

DEPENDÊNCIA DA COBERTURA DE CÉU NAS FRAÇÕES SOLARES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA DO ESPECTRO INFRAVERMELHO EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

Taiza Juliana Rossi – taizarossi@fca.unesp.br

Luciano Ronaldo Rossi – ecofoco@live.com

Cícero Manoel dos Santos – ciceromanoel2007@gmail.com

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

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Engenharia Rural

Resumo. É descrito no trabalho a obtenção das frações solares $K_{GIV} = (H_{GIV}^d/H_G^d)$, $K_{dIV} = (H_{dIV}^d/H_d^d)$ e $K_{DIV} = (H_{DIV}^d/H_D^d)$ nas condições de cobertura de céu total e para quatro tipos discretos de coberturas de céu. A base de dados das radiações dos dois espectros foi medida no período de 2003 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. Os valores obtidos para cobertura de céu total foram: $K_{GIV}^d = 46,1\%$, $K_{dIV}^d = 38,2\%$ e $K_{DIV}^d = 51,1\%$. Nas coberturas discretas o valor da fração $K_{GIV} = 43,3\%$ foi menor na cobertura nebulosa, e $K_{GIV} = 46,9\%$ foi maior na cobertura céu aberto. Ao contrário, a fração $K_{dIV} = 41,0\%$ foi maior na cobertura nebulosa, e $K_{dIV} = 25,0\%$ foi menor na céu aberto. O valor da fração K_{DIV} não variou em função da cobertura de céu: $K_{DIV} = 51,0\%$ foi aproximadamente igual nas coberturas nebulosa e aberta.

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

1. INTRODUÇÃO

Estudos 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 da radiação global G ($K_{GUV} = UV/G$) na faixa de 0,280 a 0,385 μm 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; Escobedo et al., 2009; Escobedo et al., 2011; Leal et al., 2011; Porfírio et al., 2012) entre outros. Os resultados mostram que a fração K_{GUV} é altamente dependente das variações da concentração de nuvens, vapor de água e aerossóis na atmosfera do local, e seu valor varia entre 2,0 % a 9,5%. Estudos sobre a fração UV-difusa na difusa total ($K_{dUV} = UV_d/d$) ou sobre a fração UV-direta na radiação direta (UV_{DUV}/D) ainda possuem poucas informações na literatura. Igualmente, a fração PAR_G (0,385-0,7 μm) da radiação solar global G ($K_{GPAR} = PAR_G/G$) também já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas (Jacovides et al., 2007; Finch et al., 2004; Rao, 1984; Papaioannou et al., 1996; Escobedo et al., 2009; Escobedo et al., 2011). Os resultados mostram que a K_{GPAR} também dependem do clima local e entre 40,8% a 63,1%. Estudos com a radiação PAR_D - direta na radiação direta ($K_{DPAR} = PAR_D/D$) bem como da fração PAR_d -difusa na radiação difusa ($K_{dPAR} = PAR_d/d$) mostram dependência das variações da concentração de nuvens, vapor de água e aerossóis na atmosfera do local (Karalis, 1989; Alados e Alados-Arboledas, 1999).

A fração IV_G da radiação global G ($K_{GIV} = IV_G/G$) foi menos estudada que as demais radiações espectrais UV e PAR, e ainda há poucas informações sobre observações experimentais simultâneas das duas radiações (G e IV) na superfície terrestre. Estudos com a radiação IV_G global infravermelha na global total ($K_{GIV} = IV_G/d$) mostram que a fração K_{IV} depende das condições de cobertura de céu, e varia entre $K_{IV} = 44,0\%$ na cobertura de céu nublado a $K_{IV} = 51,5\%$ 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). Existem poucos estudos com as frações IV_d -difusa infravermelha na difusa total ($K_{dIV} = IV_d/d$) e IV_D -direta infravermelha na direta total ($K_{DIV} = IV_D/D$). Resultados recentes obtidos por Rossi et al. (2015) mostram que a fração K_{dIV} e K_{DIV} para todas as coberturas de céu, em Botucatu é da ordem de 38,2% e 51,1% respectivamente. Análise sazonal, mostrou ainda que a fração K_{dIV} é maior na primavera (40,1%), igual no verão (38,2%), e menores no outono (34,9%) e inverno (33,9%). Similarmente, a fração K_{DIV} 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 frações K_{GIV} , K_{dIV} e K_{DIV} para uma base de dados das radiações G, d, G_{IV} e d_{IV} medidas em Botucatu, SP, Brasil no período de 4 anos, 2003 a 2006. É apresentado e discutido uma análise estatística e climática das frações K_t , K_{GIV}^d , K_{dIV}^d e K_{DIV}^d . Posteriormente é mostrado os cálculos das regressões lineares usados para obtenção dos valores das frações K_{GIV}^d , K_{dIV}^d e K_{DIV}^d para coberturas de céu total e das 4 coberturas de céu discretas (nublado, parcialmente nublado para difuso, parcialmente

nublado para claro e aberto), e em último, é feito a comparação dos valores das frações total e por cobertura de céu discretas quantificando-se os efeitos das coberturas de céu.

2. MATERIAL E MÉTODOS

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. 1 (a, b, c e d) 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. 1 a) 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 o mais e o menos úmidos, com percentuais de 76,5% e 61,20% respectivamente.

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 229 h e 175,28 h, respectivamente.

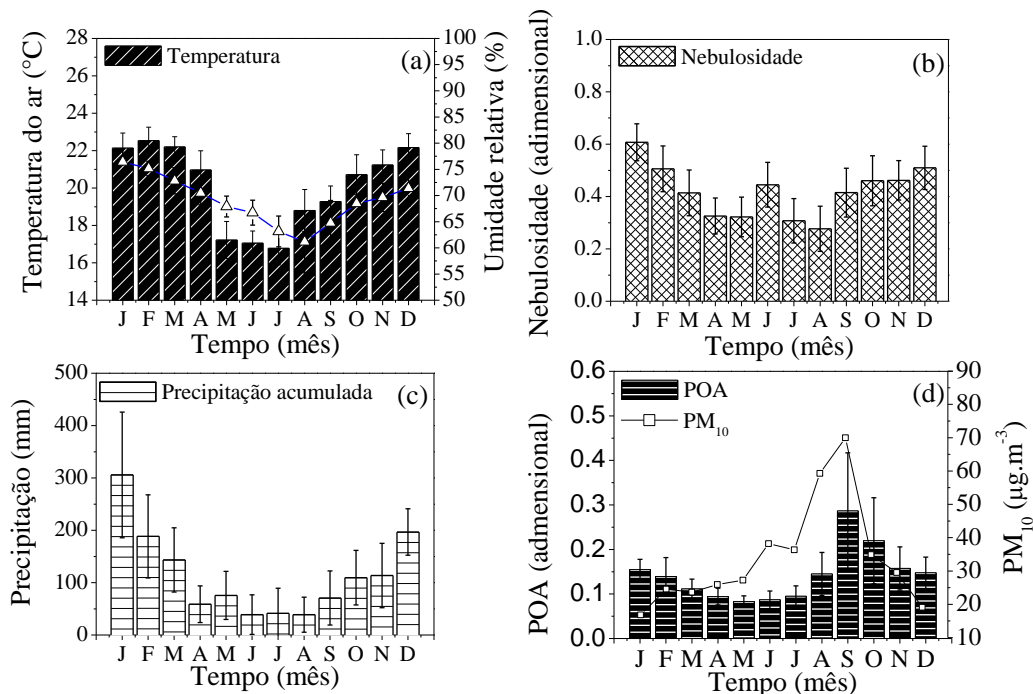


Figura 1 - Séries Climáticas (período: 1970-2008) da Temperatura e Umidade Relativa (a), Nebulosidade (b), Precipitação (c), Relação entre a evolução anual da Profundidade Ótica dos Aerossóis (POA) médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005 (d).

A evolução anual da precipitação (Fig. 1 c) 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 a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. A 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. A 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.

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. 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 da 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 e 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 a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar e as queimadas e incêndios florestais de outros locais na região central do Brasil (Teramoto et al., 2013). Em anos onde há o enfraquecimento do período chuvoso na região Central e Norte do Brasil, a prática dos incêndios se intensifica no mês de outubro e pode se estender até novembro (Holben et al., 2001). A queima de biomassa gera aerossóis do tipo fino (diâmetro < 2,5 µm), que por meio de correntes convectivas são capazes de percorrer distâncias superiores a 1000 km e permanecer em suspensão na atmosfera durante vários dias (Jacobson, 2002). A evolução anual das médias mensais da POA (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 POA = 0,45 em setembro, o que é equivalente à concentração PM₁₀ de 70,0µg.m⁻³ (Fig. 1 d) (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 infravermelho (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 3,0µm e 0,70 a 3,0µm 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: 80cm de diâmetro, 10cm de largura e 1mm 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 à direção polar.

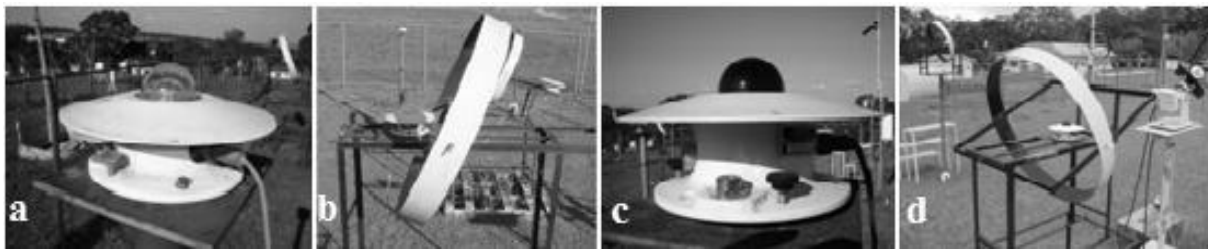


Figura 2 - a) Piranômetro medindo a global total; b) Piranômetro com anel de sombreamento medindo a difusa; c) Piranômetro medindo a IV, e d) Piranômetro com anel de sombreamento medindo a difusa infravermelho.

Os valores das irradiações difusa total e difusa IV passaram por correções isotrópicas (FC), para compensar a parcela de irradiação difusa obstruída pelo próprio anel de sombreamento, os quais dependem de parâmetros geométricos como: largura e diâmetro, latitude, geográfico como a latitude e astromico como a declinação solar. O fator de correção isotrópico (FC) usado para compensar as irradiações difusa total e difusa infravermelha foram calculados pela expressão:

$$FC = \left[1 - \left(\frac{H'_d}{H^d} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

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. razão H'_d/H_d ou H'_{dIV}/H_{dIV} foram calculadas pela Eq. (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):

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

Onde b e R são a largura e raio do anel, δ é a declinação solar, ϕ é a latitude, z é o ângulo zenital e ω é o ângulo horário do sol, variando do nascer até o pôr do sol.

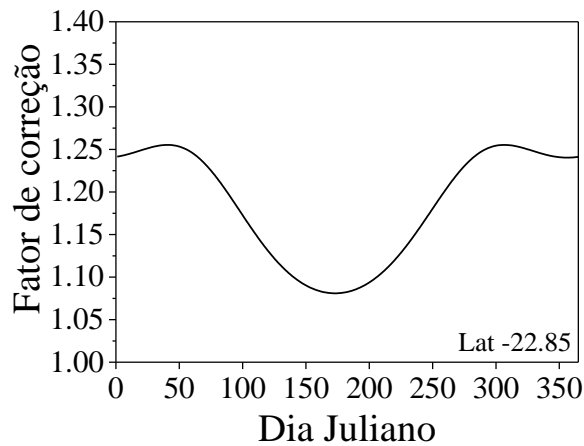


Figura 3 - Fator de correção isotrópico diário para o anel de sombreamento MEO para latitude de Botucatu ($\phi = 22,85^\circ\text{S}$) ao longo do ano para as radiações difusa Total e IV.

Não foi realizada neste trabalho, uma segunda correção, também necessária na medida da difusa pelo anel de sombreamento, que é devido aos efeitos da cobertura nebulosa e da anisotropia. O efeito da nebulosidade na cobertura de céu aumenta os valores de I^G , I^d , I^G_{IV} , I^d_{IV} em média 2,5% a radiação difusa, enquanto que o efeito da anisotropia diminui os valores de I^G , I^d , I^G_{IV} , I^d_{IV} no sentido crescente de céu parcialmente nublado para céu aberto. Segundo Dal Pai et al. (2011, 2014) a cobertura de céu parcialmente nublada diminui em 3,4%, céu parcialmente nublado com dominância para claro 8,4% e céu aberto 12,0%. Sobre todas as coberturas de céu juntas, a correção é da ordem de 4,6%. Portanto, a imprecisão das medidas pelos piranômetros PSP da Eppley, é da ordem de 4,1% (Reda, 2008). A imprecisão da medida da difusa pelo piranômetro no anel de sombreamento é da ordem de 8,7% dado por: 4,1% pelo piranômetro PSP da Eppley e 4,6% do efeito anisotrópico para cobertura total de céu. Assim as irradiancias direta e direta infravermelha obtida pelo método da diferença por meio das equações: $I^D = I^G - I^d$ ou $I^D_{IV} = I^G_{IV} - I^d_{IV}$ 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 diárias (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 DISCUSSÃO

3.1 Análise estatística e climática das frações K_t , K^d_{GIV} , K^d_{dIV} e K^d_{DIV}

Geralmente é comum expressar as medidas (horária ou diária) em função das irradiações espectrais como frações das componentes do espectro total, para melhor detectar as relações entre as irradiações espectrais e total. A evolução temporal das frações $K_t = (H^d_G/H^d_O)$, $K^d_{GIV} = (H^d_{GIV}/H^d_G)$, $K^d_{dIV} = (H^d_{dIV}/H^d_d)$ e $K^d_{DIV} = (H^d_{DIV}/H^d_D)$ período de 2003 a 2006, Fig. 4, é periódica, e a sazonalidade é resultante das variações climáticas por meio das variações das concentrações de nuvens, vapor de água e aerossóis da atmosfera local do ano. A Figura 4 (a, b, c, d) mostra que a nebulosidade é o parâmetro meteorológico mais efetivo na variabilidade das frações K_t , K^d_{GIV} , K^d_{dIV} e K^d_{DIV} . Os valores das K^d_{GIV} e K^d_{DIV} (Fig. 4 a e Fig. 4 c), acompanham os valores de K_t (Figura 4 a), são menores no período chuvoso, primavera e verão, nas quais a atmosfera possui maiores concentrações de nuvens e vapor de água no ano, e foram maiores no período seco, outono e inverno, nas quais a atmosfera possui as menores concentrações de nuvens e vapor de água, e maior concentração de aerossóis Fig. 2. Os valores médios de K^d_{GIV} por estação do ano foram: primavera $K^d_{GIV} = 0,45$; verão $K^d_{GIV} = 0,44$; outono $K^d_{GIV} = 0,47$; inverno $K^d_{GIV} = 0,48$. Para K^d_{DIV} os valores foram: primavera $K^d_{DIV} = 0,50$; verão $K^d_{DIV} = 0,49$; outono $K^d_{DIV} = 0,53$; inverno $K^d_{DIV} = 0,55$. No período de 2003 a 2006, o valor de K^d_G variou de 0,35 a 0,525 com média geral de 0,46. O valor de K^d_d variou de 0,04 a 0,47 com média geral de 0,30. O valor K^d_D variou de 0,30 a 0,65 com média geral de 0,519.

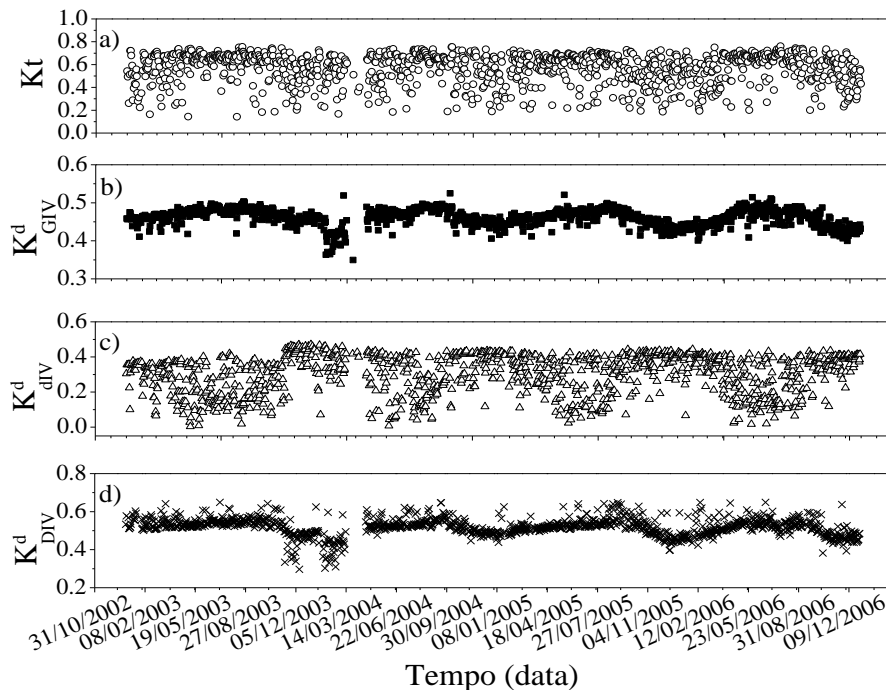


Figura 4 - Evolução temporal das frações K_t^d , K_{GIV}^d , K_{DIV}^d e K_{DIV}^d Período de 2003 a 2006.

Os valores de K_{DIV}^d (Fig. 4 b) foram contrários aos valores de K_t , são maiores na primavera e verão, nas quais são maiores concentrações de nuvens e vapor de água no ano, e foram menores no outono e inverno, em atmosferas com menores concentrações de nuvens e vapor de água, e maior concentração de aerossóis. Os valores médios de K_{DIV}^d por estação do ano foram primavera $K_{DIV}^d = 0,36$; verão $K_{DIV}^d = 0,36$; outono $K_{DIV}^d = 0,26$; inverno $K_{DIV}^d = 0,24$.

3.2 Cálculo das frações K_{GIV}^d , K_{DIV}^d e K_{DIV}^d para cobertura de céu total

As Fig. 5 (a, b e c) 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. 2 a), H_{DIV}^d e H_d^d (Fig. 2 b) e H_{DIV}^d e H_D^d (Figura 2 c), são lineares em amplos intervalos de variações: H_G^d de $3,73\text{MJ/m}^2$ a $31,4\text{MJ/m}^2$, H_d^d de $1,1\text{MJ/m}^2$ a $15,9\text{MJ/m}^2$, H_D^d variou de $0,001\text{MJ/m}^2$ a $28,70\text{MJ/m}^2$. As equações lineares (tipo $Y = aX$) obtidas das correlações (Fig. 5 a, b e c) por meio de regressão com respectivos coeficientes de determinação R^2 foram:

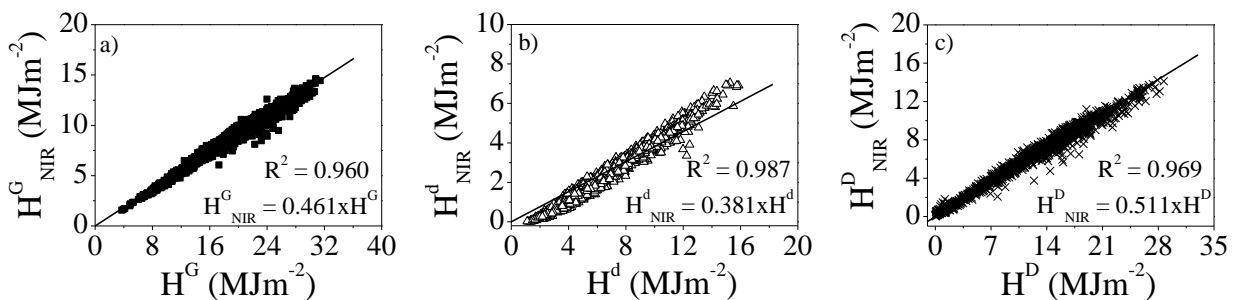


Figura 5 - Correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{DIV}^d e H_{DIV}^d do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total, respectivamente.

$$H_{GIV}^d = 0,461 H_G^d (R^2 = 0,960) \quad (3)$$

$$H_{DIV}^d = 0,382 H_d^d (R^2 = 0,987) \quad (4)$$

$$H_{DIV}^d = 0,511 H_D^d (R^2 = 0,969) \quad (5)$$

Os elevados valores de R^2 , próximos de 1 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. O resultado foi melhor em seqüência para as radiações difusa ($R^2 = 0,987$), direta ($R^2 = 0,969$) e global ($R^2 = 0,960$). O efeito da anisotropia da radiação difusa, também obstruída pelo anel de sombreamento em função da cobertura de céu e não corrigida neste trabalho, pode ser

observada (Figura 5 b) nos baixos valores de H_{div}^d e H_d^d em dias de céu aberto. Nas condições céu claro, o anel de sombreamento barra as radiações difusas direcionais ou anisotrópicas, as quais tiveram origens nas interações com aerossóis e vapor de água em suspensão na atmosfera, principalmente em torno da região circular perpendicular à incidência dos raios solares ou radiação circunsolar (Gueymard, 2001). Segundo Dal Pai et al (2016) a redução dos valores de H_{div}^d e H_d^d foi de 12,0%, fator esse responsável pela distribuição dos pontos experimentais estarem a baixo da reta de regressão na curva. Por outro lado, o efeito de nuvens não previsto na correção isotrópica pela Eq. (2) do método de medida da difusa com anel de sombreamento, pode ser observada nos elevados valores de H_{div}^d e H_d^d em dias de céu totalmente nebulosos (Fig. 5 b). Nas condições de céu nebuloso, o fator de correção usado aumenta a radiação difusa, mesmo que a radiação difusa seja igual à global medida fora do anel, elevando assim desnecessariamente, os valores de H_{div}^d e H_d^d acima da reta de regressão curva.

Os coeficientes angulares das Eq. (3, 4, 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 médias 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. A Eq. (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 et al. (2000) em Lhasa na China e Bolsenga (1997) em Thule na Groenlândia/território dinamarquês. Similarmente, as Eq. (4 e 5) mostram que dos 100% das radiações difusa (H_d^d) e direta (H_D^d), espectro total que atingiram a superfície terrestre, os percentuais de 38,2% e 51,1% são radiações difusa (H_{div}^d) e direta (H_{DIV}^d) infra-vermelha, respectivamente.

A Fig. 6 (a, b, c) mostra as correlações obtidas nas validações, comparação entre estimativa de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d por meio das Eq. (3, 4, 5) e a medida de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d selecionadas do ano atípico. As correlações entre os valores estimados e medidos estão em concordância com as curvas ideais de 45° nos ajustes e são lineares nos intervalos de variação das medidas de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d . Os valores do coeficiente de correlação (r), próximo de 1, para cada uma das curvas $r_{GIV} = 0,980$, $r_{div} = 0,993$, $r_{DIV} = 0,984$ indicam que as estimativas das equações e as medidas estão bem correlacionadas estatisticamente.

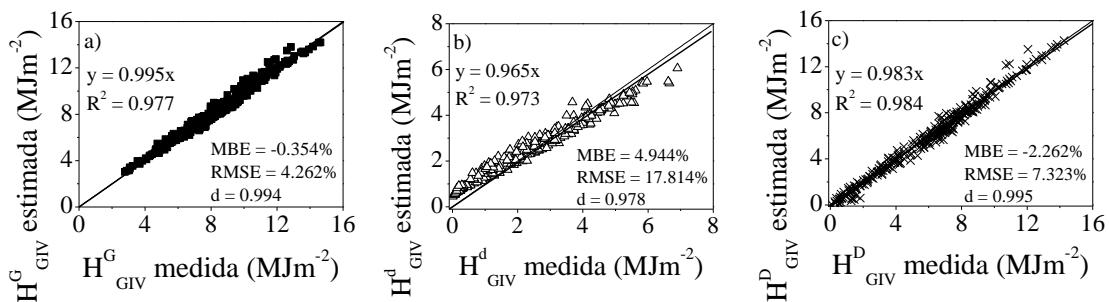


Figura 6 - Comparações entre estimativa e medida de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d do ano atípico.

Os valores obtidos para MBE mostram que a Eq. (3) subestima as medidas em 0,6 %, a Eq. (4) superestima em 5,0%, e a Eq. (5) subestima em 0,7%. Os erros das subestimativa e superestimativa são da mesma ordem dos erros das medidas. Os resultados obtidos para RMSE mostram que o espalhamento das equações (3, 4, 5) é de 5,6%, 20,4% e 9,2% respectivamente. Os valores do d de Willmott superiores a 0,98 expressam elevada concordância no ajuste entre a estimativa e a medida, para as três radiações. Os valores dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott obtidos indicam que as equações (3, 4, 5) podem ser utilizadas com precisão e exatidão nas estimativas de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d .

3.3 Cálculo das frações K_{GIV}^d , K_{div}^d e K_{DIV}^d para cobertura de céu discretas

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 K_t em quatro tipos de cobertura de céu (I, II, III e IV). O índice K_t , 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 $K_t = H_G^d/H_0^d$. O indicativo K_t é o principal indicador da atenuação dos constituintes atmosféricos. A cobertura I- representa céu nebuloso (CN) com $K_t < 0,35$; cobertura II- céu parcialmente nublado com dominância para difuso (CPN1) com $0,35 < K_t < 0,55$; cobertura III - céu parcialmente nublado com dominância para claro (CPN2) com $0,55 < K_t < 0,65$ e cobertura IV- céu aberto ou sem nuvens (CA) com $K_t > 0,65$ (Escobedo et al., 2009). A Fig. 6 mostra as correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{div}^d , H_{DIV}^d do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d , H_D^d do espectro total respectivamente nas cobertura de céu I, II, III e IV respectivamente. As equações lineares (tipo $Y = aX$) foram obtidas por meio de regressão são mostrados na Tab. 1 com respectivos coeficientes de determinação R^2 . Similarmente as correlações anuais, as correlações por cobertura de céu entre H_{GIV}^d , H_G^d , H_{div}^d e H_d^d e H_{DIV}^d e H_D^d são lineares em amplos intervalos de variações.

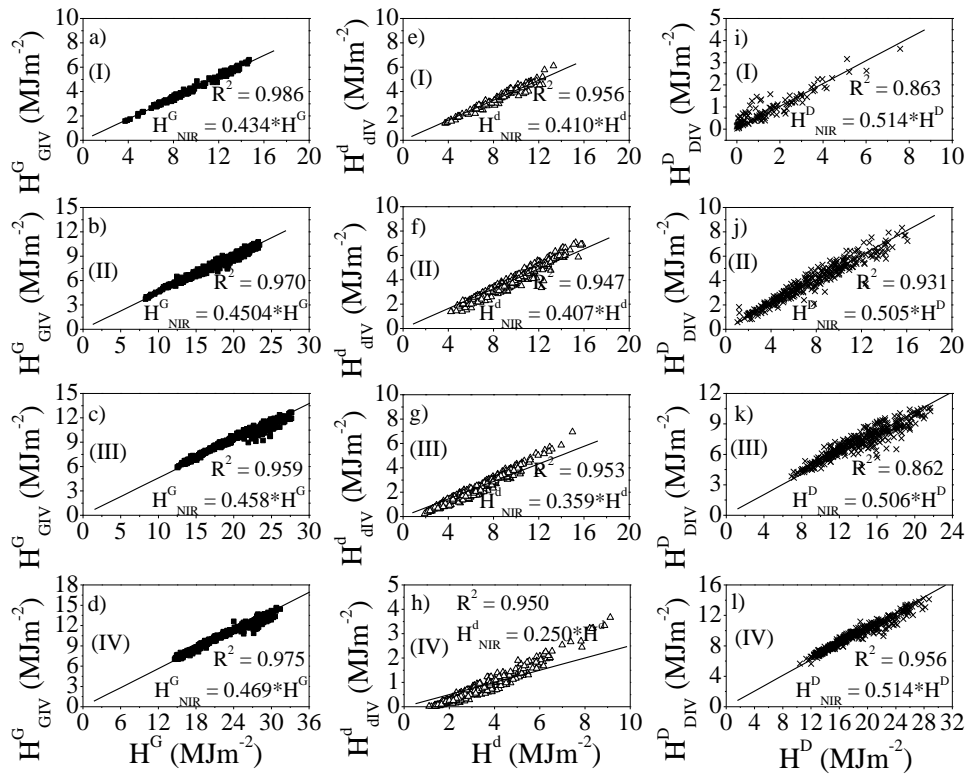


Figura 7 - Correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{DIV}^d , do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total nas coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente.

As equações (Tab. 1) possuem também elevados coeficientes de determinação (R^2): para a correlação H_{GIV}^d e H_G^d (Fig. 6 a, b, c, d) os valores de R^2 foram maiores em seqüência para as coberturas I, IV, II e III. Para a correlação H_{dIV}^d e H_d^d (Fig. 6 e, f, g, h) os valores de R^2 foram maiores em seqüência para as coberturas I, IV, III e II. Para a correlação H_{DIV}^d e H_D^d (Fig. 6 i, j, k, l) os valores de R^2 foram maiores em seqüência para as coberturas IV, II, I e III.

O valor da fração H_{GIV}^d/H_G^d cresce no sentido do aumento da transmissividade das H_{GIV}^d e H_G^d da cobertura de céu nebuloso para aberto, ou a 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 43,4% é menor na cobertura I 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). A fração $H_{GIV}^d/H_G^d = 0,469$ ou 46,9% é maior na cobertura IV 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 Alados-Arboledas, 1999).

Tabela 1. Equações para H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{DIV}^d , em função de H_G^d , H_d^d e H_D^d nas coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente.

Tipo de céu	Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
I	$H_{GIV}^d = 0,434 * H_G^d$	0,986	$H_{dIV}^d = 0,410 * H_d^d$	0,956	$H_{DIV}^d = 0,514 * H_D^d$	0,863
II	$H_{GIV}^d = 0,450 * H_G^d$	0,970	$H_{dIV}^d = 0,407 * H_d^d$	0,947	$H_{DIV}^d = 0,506 * H_D^d$	0,931
III	$H_{GIV}^d = 0,458 * H_G^d$	0,959	$H_{dIV}^d = 0,359 * H_d^d$	0,953	$H_{DIV}^d = 0,506 * H_D^d$	0,862
IV	$H_{GIV}^d = 0,469 * H_G^d$	0,975	$H_{dIV}^d = 0,250 * H_d^d$	0,950	$H_{DIV}^d = 0,514 * H_D^d$	0,956
Total	$H_{GIV}^d = 0,461 * H_G^d$	0,960	$H_{dIV}^d = 0,382 * H_d^d$	0,987	$H_{DIV}^d = 0,511 * H_D^d$	0,969

O valor da fração H_{dIV}^d/H_d^d decresce no sentido do céu nebuloso para céu aberto. Ou, da fração H_{dIV}^d/H_d^d diminui no sentido em que as concentrações de nuvens e o vapor de água, decrescem e aumenta a concentração de aerossóis na atmosfera. A fração $H_{dIV}^d/H_d^d = 0,410$ ou 41% é maior na cobertura de céu nebulosa e a menor na cobertura céu claro $H_{dIV}^d/H_d^d = 0,250$ ou 25,0%.

Os valores das frações H_{dIV}^d/H_d^d são maiores nas estações nebulosas e úmidas, porque a extinção de H_{dIV}^d e H_d^d é desproporcional, é maior para H_d^d que para H_{dIV}^d . As gotículas de água que possuem dimensões maiores do que as partículas dos aerossóis, aumentam mais os valores H_{dIV}^d nos comprimentos longos, que efetivamente H_d^d pelos aerossóis, crescendo o 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 a extinção de H_{dIV}^d e H_d^d pelos aerossóis é desproporcional, maior para H_{dIV}^d que para H_d^d . Os aerossóis que possuem dimensões muito menores as gotículas de vapor de água, aumentam mais os valores H_d^d nos comprimentos curtos, que efetivamente H_{dIV}^d pelo vapor de água, decrescendo o valor da fração H_{dIV}^d/H_d^d .

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.

3.4 Comparação entre as frações das coberturas de céu total e discreta

Para análise do efeito da cobertura de céu para as três radiações H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{DIV}^d , calculou-se desvio relativo D (%) por meio da Eq. (7) entre os coeficientes angulares das equações totais (a_t) para todas coberturas de céu total e das equações por coberturas de céu individualizadas CN, CNN1, CNN2 e CA (a_c), como mostrado na Fig. 8 (a,b,c):

$$D(\%) = 100*(a_t - a_c)/a_t \quad (7)$$

O desvio percentual D (%) expressa a capacidade das frações total de superestimar ou subestimar as frações nas coberturas de céu discretas. Para as radiações global, os valores dos desvios D (%) mostram que o valor K_{GIV}^d total é maior que os valores das K_{GIV}^d nas coberturas CN, CNN1, CNN2 em 5,8%, 2,4% e 0,7% respectivamente, e menor na cobertura CA em 1,7%.

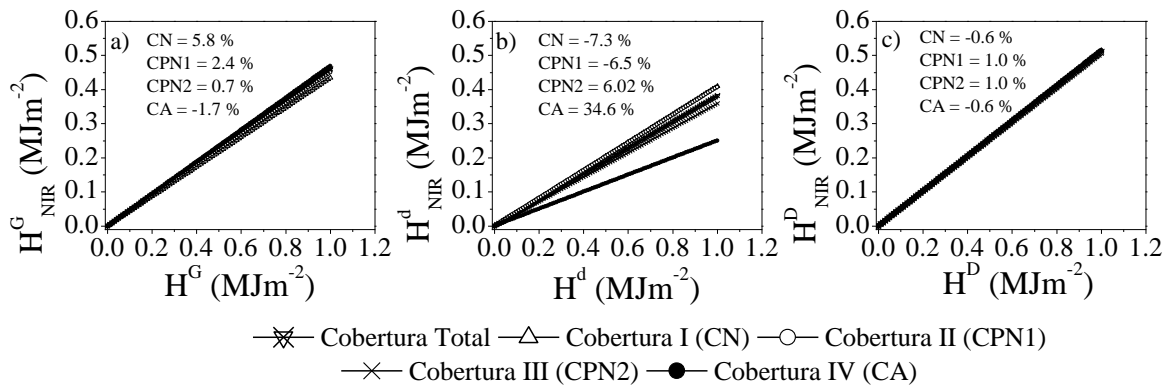


Figura 8 - (a, b, c) curva estimada de H_{GIV}^d , H_{dIV}^d e H_{DIV}^d por cobertura discreta de céu e total em função de H_G^d , H_d^d , e H_D^d .

Para a difusa, os valores dos desvios D (%) mostram que o valor de K_{dIV}^d total é menor nas coberturas CN e CNN1 em 7,3 % e 6,5% respectivamente, e maior nas coberturas CNN2 e CA em 6,% e 34,6% respectivamente. Para as radiações direta, os valores de K_{DIV}^d total é menor na cobertura CN e CA em 0,6 % e maior nas coberturas CNN1 e CNN2 em 1,0%.

4. CONCLUSÕES

As variações sazonais das frações K_t , K_{GIV} , K_{dIV} e K_{DIV} são resultantes das variações climáticas (nuvens, vapor de água e aerossóis) da atmosfera local. Os valores das K_{GIV}^d e K_{DIV}^d acompanham os valores de K_t , são menores quando a atmosfera possui maiores concentrações de nuvens e vapor de água no ano, e são maiores na atmosfera com menores concentrações de nuvens e vapor d'água, e maior concentração de aerossóis. Os valores de K_{dIV}^d evoluem contrários aos valores de K_t , K_{GIV}^d e K_{DIV}^d .

As equações obtidas apresentaram as seguintes frações: $K_{GIV} = 0,461$; $K_{dIV} = 0,382$ e $K_{DIV} = 0,511$ para todas as coberturas de céu. As equações em função das coberturas de céu apresentaram as seguintes variações : a fração K_{GIV} cresce no sentido da cobertura de céu nublada (43,4%) para céu aberto (46,9); a fração K_{dIV} decresce no sentido da cobertura de céu nublado (41%) para aberta (25,0%); fração K_{DIV} (H_{DIV}^d/H_D^d) é aproximadamente constante nas quatro coberturas de céu.

A comparação das frações total e por cobertura de céu mostra que o valor K_{GIV}^d total é maior que K_{GIV}^d nas coberturas CN, CNN1, CNN2 em 5,8% e 2,4% e 0,7% respectivamente, e menor na cobertura CA em 1,7%; o valor de K_{dIV}^d total é menor nas coberturas CN e CNN1 em 7,3% e 6,5% respectivamente, e maior nas coberturas CNN2 e CA em 6,% e 34,6% respectivamente. O valor de K_{DIV}^d total é menor na cobertura CN e CA em 0,6 % e maior nas coberturas CNN1 e CNN2 em 1,0%. Os valores dos desvios obtidos para as três frações nas quatro cobertura de céu indicam que apenas a equação K_{dIV}^d para CA deve ser utilizada nas estimativas, na qual o valor do desvio é maior que a imprecisão das medidas. Nas demais estimativas de K_{GIV}^d , K_{dIV}^d e K_{DIV}^d deve-se usar as equações totais, as quais o valor do desvio é menor que a imprecisão das medidas..

Agradecimentos

A FAPESP e CNPq.

5. REFERÊNCIAS

- Alados, I. and Alados-Arboledas, L. 1999. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 93, pp. 27-38.
- Bolsenga, S. J., 1997. Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology*, vol. 6, pp. 449-451.
- Cañada, J.; Pedros, G.; Bosca, J.V., 2003. Relationships between UV (0,290-0,385 μ m) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy*, vol. 28, pp. 199-217.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, vol. 17, pp. 88-108.
- CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html, acesso em 14/09/2012.
- Chaves, M. and Escobedo, J. F., 2000. A software to process daily solar radiation data. *Renewable Energy*, vol.19, n. 1, pp. 339-344.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Dal Pai, A., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 93, pp. 57–73.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, Dal Pai, E.; Santos M. C., 2014. Estimation of Hourly, Daily and Monthly mean Diffuse Radiation Based Shadowing Correction. *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1150 – 1159.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, F. H., 2011. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowing measuring method In: *ISES SOLAR WORLD CONGRESS*, Kassel.
- Escobedo, J. F.; Gomes E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, vol. 86, pp. 299-309.
- Escobedo, J. F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. R., 2011. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 169-178.
- Finch, D.A.; Bailey, W. G.; McArthur, L. J. B.; Nasitwitwi, M., 2004. Photosynthetically active radiation regimes in a Southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 122, pp. 229-238.
- Fröhlich, C.; London, J., 1986. Revised Instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications series No. 7. WMO/TD No. 149.
- Holben, B. N.; Tanre', D.; Smirnov, A. et al., 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, n. 11, pp. 12.067–12.097.
- Jacobson, M. Z., 2002. Analysis of aerosol interactions with numerical techniques for solving coagulation, nucleation, condensation, dissolution and reversible chemistry among multiple size distributions. *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, pp. 1-23.
- Jacovides, C. P.; Assimakopoulos, V. D.; Tymvios, F. S. et al., 2006. Solar global UV radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy*, vol. 31, pp. 2728-2738.
- Jacovides, C. P.; Tymvios, F. S.; Assimakopoulos, V. D.; Kaltsounides, N. A., 2007. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 143, pp. 277-287.
- Karalis, J. D., 1989. Characteristics of direct photosynthetically radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 48, pp. 225-234.
- Leal, S. S.; Tiba, C.; Piacentini, R., 2011. Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks. *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 3337-3344.
- Lemos, C.F.; Calbete, N. O., 1996. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. *Climanálise, Edição comemorativa 10 anos (INPE-10717-PRE/6178)*.
- Martinez-Lozano, J. A.; Tena, F.; Utrillas, M. P., 1999. Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, vol.19, pp. 903–911.
- Melo, J.M.D. and Escobedo, J.F., 1994. Medida da radiação solar difusa. VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. *Anais do Internacional Solar Energy Society*.
- Nogués-Paegle, J. and MO, K.C., 1997. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon Wea Rev*, vol. 125, pp. 279-291.
- Ogunjobi, K. O. and Kim, Y. J., 2004. Ultraviolet and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research*, vol.71, pp. 193-214.
- Oliveira, A. P.; Escobedo, J. F.; Machado, A. J., 2002. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, vol. 5, pp. 698-708.

- Papaioannou, G.; Nikolidakis, G.; Asimakopoulos, D. et al., 1996. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol.81, pp. 287–298.
- Papaioannou, G.; Papanikolaou, N.; Retalis, D. et al., 1993. Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 48, pp. 23-27.
- Porfírio, A. C. S.; Souza, J. L.; Lyra, G. B. et al., 2012. An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil. *Energy*, vol. 44, pp. 584-592.
- Rao, C. R. N., 1984. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, vol.34, pp. 353-64.
- Reda, I.M.; Myers, D.R.; Stoffel, T.L. (2008). *Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers*: NCSLI Measure, *The Journal of Measurement Science*, vol. 3, n. 4, pp. 58-66.
- Robaa, S.M., 2004. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy*, vol. 77, pp. 251-259.
- Rossi, T. J.; Escobedo, J. F.; Santos, C. M. et al. 2015. 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.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P. L., 1998. Topics: South America. *Meteorological Monographs*, vol. 27, n. 49, pp. 119-139.
- Teramoto, E. T.; Escobedo, J. F.; Pai, A. D. et al., 2013. Influência de nuvens, aerossóis e ozônio sobre o KTUV em Botucatu/SP/Brasil: cidade produtora de cana-de-açúcar. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 1, pp. 11.151-11.160.
- Zhang X, Zhang Y, Zhou Y., 2000. Measuring and modeling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agricultural Meteorology*, v. 102, pp. 207-212.

Dependence of sky conditions on Global, Diffuse and Direct fractions 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 Irradiations, Infrared Irradiation.