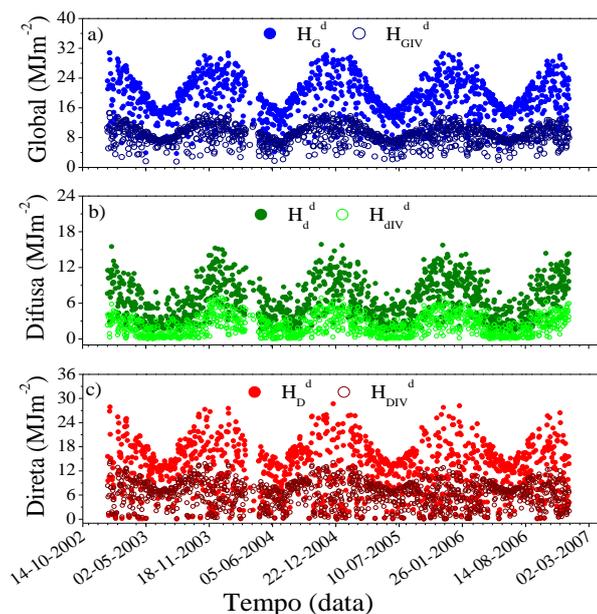


Figura 4 - Evolução das radiações global, direta e difusa diária do espectro total e IV.

Os valores de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  e das  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  são maiores no período chuvoso, primavera e verão, nas quais o sol declina mais próximo da latitude local e a atmosfera apresenta maiores concentrações de nuvens e vapor d'água no ano Fig. 1. Por outro lado, foram menores no período seco, outono e inverno, nas quais o sol declina mais distante da latitude local e a atmosfera possui as menores concentrações de nuvens e vapor d'água, e maior concentração de aerossóis Fig. 2. Os valores de  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  são inferiores respectivamente aos valores de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  porque o espectro IV está contido no espectro total. Em ambos os espectros, os valores das radiações decrescem em seqüência: global, direta e difusa. A evolução temporal em fase das radiações, Fig. 4, mostra claramente que as componentes do espectro IV:  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  estão altamente correlacionadas com as componentes do espectro total:  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$ , respectivamente, sugerindo então que os valores espectrais diários pode ser estimados diretamente dos valores do espectro total.

No período de 2003 a 2006, o valor de  $H_G^d$  variou de 3,73 MJ/m<sup>2</sup> a 31,4 MJ/m<sup>2</sup> com média total de 18,6 MJ/m<sup>2</sup> enquanto que o valor de  $H_{GIV}^d$  variou de 1,56 MJ/m<sup>2</sup> a 14,7 MJ/m<sup>2</sup> com média total de 18,6 MJ/m<sup>2</sup>. O valor de  $H_d^d$  variou de 1,1 MJ/m<sup>2</sup> a 15,9 MJ/m<sup>2</sup> com média total de 6,2 MJ/m<sup>2</sup>, enquanto que  $H_{dIV}^d$  variou de 0,005 MJ/m<sup>2</sup> a 7,0 MJ/m<sup>2</sup> com média total de 2,2 MJ/m<sup>2</sup>. O valor  $H_D^d$  variou de 0,001 MJ/m<sup>2</sup> a 28,7,0 MJ/m<sup>2</sup> com média total de 12,4 MJ/m<sup>2</sup>, enquanto que  $H_{DIV}^d$  variou de 0,02 MJ/m<sup>2</sup> a 14,2 MJ/m<sup>2</sup> com média total de 6,4 MJ/m<sup>2</sup>. Os valores médios sazonais de  $H_G^d$ , e  $H_{GIV}^d$ , de  $H_d^d$  e  $H_{dIV}^d$  e  $H_D^d$  e  $H_{DIV}^d$  por estação do ano, estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 - Valores sazonais para  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  do espectro IV e de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  do espectro total.

Estações	Radiações MJ/m <sup>2</sup>					
	$H_G^d$	$H_{GIV}^d$	$H_d^d$	$H_{dIV}^d$	$H_D^d$	$H_{DIV}^d$
Verão	21,1	9,4	8,3	3,1	12,8	6,3
Outono	16,1	7,6	4,2	1,3	11,9	6,3
Inverno	16,5	7,9	4,1	1,2	12,4	6,7
Primavera	21,2	9,6	8,5	3,3	12,6	6,3

Os resultados mostram que existe uma acentuada simetria entre os valores das radiações do período úmido, entre primavera e verão, bem como, do período seco, entre as estações outono e inverno. Essa simetria indica que os efeitos de absorção e espalhamento por nuvens, vapor de água e aerossóis na extinção das três radiações do espectro total e IV é praticamente igual entre as estações do período úmido, primavera e verão, e também entre as estações do período seco outono e inverno.

### 3.2 Correlações entre radiações global, difusa e direta dos espectros IV e Total para cobertura de céu total

As Fig. 5a, 5b e 5c mostram as correlações entre os valores de  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  do espectro IV e os valores de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  do espectro total, bem como a reta de regressão, respectivamente. As equações entre  $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$  (Fig. 2a),  $H_{dIV}^d$  e  $H_d^d$  (Fig. 2b) e  $H_{DIV}^d$  e  $H_D^d$ , Fig. 2c, são lineares em amplos intervalos de variações:  $H_G^d$  de 3,73 MJ/m<sup>2</sup> a 31,4 MJ/m<sup>2</sup>,  $H_d^d$  de 1,1 MJ/m<sup>2</sup> a 15,9 MJ/m<sup>2</sup>,  $H_D^d$  variou de 0,001 MJ/m<sup>2</sup> a 28,70 MJ/m<sup>2</sup>. As equações lineares (tipo Y = aX) obtidas das correlações mostradas nas Fig. 5a, 5b e 5c por meio de regressão com respectivos coeficientes de determinação  $R^2$  foram:

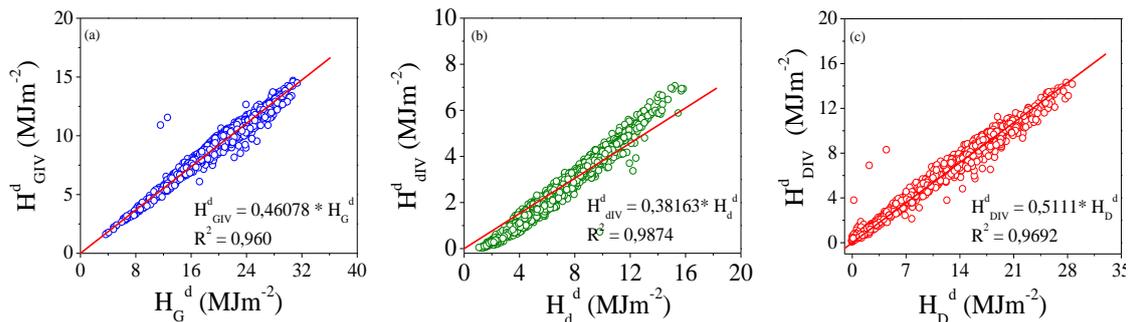


Figura 5 - Correlações entre os valores de  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  do espectro IV e os valores de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  do espectro total, respectivamente.

$$H_{GIV}^d = 0,461 H_G^d \quad (R^2 = 0,960) \quad (3); \quad H_{dIV}^d = 0,382 H_d^d \quad (R^2 = 0,987) \quad (4); \quad H_{DIV}^d = 0,511 H_D^d \quad (R^2 = 0,969) \quad (5)$$

Os coeficientes angulares das Eq. (3), (4) e (5),  $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,461$ ;  $H_{dIV}^d / H_d^d = 0,382$  e  $H_{DIV}^d / H_D^d = 0,511$  representam as frações das radiações global, difusa e direta do espectro IV das radiações global, difusa e direta do espectro total:  $K_{GIV}^d$ ,  $K_{dIV}^d$ , e  $K_{DIV}^d$  respectivamente. Os elevados valores de  $R^2$ , próximos de 100%, mostram que as radiações do espectro IV e total,  $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_d^d$ , e  $H_{DIV}^d$  e  $H_D^d$  estão estatisticamente muito bem correlacionados. A equação (3) mostra que de 100% da radiação global ( $H_G^d$ ) do espectro total que atingiu a superfície terrestre, 46,1% é do tipo infravermelha ( $H_{GIV}^d$ ). Os demais percentuais espectrais estão distribuídos para as radiações UV e PAR, cujas frações UV/G e PAR/G em Botucatu é da ordem de 4,2% e 49,0% respectivamente (Escobedo et al 2011). Para valores sobre todas as coberturas de céu, a fração IV/G constitui o percentual entre 46,9% a 51,0%, como mostram os trabalhos de Escobedo et al (2011) para Botucatu no Brasil; Zhang (2000) em Lhasa na China e Bolsenga (1997) em Thule na Groenlândia. Similarmente, as Eq. (4 e 5) mostram que dos 100% das radiações difusa ( $H_d^d$ ) e direta ( $H_D^d$ ) espectro total que atingem a superfície terrestre, os percentuais de 38,2% e 51,1% são radiações difusa ( $H_{dIV}^d$ ) e direta ( $H_{DIV}^d$ ) espectro infra-vermelho, respectivamente.

### 3.3 Efeito da cobertura de céu nos valores das frações: $H_{GIV}^d / H_G^d$ , $H_{dIV}^d / H_d^d$ e $H_{DIV}^d / H_D^d$

Para análise das variações das frações  $H_{GIV}^d / H_G^d$ ,  $H_{dIV}^d / H_d^d$  e  $H_{DIV}^d / H_D^d$  em função das variações da cobertura ou das variações das concentrações da nebulosidade, vapor de água e aerossóis na atmosfera, a base de dados das radiações foram separadas em função de Kt em quatro tipos de cobertura de céu (I, II, III e IV). O índice Kt, denominado transmissividade atmosférica da radiação global, é um importante parâmetro meteorológico, definido como sendo a relação entre a radiação global na superfície terrestre  $H_G^d$  e a radiação extraterrestre  $H_0^d$  ou  $Kt = H_G^d / H_0^d$ . O indicativo Kt é o principal indicador da atenuação dos constituintes atmosféricos. A cobertura I- representa céu nebuloso (CN) com  $Kt < 0,35$ ; cobertura II- céu parcialmente nublado com dominância para difuso (CPN1) com  $0,35 < Kt < 0,55$ ; cobertura III- céu parcialmente nublado com dominância para claro (CPN2) com  $0,55 < Kt < 0,65$  e cobertura IV- céu aberto ou sem nuvens (CA) com  $Kt > 0,65$  (Escobedo et al 2009).

As Fig. 6a, 6b, 6c e 6d, mostram as correlações entre os valores de  $H_{GIV}^d$  do espectro IV e os valores de  $H_G^d$ , do espectro total respectivamente nas coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente. Similarmente as correlações anuais, as correlações por cobertura de céu entre  $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$  são lineares em amplos intervalos de variações. As equações (Tab. 2), com elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ), foram obtidas similarmente as equações anuais por meio das relações ( $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$ ) - Fig. 6a, 6b, 6c e 6d para cada cobertura de céu com melhores resultados estatisticamente em seqüência para as coberturas I, IV, II e III.

O valor da fração  $H_{GIV}^d / H_G^d$  cresce no sentido em que a transmissividade das  $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$  aumenta na cobertura de céu nebuloso para aberto. Ou seja, da fração  $H_{GIV}^d / H_G^d$  cresce no sentido em que as concentrações da nebulosidade e o vapor de água, decrescem na atmosfera. A fração  $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,434$  ou 43,3% é a menor que os valores das demais coberturas porque a absorção pelo vapor de água na cobertura nebulosa é desproporcional, é maior para  $H_{GIV}^d$  que  $H_G^d$ , diminuído os valores da fração  $H_{GIV}^d / H_G^d$  (Martinez-Lozano, 1999).

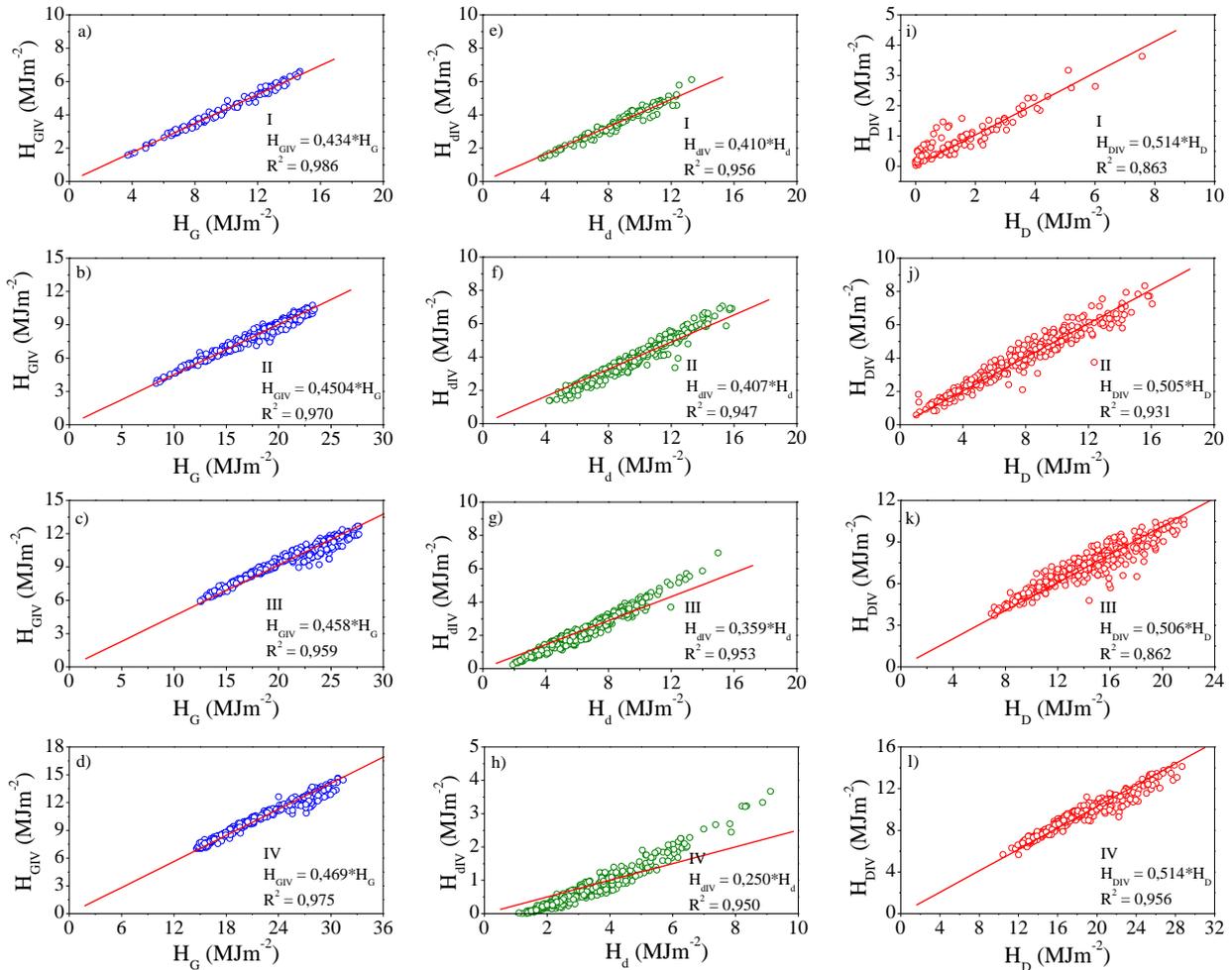


Figura 6 - (a) Correlações entre os valores de  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{dIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$ , do espectro IV e os valores de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  do espectro total nas coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente.

Tabela 2 - Equações por cobertura de céu para  $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$

Cobertura de céu	Equação	$R^2$
I	$H_{GIV}^d = 0,434 H_G^d$	0,986
II	$H_{GIV}^d = 0,450 H_G^d$	0,970
III	$H_{GIV}^d = 0,458 H_G^d$	0,959
IV	$H_{GIV}^d = 0,469 H_G^d$	0,975
Total	$H_{GIV}^d = 0,461 H_G^d$	0,960

A fração  $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,469$  ou 46,9% é maior nas estações de céu claro e seca (baixa concentração de vapor de água e com aerossóis), por que a baixa absorção de  $H_{GIV}^d$  e  $H_G^d$  pelo vapor de água, e o alto espalhamento pelos aerossóis é desproporcional, é menor ou mais lenta, para  $H_{GIV}^d$  que para  $H_G^d$ , aumentando o valor da fração  $H_{GIV}^d / H_G^d$ . O espalhamento não proporcional na cobertura de céu por aerossóis deve-se ao fato que comprimentos de onda curtos são preferencialmente extintos (Alados e Arboledas 1999)

As Fig. 6e, 6f, 6g e 6h, mostram as correlações entre os valores  $H_{dIV}^d$  do espectro IV e os valores de  $H_d^d$  do espectro total respectivamente nas coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente. Similarmente as correlações anuais, as equações (Tab. 3) por cobertura de céu entre  $H_{dIV}^d$  e  $H_d^d$  são lineares em amplos intervalos de variações com melhores resultados estatisticamente em seqüência para as coberturas I, III IV e II.

O valor da fração  $H_{dIV}^d / H_d^d$  decresce no sentido em que a cobertura de céu nebuloso tende para aberto. Ou seja, da fração  $H_{dIV}^d / H_d^d$  diminui no sentido em que as concentrações de nuvens e o vapor de água, decrescem na

atmosfera. A fração  $H_{DIV}^d / H_d^d = 0,250$  ou 25,0% é a menor na cobertura céu claro e maior  $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,410$  ou 41% é maior na cobertura de céu nebulosa.

Tabela 3 - Equações por cobertura de céu para  $H_{DIV}^d$  e  $H_d^d$ .

Cobertura de céu	Equação	R <sup>2</sup>
I	$H_{DIV}^d = 0,410 H_d^d$	0,956
II	$H_{DIV}^d = 0,407 H_d^d$	0,947
III	$H_{DIV}^d = 0,359 H_d^d$	0,953
IV	$H_{DIV}^d = 0,250 H_d^d$	0,950
Total	$H_{DIV}^d = 0,382 H_d^d$	0,987

Os valores das frações  $H_{DIV}^d / H_d^d$  são maiores nas estações nebulosas e úmidas, por que a extinção de  $H_{DIV}^d$  e  $H_d^d$  é desproporcional, é maior para  $H_d^d$  que para  $H_{DIV}^d$ , aumentando os valor da fração  $H_{DIV}^d / H_d^d$ . Por outro lado, os valores das frações  $H_{DIV}^d / H_d^d$  são menores nas estações de baixa nebulosidade e seca com aerossóis, por que o espalhamento de  $H_{DIV}^d$  e  $H_d^d$  pelos aerossóis é maior para  $H_d^d$  que para  $H_{DIV}^d$ , diminuindo o valor da fração  $H_{DIV}^d / H_d^d$  (Alados e Arboledas 1999).

As Fig. 6i, 6j, 6k e 6l, mostram as correlações entre os valores de  $H_{DIV}^d$  do espectro IV e os valores de  $H_D^d$  do espectro total respectivamente nas cobertura de céu I, II, III e IV respectivamente. Similarmente as correlações anuais, as Eq. (9) – Tab. 3- por cobertura de céu entre  $H_{DIV}^d$  e  $H_D^d$  são lineares em amplos intervalos de variações com melhores resultados estatisticamente em seqüência para as coberturas: IV, II, I, III.

Tabela 4 - Equações por cobertura de céu para  $H_{DIV}^d$  e  $H_D^d$ .

Cobertura de céu	Equação	R <sup>2</sup>
I	$H_{DIV}^d = 0,514 H_D^d$	0,863
II	$H_{DIV}^d = 0,506 H_D^d$	0,931
III	$H_{DIV}^d = 0,506 H_D^d$	0,862
IV	$H_{DIV}^d = 0,514 H_D^d$	0,956
Total	$H_{DIV}^d = 0,511 H_D^d$	0,969

Os valores das frações  $H_{DIV}^d / H_D^d$  das 4 coberturas de céu em relação ao valor da fração total  $H_{DIV}^d / H_D^d = 0,511$  ou 51,1%, são aproximadamente iguais e dentro da margem dos desvios estatísticos e dos erros experimentais.

#### 4. CONCLUSÕES

Dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho pode-se concluir que os valores de  $H_G^d$ ,  $H_d^d$  e  $H_D^d$  do espectro total e de  $H_{GIV}^d$ ,  $H_{DIV}^d$  e  $H_{DIV}^d$  do espectro IV dependem das variações astronômicas e climáticas: são maiores na primavera e verão, condições atmosférica de maior concentrações de nuvens e vapor de água, e são menores no outono e inverno, condição atmosférica de céu claro e baixa concentrações de, vapor de água e alta concentração de aerossóis. As equações anuais obtidas por regressão linear tipo  $Y = aX$  apresentaram os seguintes frações:  $H_{GIV}^d / H_G^d = 0,461$ ;  $H_{DIV}^d / H_d^d = 0,382$  e  $H_{DIV}^d / H_D^d = 0,511$  com elevados coeficientes de determinação:  $R^2 = 0,960$ ,  $R^2 = 0,987$ ,  $R^2 = 0,969$  respectivamente. O valor da fração  $H_{GIV}^d / H_G^d$  cresce no sentido da cobertura de céu nebuloso para céu aberto. O valor da fração  $H_{DIV}^d / H_d^d$  decresce no sentido da cobertura de céu nebuloso para céu aberto. O valor da fração  $H_{DIV}^d / H_D^d$  varia muito pouco no sentido da cobertura de céu nebuloso para céu aberto.

#### Agradecimentos:

A FAPESP e CNPq.

#### REFERÊNCIAS

- Alados, I., Alados-Arboledas, L. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agric. and For. Meteorol.*, v.93, p.27-38, 1999.
- Bolsenga SJ, Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology*, 1997, 6, 449-451.
- Cañada J, Pedros G, Bosca JV. Relationships between UV (0.290-0.385 $\mu$ m) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* 2003; 28:199-217.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, v. 17, p. 88-108, 2004
- CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_086.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html), acesso em 14/09/2012.
- Chaves M., Escobedo, J.F. A software to process daily solar radiation data. *Renewable Energy*, v19, n<sup>o</sup>1, p339-344, 2000.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. G.; Dal Pai, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, p.57-73, 2008.

- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, Dal Pai, E.; Santos M. C. Estimation of Hourly, Daily and Monthly mean Diffuse Radiation Based Shadowing Correction. *Energy Procedia* 57(2014) 1150 - 1159
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, F. H. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowing measuring method In: *ISES SOLAR WORLD CONGRESS 2011*, 2011 Kassel.
- Escobedo J. F., Gomes E., 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* 86, 299-309, 2009.
- Escobedo J. F., Gomes E. N., Oliveira A. P., Soares J. R. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy* 36, 169-178, 2011
- Finch DA, Bailey WG, McArthur LJB, Nasitwitwi M. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 2004;122:229-38.
- Fröhlich C, London J. Revised Instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications series No. 7. WMO/TD No. 149, October 1986.
- Jacovides CP, Assimakopoulos VD, Tymvios FS, Theophilou K, Asimakopoulos DN. Solar global UV radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy* 2006;31:2728-38.
- Jacovides CP, Tymvios FS, Assimakopoulos VD, Kaltsounides NA. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology* 2007;143:277-87.
- Karalis JD. Characteristics of direct photosynthetically radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 1989;48:225-34.
- Leal, S. S.; Tiba, C.; Piacentini, R. Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks. *Renewable Energy*, v.36, p.3337-3344, 2011.
- Lemos, C.F.; Calbete, N. O. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. **Climanálise**, Edição comemorativa 10 anos, 1996. (INPE-10717-PRE/6178).
- Martinez-Lozano JA, Tena F, Utrillas MP. Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology* 1999;19:903-11.
- Melo, J.M.D.; Escobedo, J.F. Medida da radiação solar difusa. VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. *Anais do Internacional Solar Energy Society*, v.1, 1994.
- Nogués-Paegle, J.; MO, K.C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon Wea Rev*, v. 125, p 279-291, 1997.
- Ogunjobi KO, Kim YJ. Ultraviolet and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research* 2004;71:193-214.
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v.5, p 698-708, 2002.
- Papayioannou G, Nikolidakis G, Asimakopoulos D, Retalis D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology* 1996;81:287-298.
- Papayioannou G, Papanikolaou N, Retalis D. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Theoretical and Applied Climatology* 1993;48:23-27.
- Porfirio, A. C. S.; Souza, J. L.; Lyra, G. B.; Lemes, M. A. M. An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil. *Energy*, v. 44, p.584-592, 2012.
- Rao CRN. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology* 1984;34:353-64.
- Reda, I.M.; Myers, D.R.; Stoffel, T.L. *Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers: NCSLI Measure*, *The Journal of Measurement Science*; 3(4), pp. 58-66, 2008.
- Robaa SM. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy* 2004;77:251-59.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P. L. Topics: South America. *Meteorological Monographs*, v.27, n.49, p.119-139, 1998.
- Rossi, T. J.; Escobedo, J. F.; Santos, C. M.; Silva, M. B. P.; Gomes, E. N. Equações de estimativas sazonais para as radiações global, difusa e direta infravermelha em Botucatu/SP/Brasil. *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 3, pp. 11.83-11.94, 2015.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P. L. Topics: South America. *Meteorological Monographs*, v.27, n.49, p.119-139, 1998.
- Zhang X, Zhang Y, Zhou Y. Measuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agricultural Meteorology* 2000;102:207-12.

## DEPENDENCE OF SKY CONDITIONS ON GLOBAL, DIFFUSE AND DIRECT IRRADIATIONS OF THE INFRARED SPECTRUM IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

**Abstract.** The study describes linear equations for four sky covers, which express the dependence of cloud, water vapour and aerosol variations in the atmosphere on the values of the ratios  $H_{GNIR}/H_G$ ,  $H_{dNIR}/H_d$  and  $H_{DNIR}/H_D$ . The value of the fraction  $H_{GNIR}/H_G = 43.3\%$  is lower in the cloudy cover, while  $H_{GNIR}/H_G^d = 46.9\%$  is higher in the clear sky condition. On the contrary, the fraction  $H_{dNIR}/H_d = 41.0\%$  is higher in the cloudy cover, while  $H_{dNIR}/H_d = 25.0\%$  is lower in the clear sky condition. No variation was found in the value of the fraction  $H_{DNIR}/H_D$  as a function of the sky cover. The ratio  $H_{DNIR}/H_D = 51.0\%$  is the same in the cloudy cover and clear sky condition.

**Key words:** global, diffuse and direct solar irradiances, infrared irradiation.