

Tema 11 – Radiação solar y clima

Dependência da cobertura de céu nas frações solares Global, Difusa e Direta do espectro infravermelho em Botucatu/SP/BrasilT. J. Rossi¹, J. F. Escobedo², C. M. dos Santos³, M. B. P. da Silva⁴, L. R. Rossi⁵

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

Tel. + 55143811-7580 e-mail: taizarossi@fca.unesp.br

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 igual nas coberturas nebulosa e aberta.

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

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., 1993; 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

¹ Graduando em Biologia, Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP/Botucatu.

² Físico, Prof. Dr. Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP/Botucatu.

³ Físico, Doutor em Irrigação e Drenagem, FCA/UNESP/Botucatu.

⁴ Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem, FCA/UNESP/Botucatu.

⁵ Biólogo, Departamento de Engenharia Rural, FCA/UNESP/Botucatu.

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} para todos 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 apresentada 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 ultimo, é feito a comparação dos valores das frações total e por cobertura de céu discretas quantificando-se os efeitos das coberturas de céu.

MATERIAS E METODOS

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 figuras 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 Figura 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 Figura 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.

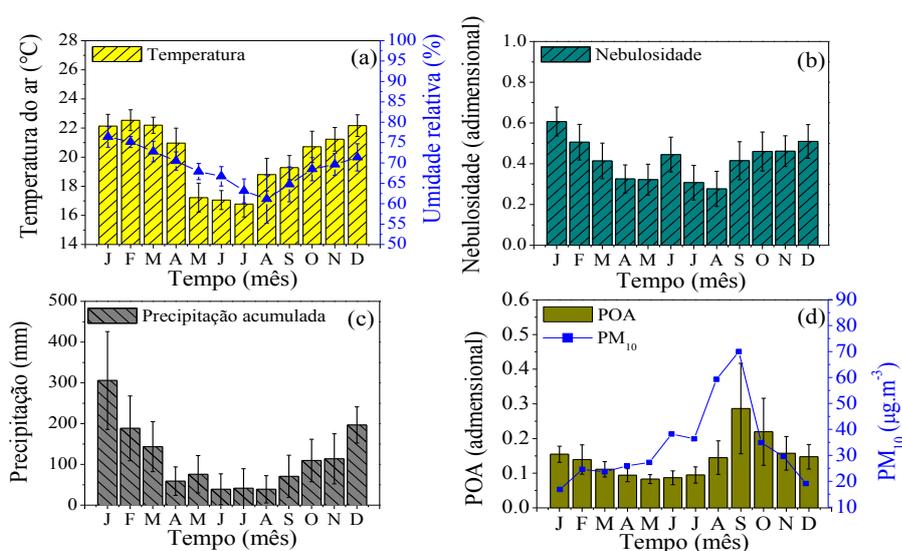


Figura 1. Séries Climáticas (período: 1970-2008) da Temperatura e Umidade Relativa (a), Nebulosidade (b), Precipitação (c), Relação entre a evolução anual da Profundidade Ótica dos Aerossóis (POA) médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005 (d).

A evolução anual da precipitação 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 304mm e a menor em junho e agosto com 38,8mm. 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 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 38,2mm. 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 70,0 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (Figura 1d) (Codato et al., 2008).

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 3,0 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: 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.

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:

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

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.

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):

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

Onde b e R são a largura e raio do anel, δ 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.

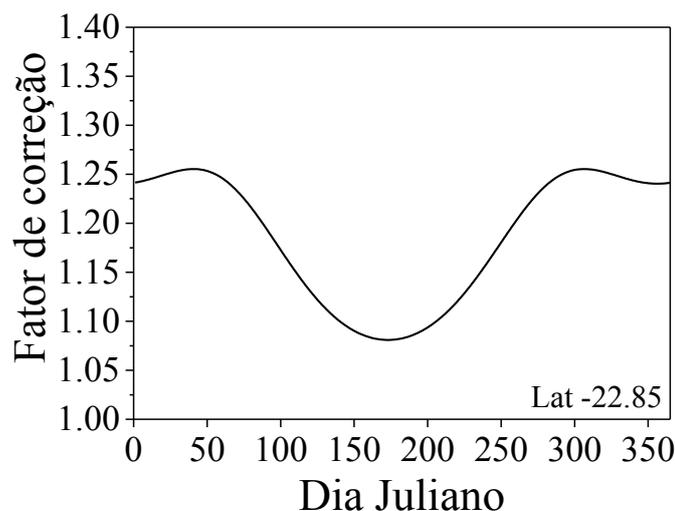


Figura 3. Fator de correção isotrópico diário para o anel de sombreamento *MEO* para latitude de Botucatu ($\phi = 22,85^\circ S$) ao longo do ano para as radiações difusa Total e IV.

As correções das medidas das radiações difusas total e IV pelo anel de sombreamento *MEO* em função do tipo de cobertura de céu pelas equações (1 e 2), quais levam em consideração os efeitos da cobertura nebulosa e da anisotropia da cobertura sem nuvens não foram realizadas neste trabalho. Segundo Dal Pai et al.(2011, 2014) a cobertura nebulosa aumenta em média 2,5% a radiação difusa, enquanto 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%.

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 et al., 2008) e também as imprecisões da medida da difusa no anel de sombreamento devido os efeitos da cobertura nebulosa e da anisotropia da cobertura sem nuvens. 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 irradiâncias 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).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise estatística e climática das frações K_t , K_{GIV}^d , K_{dIV}^d e K_{DIV}^d

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 dos espectros espectrais e total.

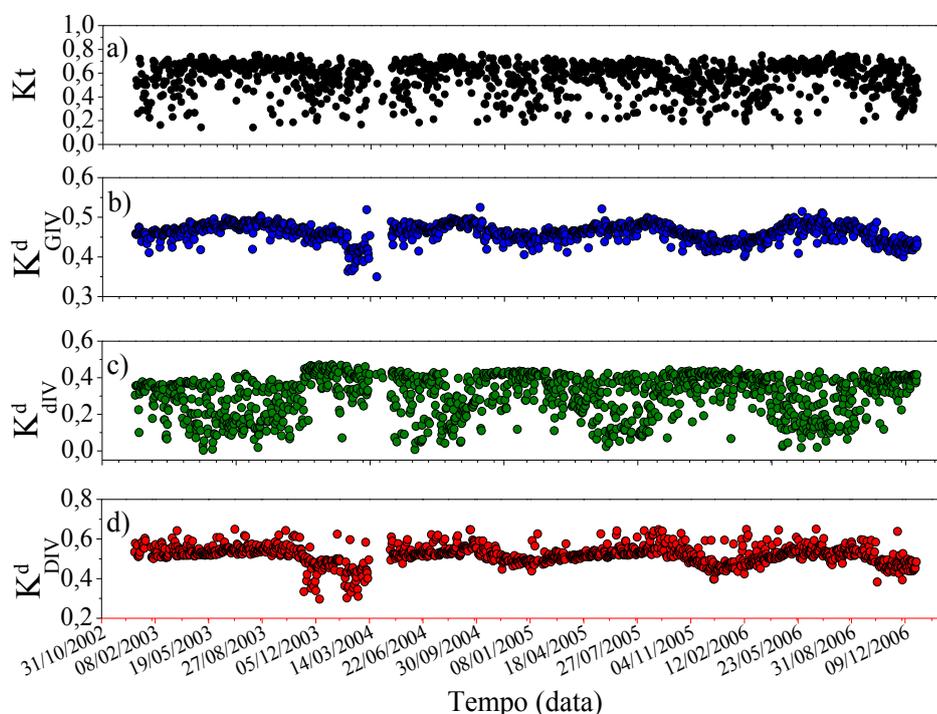


Figura 4. Evolução temporal das frações K_t^d , K_{GIV}^d , K_{dIV}^d e K_{DIV}^d período de 2003 a 2006.

A evolução temporal das frações $K_t = (H_G^d/H_D)$, $K_{GIV}^d = (H_{GIV}^d/H_G)$, $K_{dIV}^d = (H_{dIV}^d/H_d)$ e $K_{DIV}^d = (H_{DIV}^d/H_D)$ período de 2003 a 2006, Figura 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_{GIV}^d , K_{DIV}^d e K_{DIV}^d . Os valores das K_{GIV}^d e K_{DIV}^d (Figura 4 a e Figura 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 Figura 2. Os valores médios de K_{GIV}^d por estação do ano foram: primavera $K_{GIV}^d = 0,45$; verão $K_{GIV}^d = 0,44$; outono $K_{GIV}^d = 0,47$; inverno $K_{GIV}^d = 0,48$. Para K_{DIV}^d os valores foram: primavera $K_{DIV}^d = 0,50$; verão $K_{DIV}^d = 0,49$; outono $K_{DIV}^d = 0,53$; inverno $K_{DIV}^d = 0,55$. No período de 2003 a 2006, o valor de K_G^d 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. Os valores de K_{DIV}^d Figura 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 $K_{DIV}^d = 0,24$.

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

As Figuras 5 (a,b ec) 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 (Figura 2a), H_{DIV}^d e H_d^d (Figura 2 b) e H_{DIV}^d e H_D^d (Figura 2c), são lineares em amplos intervalos de variações: H_G^d de 3,73MJ/m² a 31,4MJ/m², H_d^d de 1,1MJ/m² a 15,9MJ/m², H_D^d variou de 0,001MJ/m² a 28,70 MJ/m². As equações lineares (tipo $Y = aX$) obtidas das correlações(Figuras 5a,b e c) por meio de regressão com respectivos coeficientes de determinação R^2 foram:

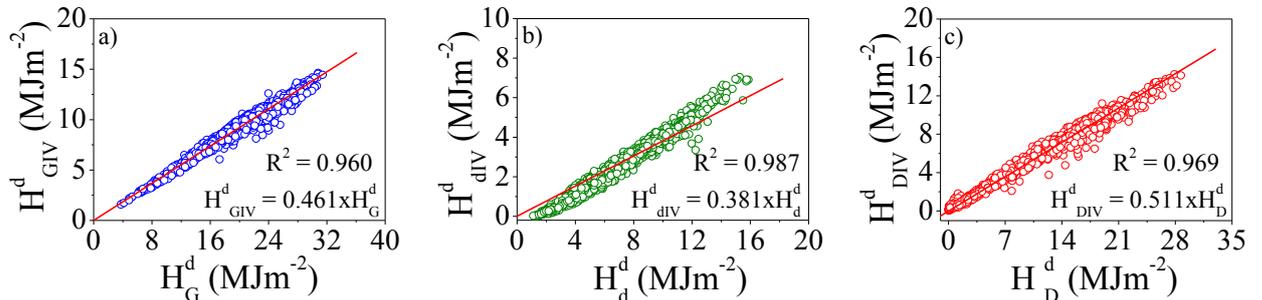


Figura 5. Correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{DIV}^d e H_{DIV}^d do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total, respectivamente.

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

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

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

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 equação(2)do metodo 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 (Figura 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 na curva.

Os coeficientes angulares das Equações (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 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/território dinamarquês. Similarmente, as Equações (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 Figura 6 (a, b, c) mostra as correlações obtidas na validação, comparação entre estimativa de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d por meio das equações (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.

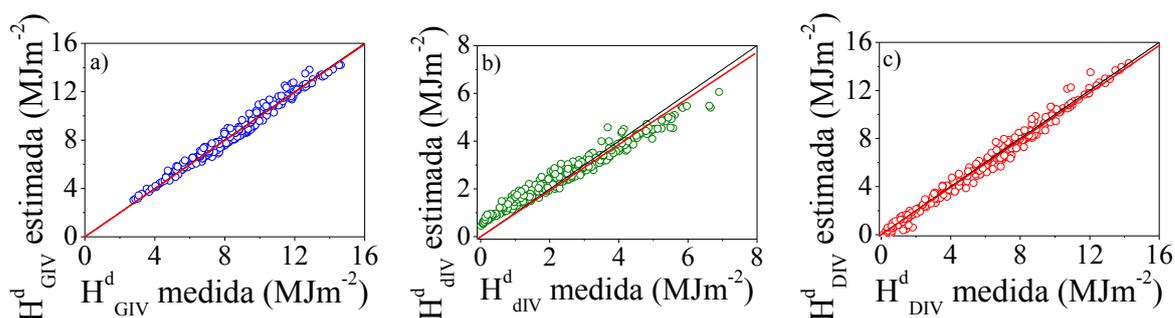


Figura 6. Comparações entre estimativa e medida de H_{GIV}^d , H_{div}^d , e H_{DIV}^d do ano atípico.

Os valores obtidos para MBE mostram que a equação (3) subestima as medidas em 0,6 %, a equação (4) superestima em 5,0%, e a equação (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 e 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 indicativos 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 .

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).

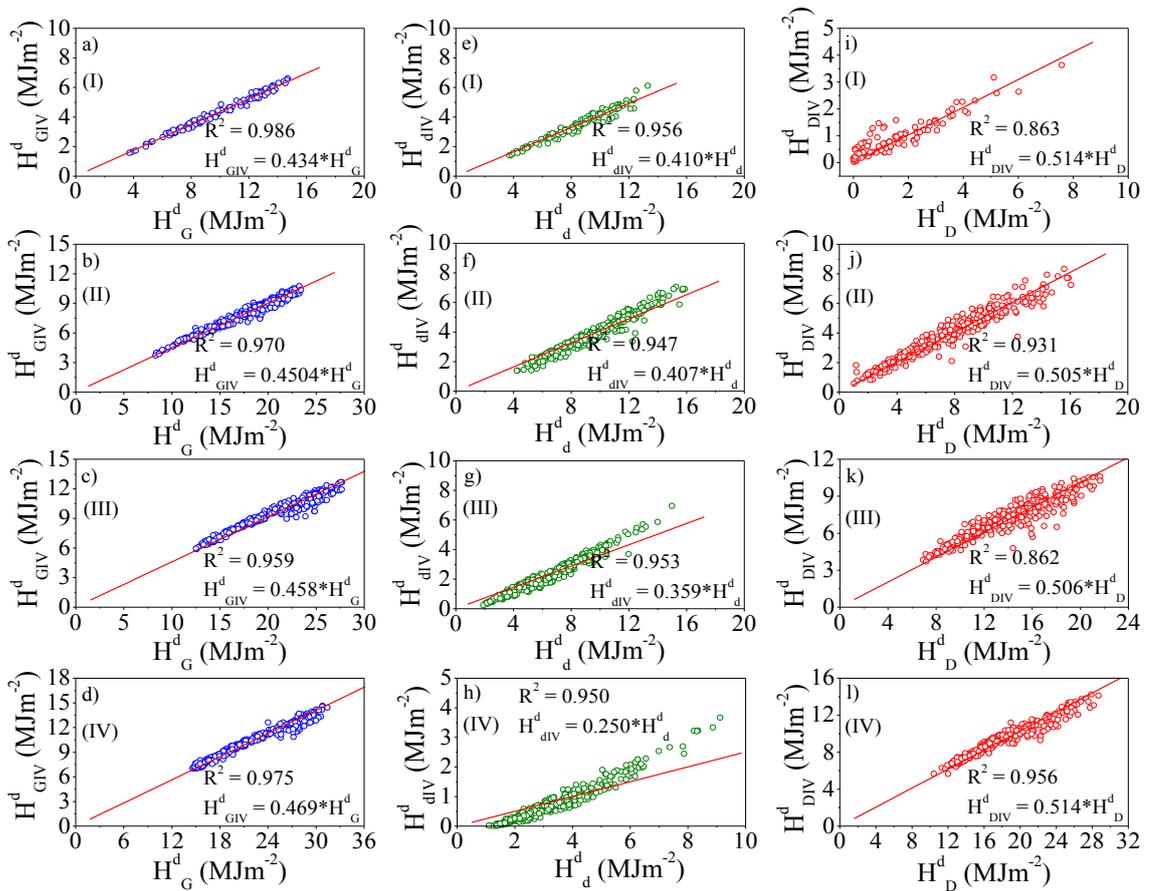


Figura 7. Correlações entre os valores de H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d , do espectro IV e os valores de H_G^d , H_d^d e H_D^d do espectro total nas coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente.

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_o^d ou $Kt = H_G^d/H_o^d$. 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). A Figura 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 coberturas de céu I, II, III e IV respectivamente. As equações lineares (tipo $Y = aX$) foram obtidas por meio de regressão são mostrados na Tabela(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. As equações (Tabela 1) possuem também elevados coeficientes de determinação (R^2): para a correlação H_{GIV}^d e H_G^d (Figura 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_{GIV}^d e H_G^d (Figura 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 (Figura 6 i, j, k, i) 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).

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

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.

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 comprimento longos, que efetivamente H_d^d pelos os 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 comprimento 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.

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 equação (7) entre os coeficientes angulares das equações totais (**a**) para todas coberturas de céu total e das equações por coberturas de céu individualizadas CN, CNN1, CNN2 e CA (**a_c**), como mostrado na Figura 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%.

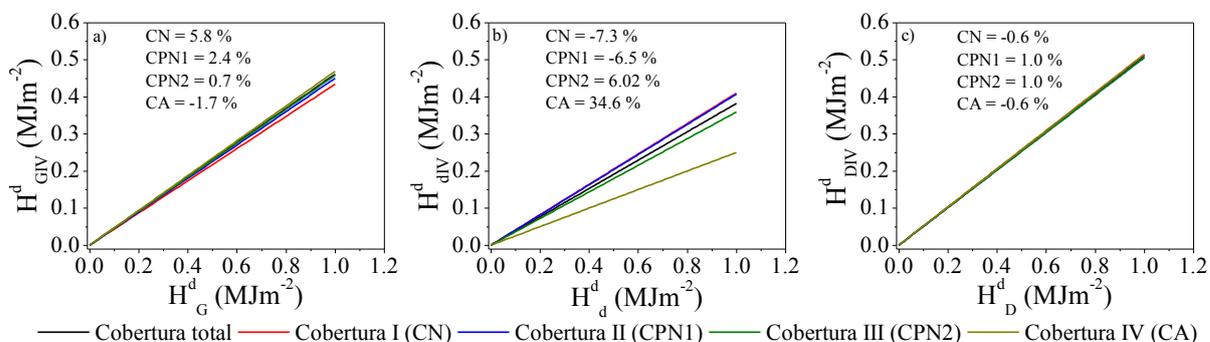


Figura 8. (a,b,c) curva estimada de H_{GIV}^d , H_{div}^d e H_{DIV}^d por cobertura discreta de céu e total em função de H_G^d , H_d^d , e H_D^d .

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%.

CONCLUSÕES

As variações sazonais das frações K_t , K_{GIV} , K_{div} e K_{DIV} é resultante 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 e foram menores quando a atmosfera possui maiores concentrações de nuvens e vapor de água no ano, e foram maiores na atmosfera com menores concentrações de nuvens e vapor d'água, e maior concentração de aerossóis. Os valores de K_{div}^d evoluíram contrários aos valores de K_t , K_{GIV}^d e K_{DIV}^d .

As equações para todas as coberturas de céu obtidas apresentaram as seguintes frações: $K_{GIV} = 0,461$; $K_{div} = 0,382$ e $K_{DIV} = 0,511$. As equações para todas as coberturas de céu apresentaram as seguintes frações: 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}^d (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%.

Agradecimentos:

A FAPESP e CNPq.

REFERÊNCIAS

- Alados, I. e Alados-Arboledas, L. (1999). Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest and Meteorology*, v.93, 27-38.
- Bolsenga, S. J. (1997). Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology*, v. 6, 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*, v. 28, 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*, v. 17, 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. e Escobedo, J.F. (2000). A software to process daily solar radiation data. *Renewable Energy*, v.19,nº1, 339-344.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. G.; Dal Pai, A. (2008). Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, 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 Shadowring Correction. *Energy Procedia*, v. 57, 1150 – 1159.
- Dal Pai, A.; Escobedo, J. F. Correa, F. H. (2011). Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowring measuring method In: ISSES 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*, v. 86, 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*, v. 36, 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*, v.122, 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.; Eck, T. F.; Slutsker, I.; Abuhassan, N.; Newcomb, W. W.; Schafer, J. S.; Chatenet, B.; Lavenu, F.; Kaufman, Y. J.; Vande Castle, J.; Setzer, A.; Markham, B.; Clark, D.; Frouin, R.; Halthore, R.; Karneli, A.; O'Neill, N. T.; Pietras, C.; Pinker, R. T.; Voss, K.; Zibordi, G. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, n. 11, 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*, v. 107, 1-23.
- Jacovides, C. P.; Assimakopoulos, V. D.; Tymvios, F. S.; Theophilou, K.; Asimakopoulos, D. N. (2006). Solar global UV radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy*, v. 31, 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*, v.143, 277-287.
- Karalis, J. D. (1989). Characteristics of direct photosynthetically radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 48, 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*, v.36, 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 broadband irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, v.19, 903–911.
- Melo, J.M.D. e 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.; MO, K.C. (1997). Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon Wea Rev*, v. 125, 279-291.
- Ogunjobi, K. O. e 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*, v.71, 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, v.5, 698-708.
- Papaioannou, G.; Papanikolaou, N.; Retalis, D. (1993). Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. *Theoretical and Applied Climatology*, v.48, 23-27.
- Papaioannou, G.; Nikolidakis, G.; Assimakopoulos, D.; Retalis, D. (1996). Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.81, 287–298.
- Porfirio, A. C. S.; Souza, J. L.; Lyra, G. B.; Lemes, M. A. M. (2012). An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil. *Energy*, v. 44, 584-592.
- Rao, C. R. N. (1984). Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, v.34, 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*, v. 3, n. 4, 58-66.
- Robaa, S.M. (2004). A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy*, v. 77, 251-59.
- Rossi, T. J.; Escobedo, J. F.; Santos, C. M.; Silva, M. B. P.; Gomes, E. N. (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*, v.3, 11.83-11.94.
- Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Silva Dias, P. L. (1998). Topics: South America. *Meteorological Monographs*, v. 27, n. 49, 119-139.

Teramoto, E. T.; Escobedo, J. F.; Pai, A. D.; Santos, C. M.; Fukunaga, L. A.; Silva, M. B. P. (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*, v. 1, 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, 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.

Keywords: Global, Diffuse and Direct Solar Irradiations, Infrared Irradiation.