

AVALIAÇÃO DE ERROS NOS MÉTODOS DE MEDIDA DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA

R. P. RICIERI¹, J. F. ESCOBEDO², R. DALLACORT³

RESUMO: No presente trabalho mostra-se um estudo comparativo entre métodos de medida da radiação difusa monitorada por piranômetros com anel e disco de sombreamento, objetivando-se comparar os métodos em função dos erros apresentados em relação ao método direto padrão, considerando o tipo de cobertura do céu. A radiação difusa de referência foi obtida por diferença entre a radiação global (R_G), medida por um piranômetro, e a radiação direta projetada na horizontal ($R_D \cos \theta_z$). O ensaio experimental foi conduzido no período de 01/01/97 à 31/12/97 na ESTAÇÃO DE RADIOMETRIA SOLAR DA UNESP de Botucatu, (22°54'Sul; 48°27'Oeste), foram utilizados piranômetro EPPLEY PSP, pireliômetro NIP acoplado num rastreador solar ST3 da EPPLEY, anel de sombreamento ($\phi=80\text{cm}$; $L=10\text{cm}$) e disco ($\phi=8\text{cm}$) acoplado ao rastreador. Utilizou-se na aquisição dos dados uma DATALOGGER da CAMPBELL modelo 21X, programada para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média aritmética de cinco minutos (300 leituras) durante o ensaio experimental sob condições de céu aberto, parcialmente nublado e nublado. Os erros médios obtidos mostram que o método do anel de sombreamento utilizado na medida da radiação difusa com correção de Drummond difere em torno de 7,59%, 8,99%, 7,70% e 2,44% do padrão e o modelo de Melo 8,39%, 9,35%, 8,72% e 3,74% para o disco 7,04%, 11,56%, 4,77% e 2,43%, sem considerar o tipo de cobertura do céu, para céu limpo, parcialmente nublado e nublado, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVES: Anel de Sombreamento, Disco de Sombreamento, Radiação Solar Difusa.

EVALUATION OF ERRORS IN MEASUREMENTS OF DIFFUSE SOLAR RADIATION

SUMMARY: This work shows a comparative study in the measurement of diffuse solar radiation monitored by one piranometer, shadowed by disc or ring, objecting to compare these methods in function of errors related to the direct method. It was considered the sky cover type. The reference diffuse radiation was obtained by the difference between the global radiation (R_G), and the directed radiation, projected in the horizontal ($R_D \cos \theta_z$). The experiment was conducted in the period from 01/01/97 to 12/31/97 in the Solar Radiometry Station of UNESP in Botucatu, (22°54'Sul; 48°27'Oeste), using this instruments: EPPLEY PSP pyranometer; EPPLEY NIP pyrheliometer attached to an EPPLEY ST3 suntracker; one shadow ring ($\phi=80\text{cm}$; $L=10\text{cm}$); one shadow disc ($\phi=8\text{cm}$) attached to the sun tracker. One CAMPBELL 21X DATALOGGER programmed in the frequency of 1Hz, was used in the data acquisition. It was stored the average of five minutes readings (300 readings). The average errors show that the shadow ring method, corrected by Drummond's factor, differed around 7,59%, 8,99%, 7,70% e 2,44% from, the standard direct method and corrected by Melo's factor from 8,39%, 9,35%, 8,72% e 3,74%. The shadow disc method differed 7,04%, 11,56%, 4,77% e 2,43%, from the standard one.

KEYWORDS: Shadow Ring, Shadow Disc, Diffuse Solar Radiation.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da intensidade da radiação difusa que incide na superfície da Terra é de grande importância, devido a sua interferência em fenômenos físicos e biológicos. Vários modelos matemáticos e métodos experimentais têm sido propostos para obtenção da radiação difusa, com auxílio de anel de sombreamento, sem levar em consideração o comportamento anisotrópico desta radiação.

Os métodos que utilizam sistema de acompanhamento do movimento relativo do sol são considerados mais precisos porém, por razões econômicas, não são os mais utilizados. Por ser a alternativa mais econômica, o anel de sombreamento vem sendo mais usado.

Podemos medir a radiação solar difusa num plano horizontal, por três métodos:

¹ Doutor, Prof. Adjunto, UNIOESTE/Depto. de Matemática e Estatística/Pós-Graduação em Engenharia Agrícola/Cascavel – Pr
ricieri@unioeste.br (045) 225-2100 R: 246.

² UNESP – FCA/Depto. De Ciências Ambientais/Botucatu –SP.

³ UNIOESTE/Acadêmico do curso de Engenharia Agrícola/Bolsa PIBIC.

1 - Método direto padrão: utiliza-se um piranômetro para medir a radiação global (R_G), e simultaneamente, é medida a radiação direta (R_D) por um pireliômetro. A radiação difusa ($R_d = R_G - R_D \cdot \cos z$) é obtida por diferença entre a radiação global e a radiação direta, projetada na horizontal ($R_D \cdot \cos z$), onde z é o ângulo zenital.

2 - Método indireto: um piranômetro é sombreado através de um pequeno disco acoplado num rastreador solar.

3 - Método indireto: um piranômetro é sombreado através de um anel adaptado numa plataforma.

No terceiro método existem duas possibilidades de montagem do conjunto anel e piranômetro sob uma plataforma: Primeira - o anel de sombreadamento é posicionado numa plataforma de forma que seu eixo, de simetria axial, permaneça paralelo ao eixo polar da Terra estando o piranômetro horizontalmente fixo sobre o eixo do anel. Neste caso o anel deve ser deslocado a cada dia devido a variação da declinação solar. Segunda - o anel é fixo numa plataforma, na qual, o piranômetro se movimenta paralelamente ao eixo norte-sul geográfico.

O deslocamento do anel ou do piranômetro, permite que o sensor do piranômetro mantenha-se sombreado, com a radiação solar direta interceptada pelo anel, incidindo sobre o sensor parte da radiação difusa, o que leva ao uso de fatores de correção, tais como: DRUMMOND (1956), MELO (1994), LE BARON *et al.* (1980), ASHJACE *et al.* (1993), JACOVIDES *et al.* (1996) e outros.

O fator de correção mais usado mundialmente é o de DRUMMOND (1956). No Brasil MELO (1994) desenvolveu um fator de correção específico, sendo que, até o presente momento, estes dois modelos juntamente com o método do disco não foram avaliados em relação a um método padrão.

INEICHEN *et al.* (1983) e RAWLINS & READINGS (1986) mediram a radiação difusa por dois métodos: método do anel de sombreadamento e do disco, sendo que, nos dois trabalhos encontraram uma diferença em torno de 5%.

Este trabalho tem como objetivo analisar as diferenças apresentadas entre os métodos de determinação da radiação difusa com auxílio do anel de sombreadamento, utilizando os fatores de correção de DRUMMOND (1956) e de MELO (1994), e com o auxílio do disco de sombreadamento, considerando o tipo de cobertura do céu.

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio experimental foi conduzido na ESTAÇÃO DE RADIOMETRIA SOLAR DA UNESP de Botucatu/SP (22°54'Sul; 48°27'Oeste) no departamento de Ciências Ambientais. A amostragem dos dados, para este estudo, foi obtida no período de 29/05/96 a 22/05/97 num total de 320 dias, com 153 dias de céu limpo, 60 de céu nublado e 107 de céu parcialmente nublados. Os dias não totalizados se referem à falta de energia elétrica, à manutenção dos equipamentos ou a chuvas de grande intensidade. O tipo de cobertura do céu foi classificado pela razão entre a radiação solar global (R_G) e a radiação no topo atmosfera (R), conforme os intervalos: $0 < R_G/R < 0,30$ céu nublado, $0,30 \leq R_G/R \leq 0,65$ parcialmente nublado e $0,65 < R_G/R \leq 1$ limpo.

Os valores das energias (MJ/m^2) das componentes (global, direta e difusa) da radiação solar foram obtidos através de integrações das curvas de irradiância.

Para medida simultânea das componentes global, difusa e direta foram utilizados os seguintes equipamentos: pireliômetro EPPLEY-NIP e disco de sombreadamento ($\phi = 80$ mm) acoplados num rastreador solar EPPLEY-ST3, anel de sombreadamento ($\phi = 80$ cm; $L = 10$ cm) fixo numa plataforma e piranômetros EPPLEY-PSP. Os sistemas foram fixados na direção norte-sul geográfica com os sensores dos piranômetros numa altura de 1,80m do solo, a uma distância de 40cm do anel e do disco de sombreadamento. A aquisição de dados foi feita através de um datalogger, CAMPBELL modelo 21X, programado para realizar uma leitura por segundo de cada canal e armazenar a média correspondente a cada 5 minutos (300 leituras).

Instalação dos sistemas

A instalação dos sistemas para a medida simultânea das componentes global, difusa e direta, compreendeu as seguintes etapas: determinação da linha norte-sul geográfica; posicionamento da plataforma e anel de sombreadamento e do disco de sombreadamento; posicionamento da plataforma para colocar o piranômetro sombreado pelo disco e o conjunto pireliômetro/disco acoplado ao rastreador solar.

Determinação da linha norte-sul geográfica: a linha norte-sul foi determinada por um teodolito.

Instalação da plataforma equipada com anel de sombreadamento: alinhada no sentido norte-sul geográfica, com a base fixa direcionada para o norte, na qual colocou-se um piranômetro (constante de calibração $8,13 \mu\text{V/Wm}^{-2}$) para medir a radiação global. O anel de sombreadamento foi fixado no suporte da plataforma com seu centro posicionado na mesma altura do sensor do segundo piranômetro (constante de calibração $8,17 \mu\text{V/Wm}^{-2}$). O plano da face do anel alinhado com o sentido leste-oeste, foi inclinado na direção norte, formando um ângulo ($\phi = 22^\circ 54'$) com o zênite local.

Instalação do disco de sombreadamento: O disco de sombreadamento foi adaptado ao rastreador solar.

Instalação da plataforma do piranômetro sombreado pelo disco: A plataforma foi instalada na frente

do rastreador com a base móvel direcionada para o norte. Regulou-se a altura e a posição na horizontal do piranômetro (constante de calibração $8,49 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$) de forma que seu sensor permanecesse no centro da sombra proporcionada pelo disco.

Posicionamento do rastreador: o rastreador solar, onde se acoplou o pireliômetro (constante de calibração $7,73 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$), foi mantido fixo no sentido norte-sul geográfico e ajustado para a latitude local.

A figura 1 mostra o esquema da instalação dos equipamentos.

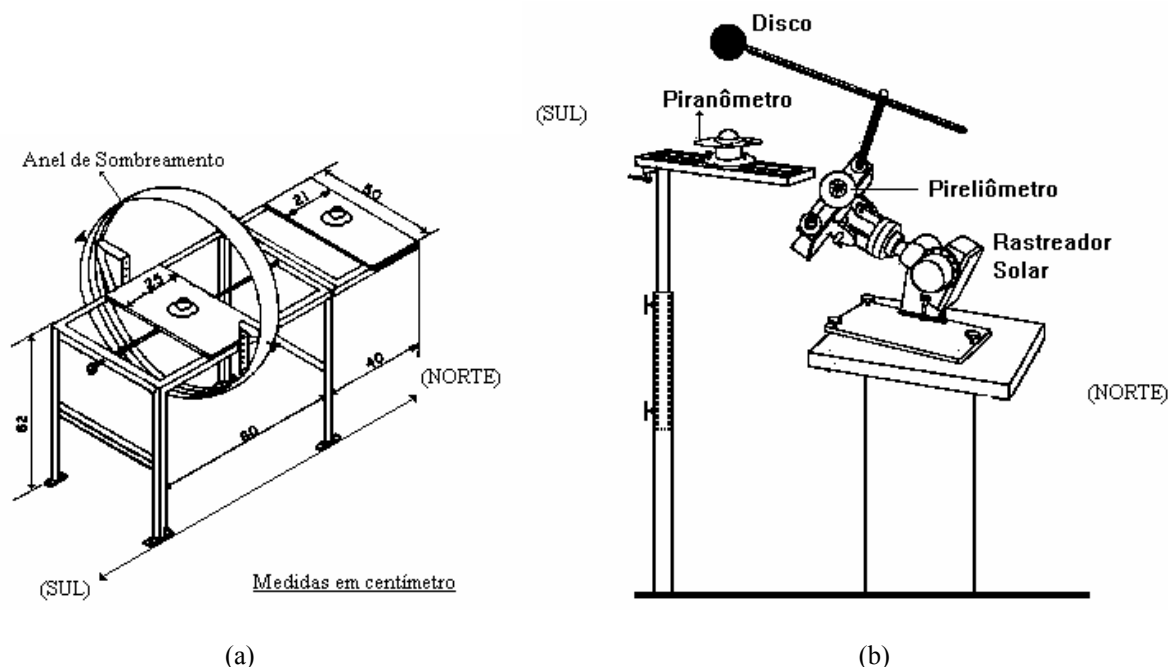


Figura 1 - Esquemas das montagens: (a) plataforma equipada com anel de sombreamento e piranômetros, (b) disco de sombreamento e pireliômetro acoplados no rastreador solar.

Fator de correção

A radiação difusa, medida com o auxílio do anel de sombreamento, foi corrigida multiplicando-se a irradiância medida pelo piranômetro pelo fator de correção proposto por Drummond (1956), Equação (1) e por Melo (1994), equação (2):

$$FCD = \left[1 - \frac{2L}{\pi R} \cos^3 \delta (t_o \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin t_o) \right]^{-1} \quad (1)$$

$$FCM = (1 - q/Q)^{-1}, \quad (2)$$

onde: $Q = C\pi \left[R \sec \delta + \frac{(R \tan \delta - L/2) \sin \phi}{\cos(\phi + \delta)} \right]^2$

$$q = \left(\frac{2CLR(\cos \delta)^2}{\cos(\phi + \delta)} \right) (t_o \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin t_o)$$

com: R = raio do anel (cm), δ = declinação solar (rad), ϕ = latitude local (rad), L = largura do anel (cm), t_o = ângulo horário no por do sol (rad); Q = radiação difusa incidente no sensor (W/cm^2); q = radiação difusa interceptada pelo anel (W/cm^2); C= constante de proporcionalidade (W/cm^2).

A figura 2 mostra o comportamento dos fatores de correção FCD e FCM, obtidos a partir das equações (1) e (2), para latitude de Botucatu. Verifica-se que suas variações (crescente e decrescente) são semelhantes. Cada fator apresenta dois pontos máximos, sendo para o FCD no dia 26 de fevereiro e 13 de outubro (1,18) e para o FCM 13 de março e 28 de setembro (1,16); ambos apresentam um mínimo em 20 de junho respectivamente iguais a 1,08 e 1,10. Pelos valores destes fatores observa-se que o anel de sombreamento intercepta a radiação difusa numa faixa de 8,19% à 18,27% segundo DRUMMOND (1956) e de 9,62% à 16,89% segundo MELO (1994). As curvas possuem pontos de intersecção nos dias 27 de março e 14 de setembro (1,16) e valores no início e final do ano iguais a 1,16 e 1,12; respectivamente. Não encontrou-se na literatura uma avaliação dos erros envolvidos no uso destes fatores.

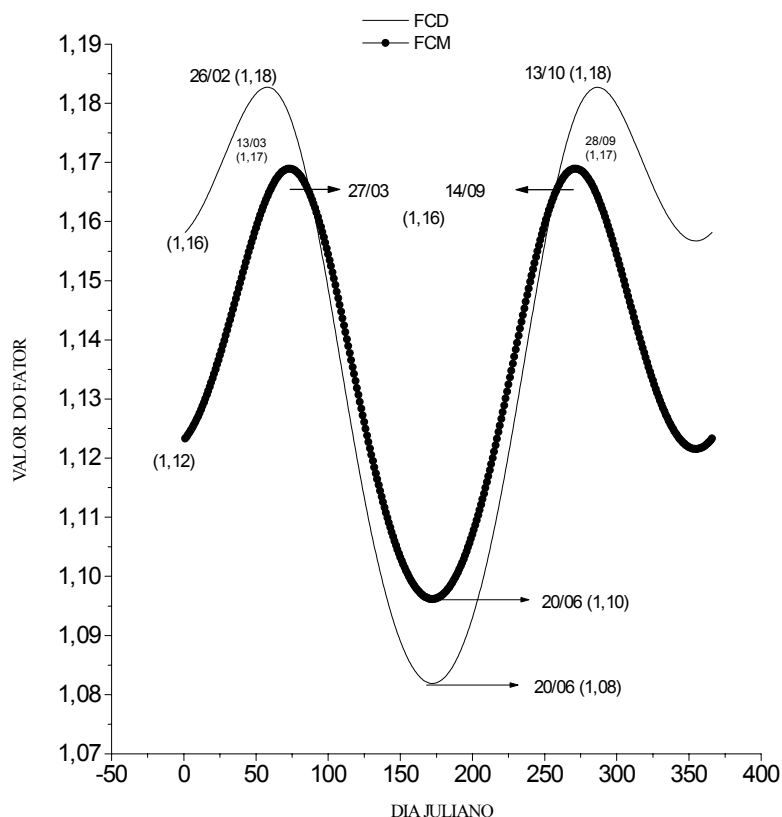


Figura 2 - Comportamento dos fatores de correção FCD e FCM no decorrer do ano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 3 mostra a variação dos erros obtidos em cada método, relativos ao método direto, tomado como padrão. Observa-se que os erros relativos ao disco estão simetricamente melhores distribuídos em torno de 1, indicando uma variação sistemática em função das estações do ano.

Numa tentativa de se detectar diferenças entre os fatores FCD e FCM, classificou-se os dias do experimento em função do tipo de cobertura do céu. As tabelas 1 e 2 e 3 mostram os erros médios, desvios e intervalos de confiança em função do tipo de cobertura do céu obtidos nos respectivos métodos de medida. Observa-se que, no método do anel, a aplicação do FCD e do FCM, ocasionou erros médios considerados elevados do ponto de vista meteorológico. Estes valores foram: para as condições de céu limpo – 8,99% e 9,35%; parcialmente nublado – 7,70% e 8,72% e sem distinção do tipo de cobertura – 7,59% e 8,39%. Os valores foram baixos para dias de céu nublado – 2,44 e 3,74%.

O erro médio (11,56%) do disco no período de céu limpo, comparado com as outras três condições de cobertura do céu, foi maior, mostrando que este método apresenta grande dificuldade na medição sob esta condição de céu, razoável para dias parcialmente nublados e regular para bom nas condições de elevada nebulosidade. A ordem de grandeza dos desvios relativos acompanhou, na seqüência, as condições de anisotropia da radiação difusa: para céu limpo, onde a anisotropia desta componente é mais acentuada, para dias de céu parcialmente nublado, onde pode-se ter as condições isotrópica e anisotrópica alternadas, dependendo da cobertura do céu ao longo do dia, o desvio é intermediário apresentando um valor de 4,77%; e para dias de céu nublado, onde a radiação difusa é praticamente isotrópica tem-se o menor desvio (2,43%).

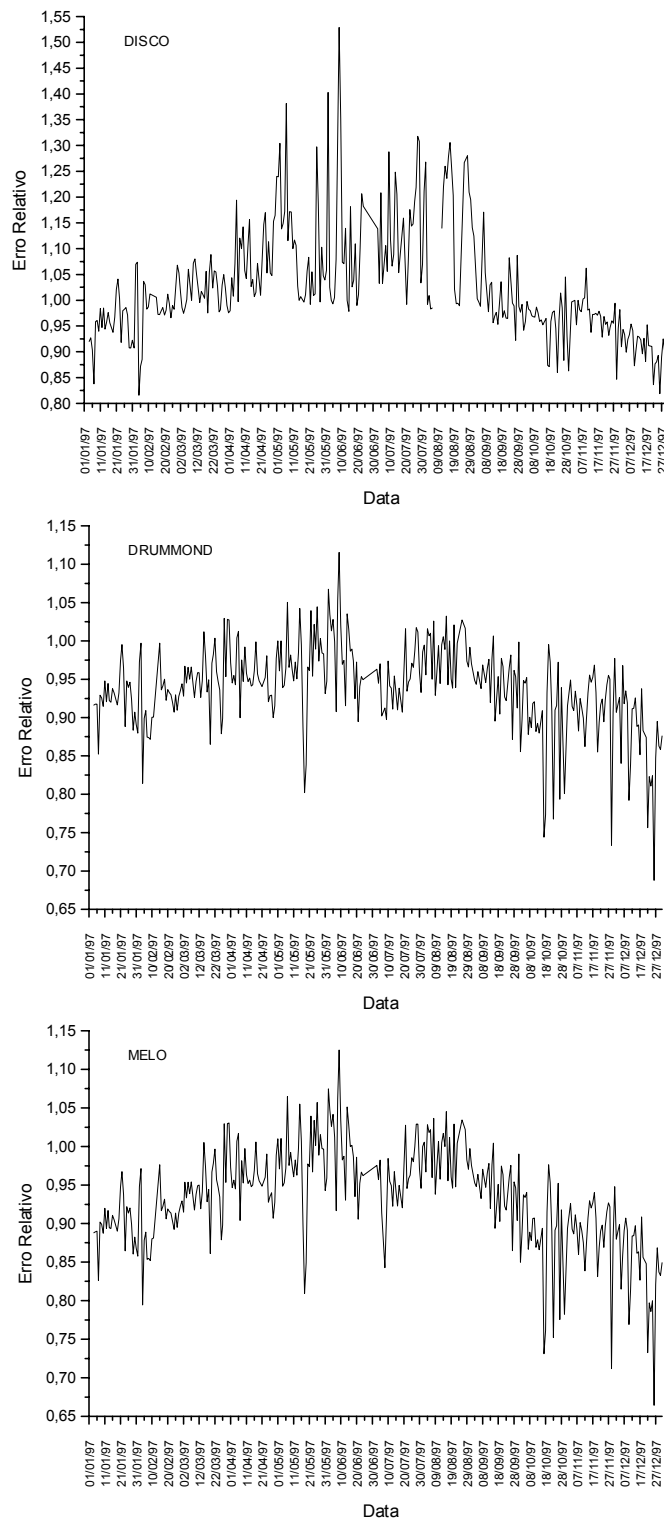


Figura 3 - Erros relativos na medida da radiação difusa pelos três métodos.

Os desvios médios foram considerados elevados e as causas podem ter origem: no comportamento da radiação difusa; na variação da temperatura dos piranômetros; nas reflexões da radiação solar no solo e estruturas adjacentes aos instrumentos; no fator de correção ou nas constantes de calibração dos piranômetros. Todavia, a última hipótese é a menos provável, em função dos equipamentos serem de qualidade já comprovada, terem 1 ano de uso contínuo e terem sido recalibrados no decorrer do experimento, porem não é impossível visto que dados recentes com aferição de piranômetros BLACK\WHITE novos, realizados em Botucatu, mostraram uma variação na constante de calibração fornecida pelo fabricante próximo de 8%. A penúltima consideração pode ser desprezada, pois os desvios no método do disco foram aproximadamente da mesma ordem que no método do anel, lembrando que no método do disco a radiação difusa não foi corrigida. As

três primeiras hipóteses indicam ser as mais prováveis, devido aos desvios terem sido maiores em dias de céu limpo, período em que a radiação solar direta possui maior intensidade, favorecendo estas três hipóteses.

Os resultados obtidos com a aplicação dos dois fatores de correção sugerem a necessidade, particularmente em dias de céu limpo e parcialmente nublado, de introduzir em suas equações parâmetros locais que levem em consideração: elementos climáticos; tipo de cobertura do céu; reflexão do solo; e outros.

Tabela 1: Erro médio e desvio da radiação difusa em função do tipo de tipo de céu (DISCO).

CÉU	ERRO MÉDIO(%)	DESVIO(%)
GERAL	7,04	7,16
LIMPO	11,56	9,18
PARCIALMENTE NUBLADO	4,77	3,58
NUBLADO	2,43	2,36

Tabela 2: Erro médio e desvio da radiação difusa em função do tipo de céu (fator FCD).

CÉU	ERRO MÉDIO(%)	DESVIO(%)
GERAL	7,59	5,15
LIMPO	8,99	6,39
PARCIALMENTE NUBLADO	7,70	3,72
NUBLADO	2,44	1,80

Tabela 3: Erro médio e desvio da radiação difusa em função do tipo de céu (fator FCM).

CÉU	ERRO MÉDIO(%)	DESVIO(%)
GERAL	8,39	5,69
LIMPO	9,35	7,02
PARCIALMENTE NUBLADO	8,72	4,41
NUBLADO	3,74	2,57

CONCLUSÕES

A partir dos resultados conclui-se que os dois modelos de correção da radiação difusa obtida com o uso do anel, Drummond e Melo, apresentam erro médio menor em relação ao método padrão em dias de céu nublado e que, para dias de céu limpo e parcialmente nublado, os erros são significativos numa média de 8,34% e 9,03% para cada fator, respectivamente. Estes fatores levam a um erro sistemático na medida da radiação difusa, subestimando o seu valor em relação ao método direto. Os desvios obtidos, considerados elevados, indicam a necessidade; particularmente em dias de céu limpo e parcialmente nublado; de se introduzir nas equações, de cada modelo, parâmetros atmosféricos locais vinculados com o comportamento anisotrópico da radiação solar difusa.

Conclui-se ainda que a medida da radiação solar difusa, usando o método do disco, apresentou ser mais precisa em dias de céu nublado(2,43%) e parcialmente nublado (4,77%), sugerindo a este método fator de correção diferenciado em função do tipo de cobertura do céu e da declinação solar, principalmente para dias de céu limpo (11,56%).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHJACE, M., ROOMINAS, M.R. & AZAR, G. Estimating direct, diffuse and global radiation for various cites in Iran by two methods and their comparison with the measured. *Solar Energy*, v.50, p.441-6, 1993.
- DRUMMOND, A.J. On the measurement of sky radiation. *Arch. Meteor. Geophys.*, vol.7, pp. 413-436, 1956.
- INEICHEN, P., GREMAUD, J.M. & GUISAN, O. Study of the corrective factor involved when measuring the diffuse solar radiation by use of the ring method. *Sol. Energy*, vol.31, pp.113-117, 1983.
- JACOVIDES, C.P., HADJIDANNOV, L. & PASHIARDS, S. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for Island cyprus. *Solar Energy*, vol.56, pp.565-720, 1996.
- LE BARON, B.A., PETERSON, W.A. & DIRMHIRN I. Correlations for diffuse irradiance measured with shadonbands. *Solar Energy*, vol.25, pp.1-17, 1980.
- MELO, J.M.D. *Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta*. Tese apresentada na Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu-UNESP, 1994.
- RAWLINS, F. & READINGS, C.J. The shade ring corrections for measurements of diffuse irradiance under clear skies. *Solar. Energy*, vol.37, n.6, pp.407-416, 1986.