

ANGELO FERACIN NETO

**MÉTODO DE MEDIDA DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO: INFLUÊNCIA DE
ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NA MEDIDA DA
IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA**

Botucatu

2021

ANGELO FERACIN NETO

**MÉTODO DE MEDIDA DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO: INFLUÊNCIA DE
ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NA MEDIDA DA
IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu

2021

F345m	Feracin Neto, Angelo Método de medida do anel de sombreamento MEO : influência de aspectos construtivos (raio e largura) na medida da irradiância solar difusa / Angelo Feracin Neto. -- Botucatu, 2021 60 p. : il., tabs., fotos, mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Alexandre Dal Pai 1. Radiometria. 2. Radiação difusa. 3. Anel de sombreamento. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MÉTODO DE MEDIDA DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO: INFLUÊNCIA DE ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NA MEDIDA DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA

AUTOR: ANGELO FERACIN NETO

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Virtual) 
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual) P. 
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. ÉRICO TADAO TERAMOTO (Participação Virtual) P. 
Engenharia e Pesca / UNESP - Campus Experimental de Registro

Prof. Dr. EDSON LUIS BASSETTO (Participação Virtual) P. 
Engenharia Elétrica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. ADRIANO DE SOUZA MARQUES (Participação Virtual) P. 
Engenharia da Computação / Instituto Federal de São Paulo

Botucatu, 05 de janeiro de 2021

A minha esposa Cristiane e a meu filho Fernando,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus e a Nossa Senhora.

A minha esposa Cristiane pelo apoio e dedicação.

A meu filho Fernando por me inspirar a ser um ser humano melhor.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação, ensinamentos e paciência.

RESUMO

A primeira parte deste trabalho estuda a influência da largura e do raio do anel de sombreamento MEO (Melo-Escobedo-Oliveira) na medida da irradiância difusa. São analisados dados obtidos através de dois anéis com dimensões diferentes que possuem a mesma razão largura/raio (b/R). Os dados foram obtidos da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP - Botucatu. O desempenho de cada anel é analisado em função do índice de transmissividade (Kt). Na segunda parte foi realizado um estudo comparando medidas de irradiação difusa do anel MEO com a profundidade óptica de aerossóis (AOD) do sensor MODIS dos satélites TERRA e ACQUA.

Palavras-chave: Radiação difusa. Anel de sombreamento MEO. Anisotropia.

ABSTRACT

The first part of this work studies the influence of the width and radius of the MEO shading ring (Melo-Escobedo-Oliveira) in the measure of diffuse irradiance. Data obtained through two rings with different dimensions that have the same width/radius (b/R) ratio are analyzed. The data were obtained from the radiometric station of the Faculty of Agronomic Sciences of the State University of São Paulo UNESP - Botucatu. The performance of each ring is analyzed according to the transmissivity index (Kt). In the second part, a study was carried out comparing diffuse irradiation measurements of the MEO ring with the aerosol optical depth (AOD) of the MODIS sensor of the TERRA and ACQUA satellites.

Keywords: Diffuse radiation. MEO shading ring. Anisotropy.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
REVISÃO DE LITERATURA.....	18
CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA REALIZADAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO.....	29
1.1 INTRODUÇÃO.....	29
1.2 METODOLOGIA.....	31
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
1.4 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
CAPÍTULO 2- ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS (AOD) DOS SATÉLITES TERRA/ACQUA COM MEDIDAS DE RADIAÇÃO DIFUSA OBTIDAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO PARA A REGIÃO DE BOTUCATU-SP.....	45
2.1 INTRODUÇÃO.....	45
2.2 METODOLOGIA.....	47
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
2.4 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	54
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO.....	59

INTRODUÇÃO GERAL

O Sol é a principal fonte de energia que movimenta e controla o clima do planeta. Essa radiação atravessa o espaço e chega à superfície terrestre na forma de luz e calor.

A energia solar é amplamente aproveitada como fonte de calor em concentradores, placas de aquecimento de água, secagem de grãos, estufas, etc. Nos últimos anos tem-se observado um aumento significativo na instalação de sistemas fotovoltaicos destinados a geração de energia elétrica. O atual desenvolvimento tecnológico permitiu a redução dos custos tornando a energia fotovoltaica mais competitiva em relação a outras fontes.

A luz visível que chega à superfície pode ser dividida em duas componentes: radiação direta e radiação difusa. A radiação direta é a parcela da radiação solar que não sofre interferência da atmosfera chegando à superfície em uma incidência normal ao círculo solar. A radiação difusa é a parcela da radiação solar que sofre espalhamento principalmente devido à presença de gases, vapor d'água e aerossóis (IQBAL, 1983).

A componente direta da radiação solar é mais energética quando comparada a radiação difusa, pois não sofre desvios em sua trajetória, sendo de grande importância nas áreas que envolvem a geração de energia fotovoltaica e em sistemas de aquecimento. Mas devido ao alto custo e as dificuldades operacionais, a medição da radiação direta torna-se inviável em muitos casos (DAL PAI et al., 2015).

Uma alternativa para a obtenção da irradiação direta é o método da diferença. A irradiação global é a soma da irradiação direta mais a difusa. Para obter-se a irradiação direta, basta subtrair a irradiação difusa da global. A irradiação global é comumente medida em estações meteorológicas e a irradiação difusa pode ser obtida por métodos que utilizam um aparato que bloqueia a incidência de radiação direta no sensor. Entre os métodos de sombreamento destaca-se o anel de sombreamento. Um anel, devidamente posicionado, projeta uma sombra sobre um piranômetro (instrumento usado para medir a irradiação solar), bloqueando a incidência da radiação direta no sensor. No entanto, além de bloquear a radiação direta, o anel acaba bloqueando uma parcela do céu. Isto causa uma subestimação das medidas de radiação difusa.

No intuito de mitigar este efeito, costuma-se aplicar um fator de correção às medidas de radiação obtidas com o uso do anel de sombreamento. O cálculo dos fatores de correção vinculados as principais montagens com anel de sombreamento, considera um espalhamento isotrópico da radiação difusa na atmosfera. Esses cálculos são baseados em fatores geométricos (largura e raio do anel) e fatores geográficos (declinação solar e latitude).

A correção isotrópica, aplicada isoladamente, mostra-se insuficiente em situações de atmosfera com características anisotrópicas. Isso ocorre, pois às condições anisotrópicas (normalmente encontradas na atmosfera) não são computadas no cálculo do fator de perda. Estudos apontam que a anisotropia está vinculada a localidade e a condições temporais. Uma opção para melhorar as medidas obtidas pelo método do anel de sombreamento é o uso de correção isotrópica somada a anisotrópica (DAL PAI et al., 2016).

A primeira parte deste trabalho estuda a diferença apresentada entre os dados de irradiância difusa de dois anéis de sombreamento MEO com dimensões diferentes, mas que possuem a mesma razão b/R (largura/Raio). São investigadas as razões que levam os anéis a apresentarem valores de irradiância diferentes mesmo após suas medidas serem submetidas à correção isotrópica, além de estudar a influência da anisotropia da radiação difusa nas medidas.

Os objetivos são:

- Demonstrar que as dimensões dos anéis influenciam as medidas da radiação difusa no anel de sombreamento MEO, apesar de se manter a mesma razão b/R ;
- Determinar se a cobertura de céu influencia as medidas de irradiação difusa dos anéis;
- Confirmar se as diferenças apresentadas nas medidas de irradiação difusa estão ligadas as dimensões nos anéis;

A segunda parte do trabalho apresenta uma análise comparativa entre a profundidade óptica dos aerossóis (AOD - *Aerosol Optical Depth*) dos satélites TERRA e ACQUA com o fator de correção anisotrópico.

O principal objetivo é:

- Verificar a ligação da profundidade óptica de aerossóis com as perdas devido à anisotropia no anel de sombreamento MEO.

As análises são baseadas em dados de radiação solar do ano 2000 a 2007 da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP- Botucatu. As medidas dos dois anéis são comparadas a uma medida de referência (diferença entre a radiação global (horizontal) e a direta projetada na horizontal). Os dados foram separados em função da cobertura de céu para a estimação dos parâmetros do modelo. Ferramentas estatísticas foram utilizadas no estudo e análise dos dados.

O trabalho está dividido conforme descrito a seguir.

A Introdução apresenta uma revisão bibliográfica com os principais conceitos relacionados à radiação difusa. São abordados os tipos de espalhamento (*Rayleigh* e *Mie*), os métodos de medidas da radiação difusa, índice de transmissividade, e indicadores estatísticos.

No Capítulo 1 é apresentado um artigo intitulado "INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA REALIZADAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO".

O Capítulo 2 apresenta um artigo intitulado "ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS (AOD) DOS SATÉLITES TERRA/ACQUA COM MEDIDAS DE RADIAÇÃO DIFUSA OBTIDAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO PARA A REGIÃO DE BOTUCATU-SP".

REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Radiação Solar

O sol é a principal fonte de energia que controla o clima do planeta. Sua radiação influencia os fenômenos meteorológicos e climáticos e segundo Iqbal (1983, p.54, tradução nossa), "... sua energia radiante é praticamente a única fonte de energia que influencia os movimentos atmosféricos e nosso clima."

O estudo da radiação solar não se restringe somente ao clima. Nas ciências relacionadas à agronomia, a energia proveniente do sol é amplamente pesquisada em trabalhos que envolvem a fotossíntese, transpiração, floração, enchimento dos grãos, entre outros (MUCHOW; SINCLAIR; BENNETT, 1990; CAMPILLO; FORTES; PRIETO, 2012).

Radiação é uma energia que se propaga sem a necessidade de um meio físico e interage com elementos da atmosfera (água, gases, aerossóis, etc.) sofrendo processos de absorção, espalhamento e reflexão. As camadas da atmosfera atuam como um filtro para as bandas do espectro solar (IQBAL, 1983; CAMPILLO; FORTES; PRIETO, 2012).

A energia do sol que chega ao topo da atmosfera terrestre é conhecida como radiação extraterrestre e é calculada multiplicando-se a constante solar ($I_{CS}=1.367 \text{ W/m}^2$) pelo cosseno do ângulo zenital θ_z . Segundo Iqbal (1983), 99% dessa energia encontra-se na faixa de $0,25 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$ de comprimento de onda (λ). A região visível do espectro está compreendida entre $0,39 \mu\text{m}$ (violeta) e $0,77 \mu\text{m}$ (vermelho). Radiações com comprimento de onda menor que $0,39 \mu\text{m}$ são denominadas radiações ultravioletas, e as com comprimento maior que $0,77 \mu\text{m}$ de radiações infravermelhas (IQBAL, 1983).

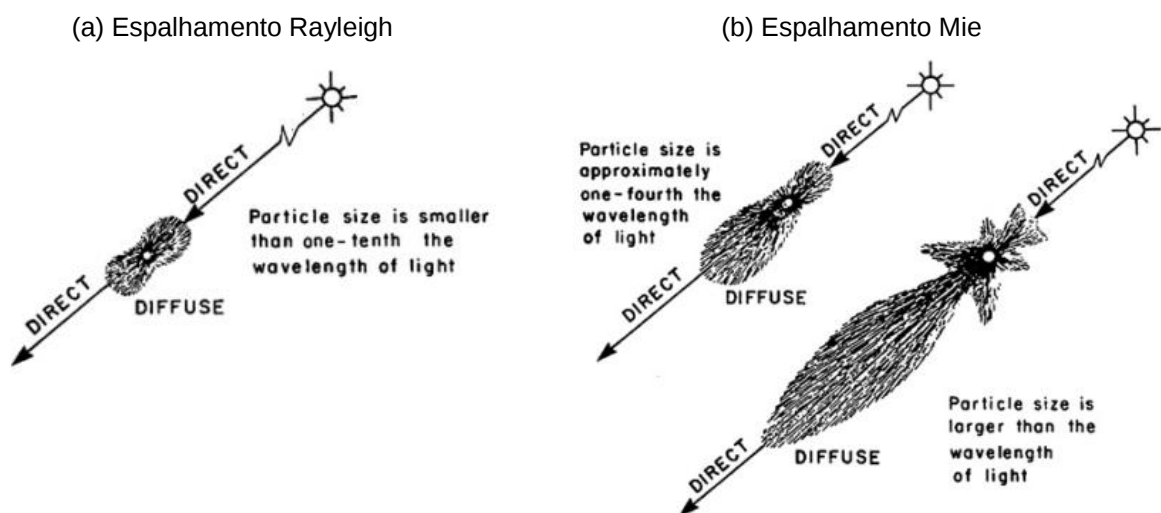
A radiação solar que chega a superfície terrestre é denominada, radiação solar global, e é dividida em duas componentes, direta e difusa. Segundo Drummond (1956, tradução nossa), "A radiação solar global é normalmente definida como a soma da radiação solar direta e da radiação difusa, sendo as duas componentes recebidas em um plano horizontal na superfície da Terra.". A componente direta da radiação solar que incide sobre a superfície não sofre nenhuma interferência da atmosfera. A parcela difusa da radiação solar é oriunda do processo de

espalhamento da radiação devido à colisão da radiação com partículas da atmosfera. Quando uma partícula é atingida por uma onda eletromagnética, parte da energia incidente se espalha por todas as direções, essa energia é conhecida como radiação difusa (IQBAL, 1983).

O espalhamento da radiação pode ser classificado de duas formas:

- a) espalhamento Rayleigh - ocorre quando o espalhamento é causado por partículas com diâmetro menor que $1/10$ do comprimento de onda (IQBAL, 1983). Ocorre principalmente nas altas camadas da atmosfera e é causada principalmente por gases sob a condição de céu claro e limpo. Tem como característica ser uniforme, sendo conhecido como isotrópico. Ver Figura 1 (a).
- b) espalhamento Mie - o espalhamento Mie é provocado por partículas com diâmetro na ordem do comprimento de onda. Este espalhamento é causado por vapor de água e aerossóis. Ocorre principalmente em atmosferas poluídas. O espalhamento da radiação por partículas dessa grandeza caracteriza-se pela não uniformidade, sendo conhecido como anisotrópico. Segundo Dal Pai (2005) este espalhamento "... é mais marcante na região em torno da aureola solar, causando o surgimento da radiação circunsolar, computada na forma de radiação difusa.". Ver Figura 1 (b).

Figura 1: Espalhamento Rayleigh e Mie



Fonte: Iqbal (1983, p. 122)

Informações da radiação solar, em especial os dados da componente direta, são imprescindíveis em estudos relacionados à energia fotovoltaica e fototérmica (MAKRIDES et al., 2010). A componente direta da radiação solar pode ser obtida subtraindo a radiação difusa da radiação global. Assim, quando esta metodologia é

empregada, a qualidade da medida da radiação difusa impacta diretamente na estimativa da radiação direta. Uma subestimação da medida da radiação difusa implica em uma superestimação da radiação direta. E uma superestimação da radiação difusa provoca uma subestimação da radiação direta.

1.2 Métodos de medição da radiação difusa

Dados sobre as radiações global e difusa no plano horizontal são mais comuns de serem encontradas em estações meteorológicas. Estes dados são mais fáceis e menos dispendiosos de serem obtidos. A medição da componente direta é menos comum devido ao alto custo envolvido e as dificuldades de operação do rastreador utilizado no posicionamento do Pireliômetro (sensor utilizado para medir a radiação direta) (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002; KUDISH; EVSEEV, 2008; DAL PAI et al., 2016).

Quando as medidas da radiação global no plano horizontal e da radiação direta na incidência normal estão disponíveis, a componente difusa pode ser obtida pelo método da diferença conforme a equação (1) (BATLLES et al., 1995).

$$I_d = I_G - I_{dir} * \cos \theta_z \quad (1)$$

Onde:

I_d - Irradiação difusa;

I_G - Irradiação Global na horizontal;

I_{dir} - Irradiação direta na incidência normal;

θ_z - Ângulo zenital.

Outra maneira de se obter a componente difusa é posicionando o dispositivo detector sob um aparato que bloqueie a radiação direta. Um dos métodos utilizado para este fim é o disco de sombreamento. Um disco é acoplado a um rastreador solar projetando uma sombra sobre o sensor conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Método do disco de sombreamento



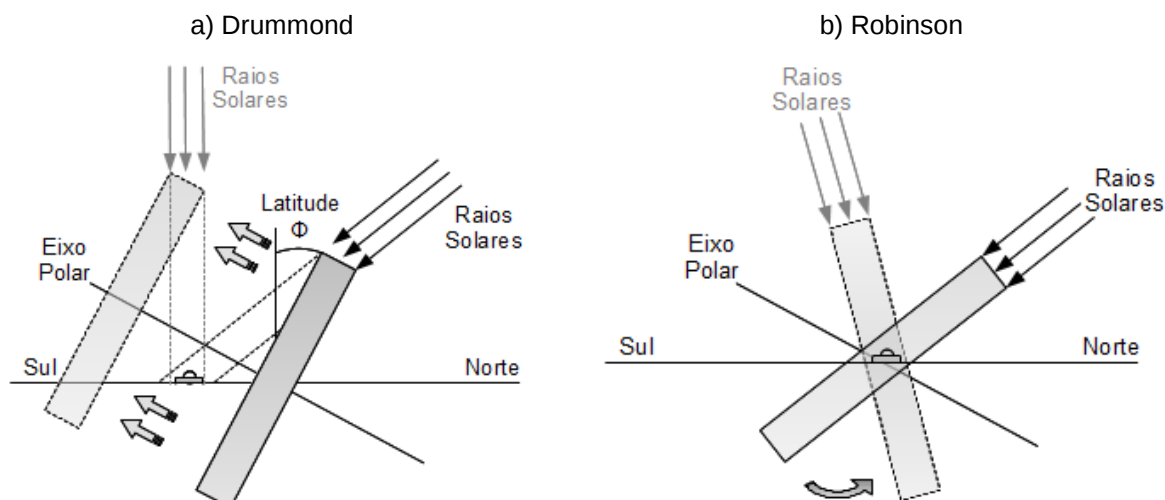
Fonte: Lenz (2020, p. 27)

Segundo Ineichen et al. (1984 apud BATLLES et al. 1995, tradução nossa) "Este método requer pequena correção.". Mas, devido ao uso do dispositivo rastreador, o anel de sombreamento apresenta as mesmas desvantagens associadas à medição da radiação direta, ou seja, alto custo e necessidade de pessoal especializado (BATLLES et al., 1995).

Por causa dessas desvantagens as medidas da radiação difusa são realizadas protegendo um piranômetro da radiação direta por meio de um anel ou banda de sombreamento. "O anel é orientado perpendicularmente ao eixo polar em um ângulo igual à latitude local, a fim de sombrear o sensor do nascer ao pôr do sol..." (DAL PAI et al., 2016).

As configurações mais conhecidas do anel de sombreamento são as de Drummond (1956), Figura 3 (a), e a de Robinson e Stoch (1964), Figura 3 (b). Na montagem de Drummond o sensor (piranômetro) permanece fixo e o anel de sombreamento é alinhado em direção ao eixo polar. O anel é posicionado com uma inclinação igual à latitude local, de maneira que a sombra projetada cubra o sensor durante todo o dia. A variação contínua da declinação solar é compensada transladando o anel paralelamente ao eixo polar. Na montagem de Robinson o sensor é fixado no centro de um anel alinhado em direção ao eixo polar. A declinação solar é compensada rodando o anel ao redor do seu eixo.

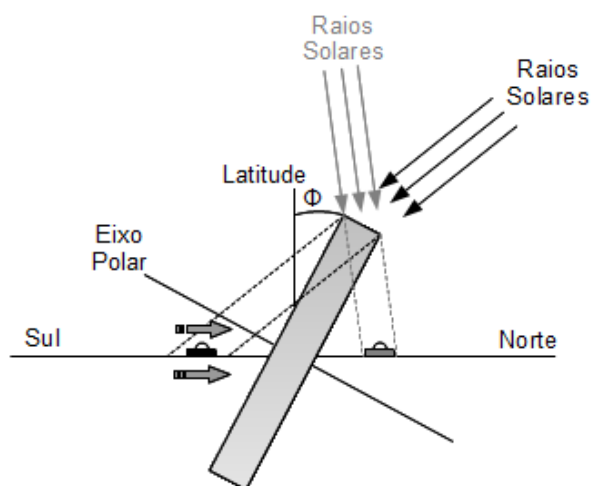
Figura 3: Configurações de anel de sobreamento clássicas.



Fonte: Fonte própria

Na década de noventa, mais precisamente em 1994, Melo e Escobedo propuseram a montagem MEO, Figura 4. Nesta configuração, o anel é orientado para o eixo polar com uma inclinação igual à latitude local. Mas, diferente das montagens de Drummond e Robinson, o anel permanece fixo. A declinação solar é compensada com o deslocamento do sensor no sentido norte-sul paralelo ao plano do horizonte.

Figura 4: Montagem MEO



Fonte: Fonte própria

O método de medição da radiação difusa com o anel de sobreamento é relativamente barato e de fácil operação. Porém, apresentam um erro sistemático nas medidas devido à porção de radiação difusa obstruída pelo anel. O fator de correção (F_c), calculado pela equação (2), é aplicado nas medidas para compensar a parcela da radiação difusa barrada pelo anel.

$$F_C = \frac{1}{1 - F_P} \quad (2)$$

Onde:

F_P - Parcela da radiação difusa obstruída pelo anel de sombreamento.

As equações (3), (4) e (5), fornecem a parcela (F_P) para as montagens de Drummond, Robinson e MEO respectivamente.

$$F_P = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot (\cos \delta)^3 \cdot \int_0^{\omega_s} \cos \theta_Z d\omega \quad (3)$$

$$F_P = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot \cos \delta \cdot \int_0^{\omega_s} \cos \theta_Z d\omega \quad (4)$$

$$F_P = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cdot \cos \delta \cdot \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos \phi}\right]^2 \cdot \int_0^{\omega_s} \cos \theta_Z d\omega \quad (5)$$

Onde:

b - largura do anel; R - raio do anel; δ - declinação solar; ϕ - latitude local; ω - ângulo horário; θ_Z - ângulo zenital.

Estas equações assumem que a componente difusa da radiação solar tem uma distribuição isotrópica. São considerados os fatores geométricos (largura e raio do anel), e os fatores geográficos (declinação solar e latitude). O cálculo da fração de perda da equação (5) foi proposto por Oliveira, Escobedo e Machado (2002). No mesmo trabalho, as principais propriedades geométricas referentes ao método MEO foram comparadas as de Drummond e Robinson. Os resultados indicaram que o (F_C) para o anel MEO é maior no verão e menor no inverno (similar ao anel de Robinson).

Outro aspecto verificado foi o tamanho da sombra projetada pelo anel no plano horizontal. Esta característica determina a autonomia operacional, ou seja, o tempo sem ajuste manual para compensar a variação contínua da declinação solar. Foram comparadas as razões de sombra (w/r) das três montagens, sendo w a largura da sombra projetada e r a largura do anel, constatou-se que a evolução anual do tamanho da sombra do anel MEO é idêntica a montagem de Drummond (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002).

Segundo Martín et al. (2016), a irradiação difusa bloqueada pode ser estimada de duas maneiras. Sob a hipótese de que a radiação é isotrópica, portanto

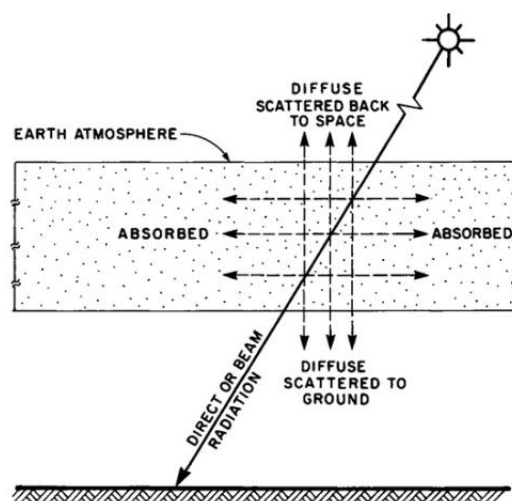
homogênea, necessitando apenas de um estudo geométrico para a correção. Ou sob a hipótese de que a radiação é anisotrópica. Neste caso faz-se necessário a aplicação de modelos empíricos ou teóricos para a modelagem da anisotropia.

Dal Pai et al. (2016) propôs aplicar ao método do anel de sobreamento MEO, correção isotrópica somada à correção anisotrópica (em função da transmissividade atmosférica). As medidas obtidas apresentaram desvio menor que 1% quando comparadas à radiação difusa de referência.

1.3 Cobertura de céu (Índices radiométricos K_t e K_d)

A radiação solar sofre mudança de intensidade ao passar pela atmosfera terrestre devido aos fenômenos de reflexão, absorção e espalhamento. Uma parcela da radiação que sofre espalhamento é refletida de volta ao espaço, à outra parcela chega ao solo e é conhecida como radiação difusa. A parcela de radiação que chega ao solo numa incidência normal ao disco solar é chamada de radiação direta. A soma da radiação direta e difusa é chamada radiação global (IQBAL, 1983). A Figura 5 apresenta a distribuição da radiação solar direta, difusa e refletida na atmosfera.

Figura 5: Radiação solar direta, difusa e absorvida.



Fonte: Iqbal (1983, p. 118)

A transmissividade atmosférica, também chamada de índice de claridade (K_t), permite classificar a cobertura do céu. Este índice (adimensional) é definido pela razão entre a irradiância global e a irradiância extraterrestre, conforme a equação (6).

$$Kt = \frac{I_G}{I_0} \quad (6)$$

Onde:

I_G - irradiância global dada em W/m^2 ;

I_0 - irradiância extraterrestre dada em W/m^2 .

A fração difusa (K_D) é definida pela razão entre a irradiância difusa e a irradiância global conforme a equação (7).

$$K_D = \frac{I_D}{I_G} \quad (7)$$

Onde:

I_D - irradiância difusa dada em W/m^2 ;

I_G - irradiância global dada em W/m^2 .

Várias pesquisas sugerem a associação de parâmetros anisotrópicos aos isotrópicos com o intuito de melhorar a precisão das medidas de radiação difusa, obtidas por métodos que utilizam anel de sombreamento (KASTEN et al., 1983; BATLLES et al., 1995; LEBARON et al., 1990; DAL PAI et al., 2016;). Normalmente, o índice de transmissividade (Kt) é usado nos modelos de correção indicando e classificando a cobertura do céu.

Neste trabalho será utilizada a classificação proposta por (ESCOBEDO et al., 2009) conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Intervalos do índice de transmissividade (Kt) e cobertura de céu de acordo com a classificação de Escobedo.

Intervalos de Kt	Cobertura do céu
$0 \leq Kt < 0,35$	Nublado
$0,35 \leq Kt < 0,55$	Parcialmente nublado
$0,55 \leq Kt < 0,65$	Parcialmente aberto
$0,65 \leq Kt < 1$	Aberto

FONTE: Adaptado de (ESCOBEDO et al., 2009).

1.4 Indicativos Estatísticos

O desempenho das correções isotrópica e anisotrópica das medidas obtidas pelos anéis de sombreamento em relação às medidas de referência foi avaliado por meio dos seguintes indicadores estatísticos: MBE (*Mean Bias Error*), MBE(%), RMSE (*Root Mean Square Error*), RMSE(%) e o coeficiente de determinação (R^2).

O MBE em português (desvio das médias) indica o desvio médio entre os valores previstos e medidos. O MBE fornece informação em longo prazo de um determinado modelo. Valores positivos indicam superestimação e valores negativos, subestimação. O MBE ideal é igual à zero. O ponto negativo deste índice são os erros de cancelamento onde a soma de valores positivos e negativos podem cancelar-se mutuamente reduzindo o valor do MBE. (IQBAL, 1983; DAL PAI et al., 2016; RUIZ; BANDERA, 2017).

O MBE é calculado pela equação (8):

$$MBE = \left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)}{N} \right) \quad (8)$$

Onde:

y_i - i-ésimo valor estimado;

x_i - i-ésimo valor medido;

N - número de observações.

O desvio das médias normalizado MBE(%), equação (9), é a forma normalizada do MBE. A normalização permite a comparação entre resultados do MBE (RUIZ; BANDERA, 2017).

$$MBE(\%) = \left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)}{\sum_i^N (x_i)} \right) * 100(\%)$$

Ou

$$MBE(\%) = \frac{\left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)}{N} \right)}{\bar{x}} * 100(\%) \quad (9)$$

Onde:

y_i - i-ésimo valor estimado;

x_i - i-ésimo valor medido;

N - número de observações;

$\bar{x}$ - valor médio medido.

Outro índice utilizado na avaliação de desempenho é o RMSE (*Root Mean Square Error*) ou raiz do desvio quadrático médio, calculado por meio da equação (10). Esse índice fornece informação em curto prazo de um modelo e é sempre positivo. O valor ideal é zero. Pequenos valores indicam menor dispersão entre dados e os valores previstos. O RMSE não está sujeito a erros de cancelamento.

Devido a essa característica, o RMSE é normalmente usado para complementar as análises de modelos realizadas pelo índice MBE. Este índice apresenta duas desvantagens: poucos erros contendo grandes variações podem aumentar substancialmente o RMSE e este índice não diferencia superestimação de subestimação (IQBAL, 1983; DAL PAI et al., 2016; RUIZ; BANDERA, 2017; ZAMADEI et al., 2018).

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N}\right)} \quad (10)$$

A forma normalizada do RMSE é dada pela equação (11).

$$RMSE(\%) = \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N\right)^{1/2}}{\bar{X}} * 100(\%) \quad (11)$$

Onde:

y_i - i-ésimo valor estimado;

x_i - i-ésimo valor medido;

N - número de observações;

$\bar{X}$ - valor médio medido;

O coeficiente de determinação (R^2) indica o grau de ajustamento do modelo relacionando as medidas estimadas e as medidas de referência da irradiância difusa. Este índice é utilizado para medir a incerteza de modelos. O coeficiente de determinação (R^2) varia entre 0 e 1. Se um determinado modelo apresentar ($R^2 = 1$), significa que os dados estimados a partir do modelo correspondem perfeitamente aos valores observados. Por outro lado um ($R^2 = 0$) aponta que não existe uma dependência linear entre ambos ou que a correlação não é linear.

O coeficiente de determinação (R^2) pode ser obtido elevando-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) ao quadrado. O coeficiente de correlação de Pearson varia de -1 a 1 e mede a intensidade da relação linear entre duas variáveis. O valor (-1) e (1) indicam relação linear perfeita e um valor igual a zero que não existe relação linear entre as variáveis. A equação (12) apresenta o coeficiente de correlação de Pearson (r) e a equação (13) o coeficiente de determinação (R^2).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2] \cdot [\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2]}} \quad (12)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2] \cdot [\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2]}} \right\}^2 \quad (13)$$

Onde:

y_i - i-ésimo valor estimado;

x_i - i-ésimo valor medido;

N - número de observações;

$\bar{x}$ - valor médio medido;

$\bar{y}$ - valor médio estimado.

CAPÍTULO 1

INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA REALIZADAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO

Angelo Feracin Neto – angelo@utfpr.edu.br
 UTFPR/Cornélio Procópio/PR, Departamento de Engenharia Elétrica.
 Alexandre Dal Pai – adalpai@fca.unesp.br
 UNESP/FCA/Botucatu/SP, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia.

Resumo. Este trabalho estuda a influência dos aspectos construtivos (largura e raio) na medida da irradiância difusa pelo método do anel de sombreamento MEO (Melo-Escobedo-Oliveira). São analisados dados de dois anéis com dimensões diferentes que possuem a mesma razão largura/Raio (b/R). Os dados foram obtidos da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP-Botucatu entre os anos de 2000 a 2007. O desempenho de cada anel é analisado em função do índice de transmissividade (K_t). Os dados apontam que às medidas de irradiância difusa entre os dois anéis são diferentes, apesar de se manter a mesma razão b/R .

Palavras-chave: Radiação difusa. Anel de sombreamento MEO. Anisotropia.

1. INTRODUÇÃO

O sol é a principal fonte de energia que controla o clima do planeta. Sua radiação influencia os fenômenos meteorológicos e climáticos. A radiação solar interage com elementos da atmosfera (água, gases, aerossóis, etc.) sofrendo processos de absorção, espalhamento e reflexão.

A radiação solar que chega a superfície terrestre é denominada, radiação global. Esta radiação é dividida em duas componentes, difusa e direta. A parcela da radiação que sofre espalhamento é conhecida como radiação difusa. Uma parcela dessa radiação é refletida de volta ao espaço e a outra chega à superfície terrestre. A parcela da radiação solar que chega ao solo em uma incidência normal ao disco solar é conhecida como radiação direta.

Dados de radiação solar são importantes para áreas como: arquitetura, engenharia civil, meteorologia, etc. Nas ciências relacionadas à agronomia, a energia solar é amplamente pesquisada em trabalhos que envolvem a fotossíntese, transpiração, floração, enchimento dos grãos, entre outros (MUCHOW; SINCLAIR; BENNETT, 1990; CAMPILLO; FORTES; PRIETO, 2012). Informações da irradiação solar, em especial os dados da componente direta, são imprescindíveis em estudos relacionados à energia fotovoltaica e fototérmica (MAKRIDES et al., 2010).

Para estudos que envolvem o aproveitamento da energia solar é importante que o banco de dados inclua as componentes direta, difusa e global da radiação solar.

Dados de radiação difusa podem ser obtidos a partir da diferença entre a radiação global e direta, (Método da Diferença). Este método depende de dados da radiação direta. A medição da componente direta é menos comum devido ao alto custo envolvido e as dificuldades de operação do rastreador utilizado no posicionamento do Pireliômetro (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002; KUDISH; EVSEEV, 2008; DAL PAI et al., 2016).

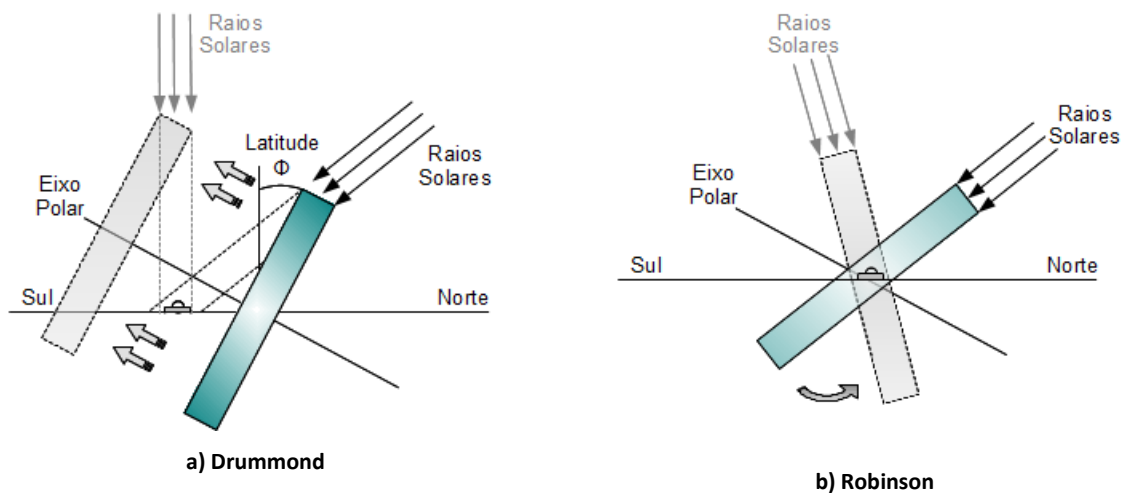
Uma forma alternativa de se realizar a medição da radiação difusa é através do método do disco de sombreamento. Um disco é acoplado a um rastreador solar projetando

uma sombra sobre o sensor. O fator de correção associado a este método costuma ser pequeno. Mas, devido ao emprego do dispositivo rastreador, o método do disco de sombreamento apresenta as mesmas desvantagens associadas à medição da radiação direta (BATLLES et al., 1995).

Outra forma de se obter medidas da radiação difusa é através do método do anel de sombreamento. O método do anel de sombreamento consiste em proteger um piranômetro da radiação direta por meio de um anel ou banda de sombreamento. Este método é uma alternativa menos dispendiosa e requer equipamentos e montagens mais simples.

As configurações mais difundidas do anel de sombreamento são as de Drummond (1956) (Figura 1a), e a de Robinson e Stoch (1964) (Figura 1b). Na montagem de Drummond, o sensor (piranômetro) permanece fixo e o anel de sombreamento é alinhado em direção ao eixo polar. O anel é ajustado com uma inclinação igual à latitude local de maneira que a sombra projetada cubra o sensor durante todo o dia. A declinação solar é compensada deslocando o anel paralelamente ao eixo polar. Na montagem de Robinson o sensor é fixado no centro de um anel alinhado em direção ao eixo polar. A declinação solar é compensada rodando o anel ao redor do seu eixo.

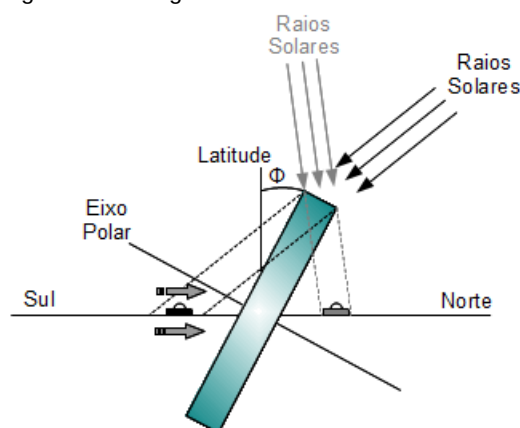
Figura 1: Configurações dos anéis de sobreamento: a) Drummond e b) Robinson



Fonte: Elaboração própria

Com o passar dos anos, dependendo do peso e tamanho dos anéis, os movimentos de translação/rotação das montagens de Drummond e Robinson podem provocar desgastes excessivos em suas estruturas (DAL PAI et al., 2016). Nos anos 90 uma configuração alternativa denominada "MEO" foi proposta por Melo e Escobedo (1994), ver Figura 2. Nesta configuração, o anel é orientado para o eixo polar com uma inclinação igual à latitude local. Mas, diferente das montagens de Drummond e Robinson, o anel permanece fixo. A declinação solar é compensada com a movimentação do piranômetro no plano horizontal através de um mecanismo dotado de uma barra roscada e uma manivela. Este mecanismo confere a configuração MEO maior robustez além de simplificar a sua operação quando comparado às outras configurações que mantêm o sensor fixo (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002).

Figura 2: Montagem do anel de sobreamento MEO



Fonte: Elaboração própria

O anel de sombreamento é relativamente barato e de fácil operação. Porém, devido à parcela de céu obstruída, parte da radiação difusa é impedida de chegar ao piranômetro causando uma subestimação nas medidas. Este erro sistemático é normalmente compensado com a aplicação de um fator de correção isotrópico baseado na geometria (largura e raio do anel) e em fatores geoespaciais (declinação solar e latitude). (IQBAL, 1983; SIRÉN, 1987).

Devido à anisotropia da radiação difusa, é difícil a obtenção de uma correção teórica exata (BATLLES *et al.*, 1995). Por outro lado, a aplicação isolada da correção isotrópica mostra-se insuficiente na compensação das perdas. Melhores resultados podem ser obtidos combinando uma abordagem teórica (correção isotrópica) e experimental (correção anisotrópica), (IQBAL, 1983; SIRÉN, 1987; DAL PAI *et al.*, 2016).

Várias pesquisas sugerem a associação de parâmetros anisotrópicos aos isotrópicos com o intuito de melhorar a precisão das medidas de radiação difusa, obtidas por métodos que utilizam anel de sombreamento (KASTEN *et al.*, 1983; BATLLES *et al.*, 1995; LEBARON *et al.*, 1990; DAL PAI *et al.*, 2016).

Dal Pai *et al.* (2016) propôs aplicar ao método do anel de sobreamento MEO, correção isotrópica somada à correção anisotrópica (em função da transmissividade atmosférica K_t). As medidas obtidas apresentaram desvio menor que 1% quando comparadas à radiação difusa de referência.

Este trabalho estuda as medidas de irradiância difusa de dois anéis configuração MEO no período de oito anos (2000 a 2007). Os anéis, objetos desse estudo, possuem medidas distintas, mas conservam a mesma razão Largura/Raio (b/R).

2. METODOLOGIA

Local

A base de dados utilizada neste trabalho foi obtida da estação de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP-Botucatu (latitude 22,85° Sul, longitude 48,45° Oeste, altitude 786m), ver Figuras 3 e 4.

A cidade de Botucatu no estado de São Paulo possui uma população estimada de 146.497 habitantes (IBGE, 2020). A economia é baseada na agricultura, indústria, turismo e comércio. Possui parque industrial sendo a sua principal fonte de poluição atmosférica a produção rural. Entre o período de seca e o início das chuvas (meados de julho a novembro), usinas de açúcar e álcool, situadas em um raio de 100 km, promoviam extensas queimadas o que aumentava a concentração de aerossóis na atmosfera (DAL PAI, E. 2010). Atualmente as queimadas são proibidas por lei.

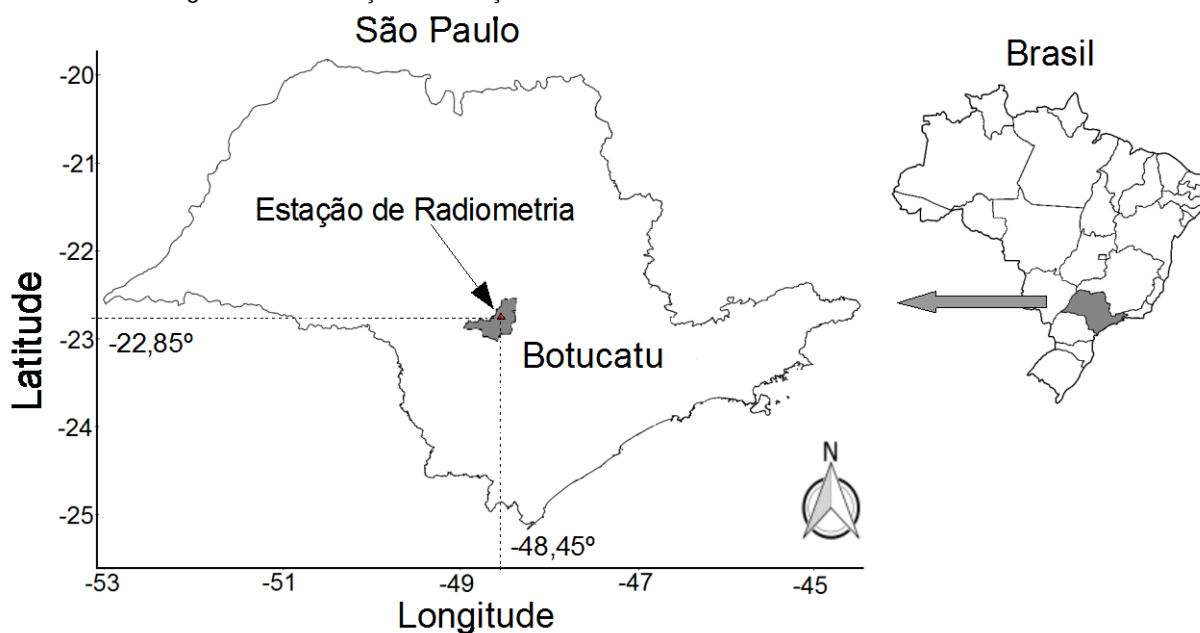
Figura 3 - Estação Radiométrica da UNESP - Botucatu - SP.



Fonte: (DAL PAI, 2005).

No verão o tempo em Botucatu é quente e úmido e no inverno frio e seco. O dia mais longo ocorre em dezembro (13,4 horas) e o dia mais curto em junho (10,6 horas). O período das chuvas ocorre em fevereiro, mas o mês de janeiro apresenta a maior precipitação mensal acumulada (260,7mm). No mês de agosto a precipitação cai para (38,2 mm) sendo o mês mais seco. (ESCOBEDO et al., 2011).

Figura 4 - Localização da Estação de Radiometria da FCA UNESP - Botucatu- SP



Fonte: Elaboração própria

Instrumentação

A irradiância direta na incidência, foi medida com um pireliômetro Eppley-NIP ($K= 7,73 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$) acoplado a um sistema de rastreamento solar ST-3. Um piranômetro Eppley-PSP ($K= 8,13 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$), foi utilizado para medir a irradiância global no plano horizontal.

As medidas da irradiância difusa foram realizadas com dois anéis de sombreamento tipo MEO com tamanhos diferentes numa proporção de 2:1. O primeiro anel (MEO_1) foi construído com as seguintes dimensões: 0,40m de raio e 0,10m de largura, associado a um piranômetro Eppley-PSP ($K= 8,17 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$). O segundo anel (MEO_2) possuindo as seguintes dimensões: 0,20m de raio e 0,05m de largura com piranômetro Kipp-Zonen ($K= 11,99 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$). Os anéis foram construídos respeitando a razão largura/Raio (b/R) igual a 0,25. A Figura 5 apresenta os equipamentos de medida utilizados.

Figura 5 - Dispositivos de medida da irradiação solar. a) Pireliômetro (direta). b) Piranômetro com anel de sombreamento MEO (difusa); c) Piranômetro (global).



(a)



(b)



(c)

Fonte: (DAL PAI et al., 2015).

Os dados de irradiância foram monitorados e armazenados automaticamente por um Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc[®]. Foi adotada uma frequência de varredura de 0,2Hz. O Datalogger armazenava a média de 60 valores de irradiância a cada 5 minutos na unidade (W/m²).

Dados

Os dados foram adquiridos entre os anos de 2000 a 2007. As medidas de irradiância difusa dos anéis de sombreamento (MEO₁ e MEO₂) sofreram correção isotrópica através das equações (2) e (3). O cálculo da irradiância difusa de referência foi obtido por meio da equação (1) pelo método da diferença entre as irradiâncias global e direta projetada na horizontal.

$$I_d = I_G - I_{dir} * \cos \theta_z \quad (1)$$

Onde: I_d - Irradiância difusa; I_G - Irradiância Global na horizontal; I_{dir} - Irradiância direta na incidência normal; θ_z - Ângulo zenital.

Os dados foram filtrados utilizando critérios baseados no trabalho de Kudish e Evseev (2008). As medidas que não continham um conjunto completo de dados *i.e.*, (medidas de irradiância difusa dos dois anéis, irradiância global e irradiância direta) foram removidos. Além disso, foram considerados fatores como: desalinhamento, fios danificados, falta de eletricidade, etc.

O fator de correção (F_c), calculado conforme equação (2), foi aplicado às medidas para compensar a parcela da radiação difusa barrada pelo anel.

$$F_c = \frac{1}{1 - F_p} \quad (2)$$

Onde: F_p - Parcela da radiação difusa obstruída pelo anel de sombreamento.

A equação (3) fornece a parcela (F_p) para a montagem MEO.

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cdot \cos \delta \cdot \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos \phi} \right]^2 \cdot \int_0^{\omega_s} \cos \theta_z d\omega \quad (3)$$

Onde: b - largura do anel, R - raio do anel, δ - declinação solar, ϕ - latitude local, ω - ângulo horário, θ_z - ângulo zenital.

Esta equação assume que a componente difusa da radiação solar tem uma distribuição isotrópica. São considerados os fatores geométricos (largura e raio do anel), e os fatores geoespaciais (declinação solar e latitude). O cálculo da fração de perda, equação (3), foi proposto por Oliveira, Escobedo e Machado (2002). No mesmo trabalho, as principais propriedades geométricas referentes ao método MEO foram comparadas as de Drummond e Robinson, o estudo indicou que o (F_c) para o anel MEO é maior no verão e

menor no inverno (similar ao anel de Robinson). Outro aspecto verificado foi o tamanho da sombra projetada pelo anel no plano horizontal. Esta característica determina a autonomia operacional, ou seja, o tempo sem ajuste manual da declinação solar. Foram comparadas as razões de sombra (w/r) das três montagens, sendo w a largura da sobra projetada e r a largura do anel, constatou-se que a evolução anual do tamanho da sombra do anel MEO é idêntica a montagem de Drummond (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002).

Classificação da Cobertura de Céu

Diversos trabalhos tem utilizado o índice de transmissividade (Kt) em modelos de correção indicando e classificando quantitativamente a cobertura do céu (IQBAL, 1983; WENXIAN et al., 1996; RENSHENG et al., 2004; DAL PAI et al., 2016).

O desempenho de cada anel foi analisado em função do índice de transmissividade (Kt) dado pela equação (4).

$$Kt = \frac{I_G}{I_0} \quad (4)$$

Onde: I_G - irradiância global (W/m^2); I_0 - irradiância extraterrestre (W/m^2).

Neste trabalho foi adotada a classificação proposta por (ESCOBEDO et al., 2009) conforme Tabela 1.

Tabela 1- Intervalos do índice de transmissividade (Kt) e cobertura de céu de acordo com a classificação de Escobedo et al., (2009).

Intervalos de Kt	Cobertura do céu
$0 \leq Kt < 0,35$	Nublado
$0,35 \leq Kt < 0,55$	Parcialmente nublado
$0,55 \leq Kt < 0,65$	Parcialmente aberto
$0,65 \leq Kt < 1$	Aberto

FONTE: Adaptado de (ESCOBEDO et al., 2009).

Indicativos Estatísticos

O desempenho da correção anisotrópica foi avaliado por meio dos seguintes indicadores estatísticos: MBE (Mean Bias Error), MBE(%), RMSE (Root Mean Square Error), RMSE(%).

O MBE (desvio das médias) equações (5) e (6) indicam o desvio médio entre os valores previstos e medidos. Este índice fornece informação em longo prazo de um determinado modelo. Valores positivos indicam superestimação e valores negativos, subestimação. O MBE ideal é igual à zero. Um ponto negativo são os erros de cancelamento onde a soma de valores positivos e negativos podem cancelar-se mutuamente reduzindo o valor do MBE. (IQBAL, 1983; DAL PAI et al., 2016; RUIZ; BANDERA, 2017).

$$MBE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \right) \quad (5)$$

$$MBE(\%) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^N (x_i)} \right) * 100(\%) \quad (6)$$

Onde: y_i é o i -ésimo valor estimado (W/m^2), x_i é o i -ésimo valor medido (W/m^2) e N é o número de observações.

Outro índice utilizado na avaliação de desempenho foi o RMSE (Root Mean Square Error) ou raiz do desvio quadrático médio, calculado por meio das equações (7) e (8). Este índice fornece informação em curto prazo de um modelo e é sempre positivo. O valor ideal é

zero. Pequenos valores indicam menor dispersão entre dados e modelo. O RMSE não está sujeito a erros de cancelamento. Este índice apresenta duas desvantagens: poucos erros contendo grandes variações podem aumentar substancialmente o RMSE e este índice não diferencia superestimação de subestimação (IQBAL, 1983; DAL PAI et al., 2016; RUIZ; BANDERA, 2017; ZAMADEI et al., 2018).

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_i^N (y_i - x_i)^2}{N}\right)} \quad (7)$$

$$RMSE(\%) = \frac{\left(\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N\right)^{1/2}}{\bar{X}} * 100(\%) \quad (8)$$

Onde: y_i é o i -ésimo valor estimado (W/m^2), x_i é o i -ésimo valor medido (W/m^2), N é o número de observações e $\bar{X}$ o valor médio medido.

A avaliação do grau de ajustamento das correlações foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2). Este índice indica a incerteza de modelos. Se um determinado modelo apresentar ($R^2 = 1$), significa que o modelo corresponde perfeitamente aos valores observados. Por outro lado um ($R^2 = 0$) aponta que não existe uma dependência linear entre ambos ou que a correlação não é linear.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foram comparadas medidas de irradiância difusa obtidas por meio de anéis de sombreamento do tipo MEO com dimensões diferentes. A Tabela 2 apresenta os dados referentes a cada montagem. A irradiância difusa de referência foi obtida conforme apresentado na equação (1). Essa equação calcula a diferença entre a irradiância global e a irradiância direta no plano horizontal.

Tabela 2 - Dimensões e piranômetros associados aos dispositivos MEO₁ e MEO₂

Dispositivo	Largura do Anel (b)	Raio do Anel (R)	Piranômetro
MEO ₁	0,10m	0,40m	Eppley-PSP (K = 8,17 $\mu Vm^2/W$)
MEO ₂	0,05m	0,20m	Kipp-Zonen (K= 11,99 $\mu Vm^2/W$)

O desempenho de cada anel foi analisado em função do índice de transmissividade K_t seguindo a Tabela 1.

A Figura 6 apresenta a correlação entre as medidas de irradiância difusa na condição de céu nublado. A grande concentração de nuvens impede que os raios solares atinjam diretamente o solo, além de favorecer o espalhamento isotrópico da radiação difusa. Consequentemente a atmosfera apresenta baixa anisotropia.

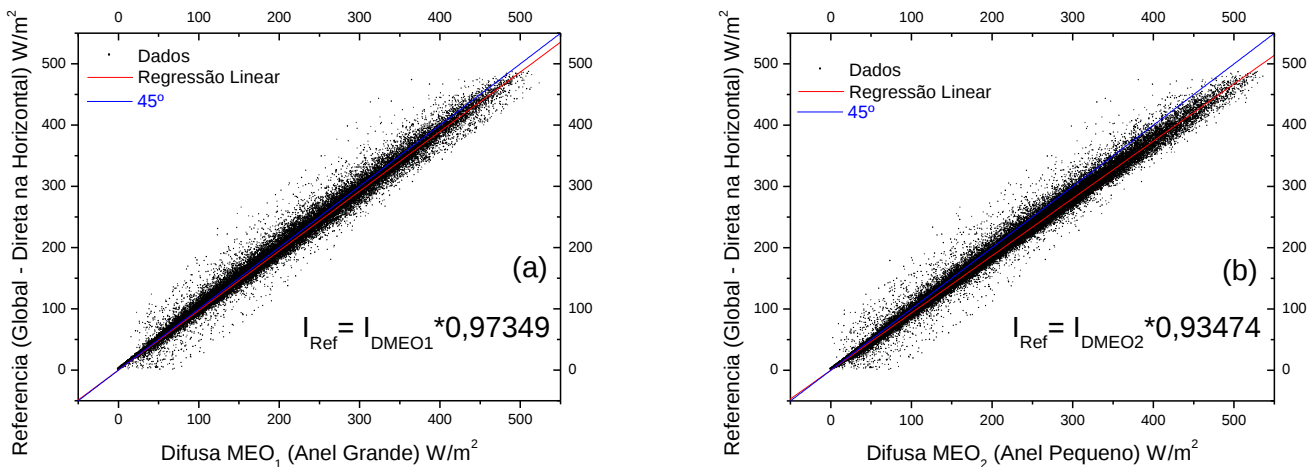
As medidas de irradiância difusa obtidas pelos anéis sofreram correção isotrópica. Na condição de céu nublado, as medidas de ambos os anéis são superestimadas, ver Figura 6 (a) e (b). O anel grande (MEO₁) superestima a irradiância difusa em 2,65% e o anel pequeno (MEO₂) em 6,53%. As medidas do anel pequeno (MEO₂) são submetidas ao mesmo fator de correção isotrópico aplicado ao anel grande (MEO₁), pois possuem a mesma razão largura/raio (b/R) conforme apresentado na equação (9). Os outros fatores considerados no cálculo das equações (2) e (3): declinação solar (δ), latitude local (Φ), ângulo horário (ω) e ângulo zenital (θ_z), são os mesmos para os dois anéis.

$$\frac{b}{R} = \frac{0,10m}{0,40m} = \frac{0,05m}{0,20m} = 0,25 \quad (9)$$

Onde: b - largura do anel de sombreamento; R - raio do anel de sombreamento.

Na região de Botucatu entre os meses de outubro e fevereiro (meses correspondentes à primavera e verão), ocorre uma alta frequência de céu nublado. Coincidentemente, o fator isotrópico calculado pelas equações (2) e (3) para esse período apresentam os maiores valores (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002; DAL PAI *et al.*, 2016). Dal Pai *et al.* (2016) acrescenta que as nuvens funcionam como um segundo dispositivo de sombreamento, bloqueando a radiação direta e fazendo que a irradiância global seja aproximadamente igual à irradiância difusa. Assim, (na condição de céu nublado), o fator de correção isotrópico torna-se maior que o necessário em uma parcela significativa dos dados, provocando a superestimação das medidas. A diferença entre as medidas apresentadas pelos anéis MEO₁ e MEO₂, está relacionada às dimensões dos anéis.

Figura 6 - Correlação entre as irradiâncias difusa sob céu nublado: a) Referência versus MEO₁. b) Referência versus MEO₂.



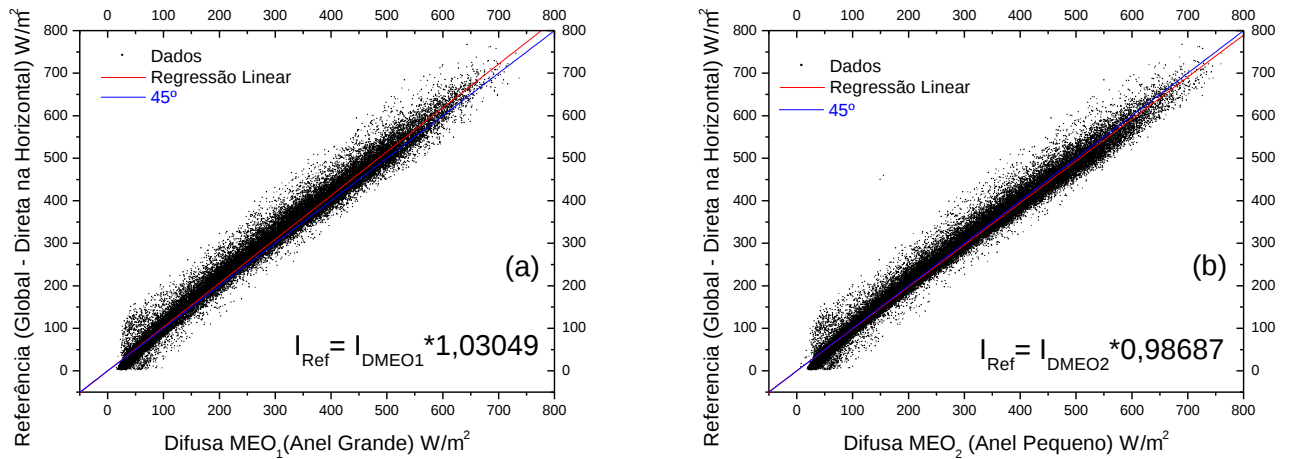
Na condição de céu parcialmente nublado ($0,35 \leq Kt < 0,55$) ocorre a predominância da radiação difusa sobre a direta. A Figura 7 (a) apresenta a correlação entre a irradiância difusa do anel grande (MEO₁) e a referência. Nesta condição de céu o anel (MEO₁) subestima a medida de irradiância difusa em 3,05%. No entanto, o anel pequeno (MEO₂) superestima a irradiância difusa em relação à referência em 1,31%, ver Figura 7 (b). Nessa condição de céu, apesar de predominar a radiação difusa, começa a surgir uma componente direta em menor intensidade contribuindo com uma parcela de radiação difusa anisotrópica. Somadas, essas características influenciam nas medidas de irradiância difusa verificadas. Considerando que os dois anéis foram corrigidos com o mesmo fator de correção isotrópico, a superestimação da irradiação do anel (MEO₂) pode ser explicada devido à diferença entre as dimensões dos anéis. O anel (MEO₂) barra uma parcela menor da radiação difusa se comparado ao anel (MEO₁) e a correção isotrópica acaba sendo maior que a necessária provocando a superestimação.

A Figura 8 apresenta as mesmas correlações anteriores sob a cobertura de céu parcialmente aberto ($0,55 \leq Kt < 0,65$). Neste intervalo intermediário, a radiação direta predomina sobre a difusa. As características anisotrópicas da radiação difusa começam a aparecer na atmosfera de forma mais acentuada. A radiação circunsolar (fenômeno associado à anisotropia da radiação) começa a influenciar as medidas dos anéis.

A radiação circunsolar manifesta-se como uma auréola que envolve o círculo solar. Nessa região observa-se uma concentração da radiação difusa. A radiação circunsolar é consequência do espalhamento Mie. O espalhamento Mie é provocado por partículas com

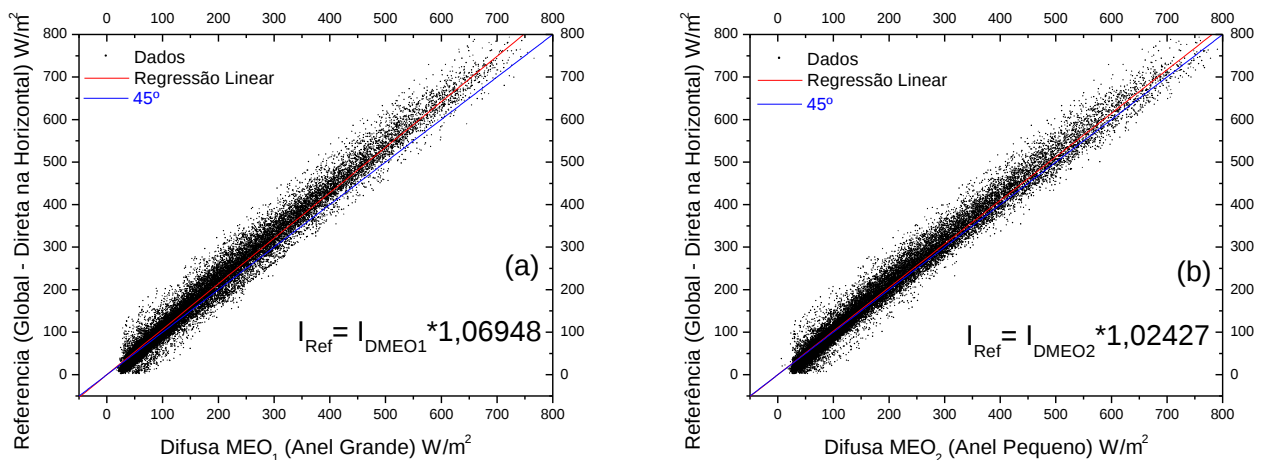
diâmetro na ordem do comprimento de onda. Este espalhamento é causado por vapor de água e aerossóis. Ocorre principalmente em atmosferas poluídas. O espalhamento Mie caracteriza-se pela não uniformidade, sendo conhecido como anisotrópico. A dimensão da área que envolve o círculo solar depende da concentração, distribuição e tamanho das partículas de aerossóis suspensos na atmosfera. (IQBAL, 1983; SIRÉN 1987; DAL PAI, 2005).

Figura 7 - Correlação entre as irradiâncias difusa sob céu parcialmente nublado: a) Referência versus MEO₁. b) Referência versus MEO₂.



Na cobertura de céu parcialmente aberto, o fator isotrópico não é grande o suficiente para compensar a radiação circunsolar barrada pelos anéis. As Figuras 8 (a) e (b) apresentam as correlações entre a referência e as medidas dos dois anéis. É possível observar que os dois anéis subestimam as medidas em relação à referência. O anel (MEO₁) subestima a irradiação difusa em 6,95%. Seguindo os resultados anteriores, o anel (MEO₂) aproximou-se mais da referência, as medidas desse anel foram 2,43% menores que a referência. As dimensões dos anéis influenciaram as medidas de irradiação difusa, apesar de possuírem a mesma razão b/R.

Figura 8 - Correlação entre as irradiâncias difusa sob céu parcialmente aberto: a) Referência versus MEO₁. b) Referência versus MEO₂.



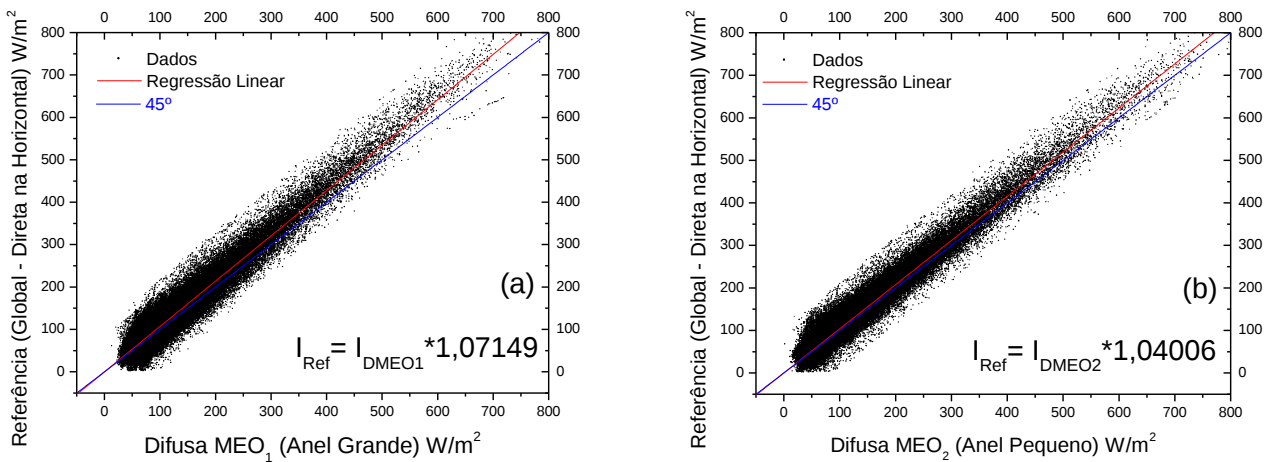
Na condição de céu aberto ($0,65 \leq Kt < 1$), ver Figura 9 (a) e (b), os anéis (MEO₁) e (MEO₂) apresentaram medidas subestimadas em relação à referência. O anel (MEO₁)

subestimou a referência em 7,15%. O anel (MEO_2) apresentou um erro de 4,01% em relação à referência.

Com o céu aberto, a radiação circunsolar torna-se mais intensa. Na região de Botucatu, o período que ocorre a maior frequência de céu claro coincide com o período de menor precipitação. Além disso, nesse período, usinas de açúcar e álcool realizavam extensas queimadas em plantações de cana de açúcar o que contribuía para o aumento da poluição atmosférica. (DAL PAI et al., 2016; DAL PAI, E., 2010). Atualmente esta prática é proibida.

Todos estes fatores contribuíram para o aumento da carga de aerossóis na atmosfera intensificando o espalhamento anisotrópico da radiação difusa. Comparando as medidas de irradiância solar dos dois anéis de sombreamento em relação à referência, verifica-se que as medidas obtidas pelo anel pequeno (MEO_2) apresentam menor erro quando comparadas as medidas do anel grande (MEO_1).

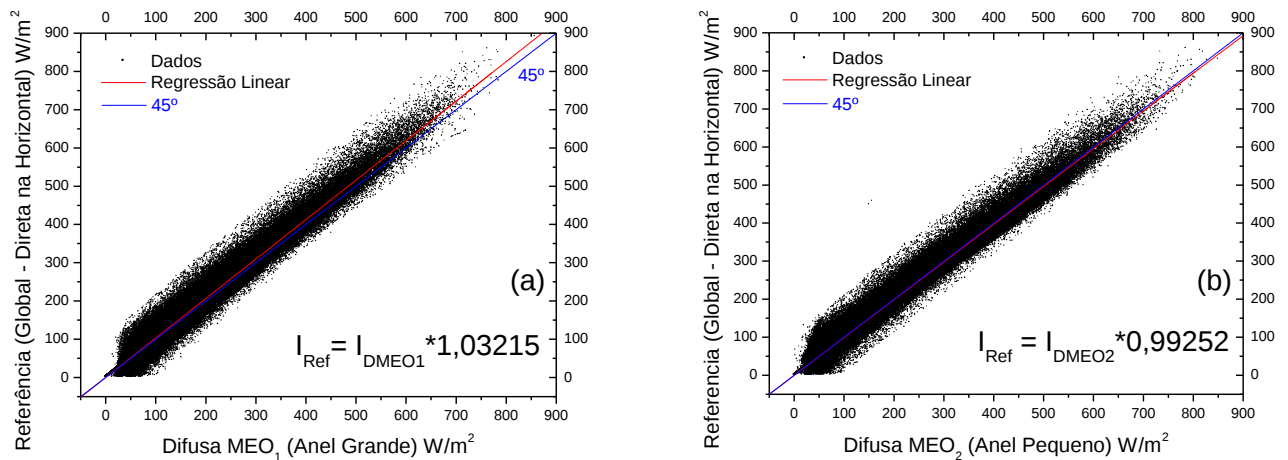
Figura 9 - Correlação entre as irradiâncias difusa sob céu aberto: a) Referência versus MEO_1 . b) Referência versus MEO_2 .



A Figura 10 apresenta a correlação entre as medidas de irradiância difusa sob todas as coberturas de céu ($0 \leq Kt < 1$). A Figura 10 (a) compara a irradiância de referência com a irradiância difusa do anel sombreamento grande (MEO_1). O anel MEO_1 subestima as medidas de radiação difusa em 3,2%. Por outro lado, o anel pequeno (MEO_2) superestima a irradiância de referência conforme apresentado na Figura 10 (b). O erro apresentado foi de 0,75%.

As Figuras 10 (a) e (b) representam os efeitos da superestimação das medidas causadas pelo fator de correção isotrópico nas condições de céu onde prevalece a radiação difusa (nublado e parcialmente nublado) e o efeito da anisotropia da radiação difusa nas coberturas onde a radiação direta é maior (parcialmente aberto e aberto). Percebe-se que as medidas obtidas pelo anel pequeno (MEO_2) são maiores que as apresentadas pelo anel grande (MEO_1). Os resultados indicam que independente da cobertura de céu as dimensões dos anéis influenciam as medidas da irradiância difusa.

Figura 10 - Correlação entre as irradiâncias difusa sob todas as coberturas de céu: a) Referência versus MEO₁. b) Referência versus MEO₂.



A Tabela 3 apresenta a correlação entre os anéis MEO₁ e MEO₂. As equações de correlação mostram que o anel de sombreamento (MEO₂) apresenta valores maiores de irradiação difusa quando comparado ao anel (MEO₁). A maior diferença nas medidas ocorreu na cobertura de céu parcialmente aberto (4,27%). A menor diferença sob céu aberto (3,26%). Independente das condições de céu a diferença foi de 3,97%. A Tabela 3 indica que independente da cobertura de céu o anel MEO₂ forneceu medidas maiores que o anel MEO₁.

Tabela 3 - Correlação entre Medidas de Irradiância Difusa do Anel Grande (MEO₁) versus Anel Pequeno (MEO₂) em função de intervalos do índice de transmissividade Kt .

Cobertura de Céu	Intervalos de Kt	Correlação	R^2
Nublado	$0 \leq Kt < 0,35$	$I_{MEO1} = I_{MEO2} * 0,95987$	0,997262
Parcialmente nublado	$0,35 \leq Kt < 0,55$	$I_{MEO1} = I_{MEO2} * 0,95725$	0,997741
Parcialmente aberto	$0,55 \leq Kt < 0,65$	$I_{MEO1} = I_{MEO2} * 0,95667$	0,996882
Aberto	$0,65 \leq Kt < 1$	$I_{MEO1} = I_{MEO2} * 0,96738$	0,989448
Todas as coberturas	$0 \leq Kt \leq 1$	$I_{MEO1} = I_{MEO2} * 0,96033$	0,995545

A Tabela 4 apresenta sugestões de fatores de correção anisotrópica em função de intervalos do índice de transmissividade Kt com seus respectivos coeficiente de determinação R^2 . A equação (6) permite a aplicação das correções anisotrópicas em função do índice de transmissividade Kt .

$$I_{Dani} = I_{MEOx} * F_{ax} \quad (6)$$

Onde:

I_{Dani} - Irradiância corrigida anisotropicamente;

I_{MEOx} - Irradiância difusa medida com correção isotrópica;

F_{ax} - Fator de correção anisotrópica em função do índice de transmissividade (Kt).

A Figura 11 apresenta os fatores de correção anisotrópicos dos dois anéis em função do índice de transmissividade (Kt). Considerando a mesma cobertura de céu, percebe-se uma diferença nos fatores calculados entre os anéis.

Na condição de céu nublado, ambos os anéis apresentam fatores de correção anisotrópicos fracionários, isto indica que eles superestimam as medidas. Nesta condição de céu, as nuvens bloqueiam a radiação direta. Dessa forma, a radiação global passa a ser composta basicamente de radiação difusa. Conforme apresentado, parte significativa das medidas obtidas sob céu nublado ocorreram justamente quando a equação de correção isotrópica apresenta os maiores valores. Como consequência, o fator de correção isotrópico provocou uma superestimação das medidas.

Tabela 4 - Correções anisotrópicas em função de intervalos do índice de transmissividade Kt . Referência versus Anel Grande (MEO_1) e Referência versus Anel Pequeno (MEO_2).

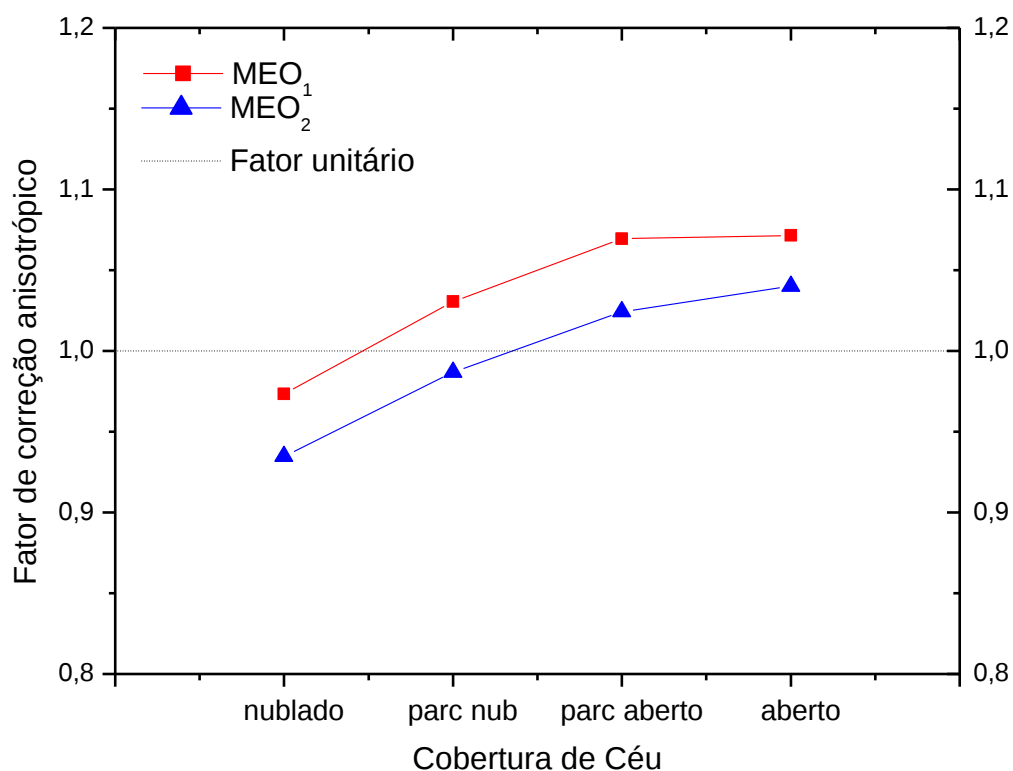
Cobertura de Céu	Intervalos de Kt	Fator (F_{a1})	R^2 (MEO_1)	Fator (F_{a2})	R^2 (MEO_2)
		MEO_1		MEO_2	
Nublado	$0 \leq Kt < 0,35$	0,97349	0,99196	0,93474	0,99138
Parcialmente nublado	$0,35 \leq Kt < 0,55$	1,03049	0,98390	0,98687	0,98440
Parcialmente aberto	$0,55 \leq Kt < 0,65$	1,06948	0,98099	1,02427	0,98269
Aberto	$0,65 \leq Kt < 1$	1,07149	0,94484	1,04006	0,95423
Todas as coberturas	$0 \leq Kt < 1$	1,03215	0,97176	0,99252	0,97401

Para a mesma cobertura do céu, o anel MEO_1 apresenta fator de correção anisotrópico maior que o anel MEO_2 . Portanto, o anel MEO_1 entrega medidas de radiação difusa, menores que o anel MEO_2 .

Considerando que os anéis possuem a mesma razão b/R e foram submetidos à mesma correção isotrópica, os resultados sugerem que o gap apresentado entre os fatores é causado pelas diferenças nas dimensões dos anéis.

Nas condições de céu nublado, parcialmente nublado e parcialmente aberto as curvas seguem aproximadamente paralelas. Na condição de céu aberto, a diferença é menor. Nessa faixa a dispersão da radiação solar se torna mais complexa devido ao aumento da anisotropia. Reflexões nas superfícies internas dos anéis, sobretudo em situação de baixa altitude solar, também influenciam as medidas. Conforme apresentado na Tabela 4, o coeficiente de determinação (R^2) calculado para a faixa de céu aberto (apesar de ser maior que 0,95) foi menor que o calculado para as demais faixas. O que sugere uma maior incerteza nessa faixa. Esses fatores somados as características locais, temporais e de condição atmosférica justificam a menor diferença apresentada entre os fatores de correção para a cobertura de céu aberto.

Figura 11 : Fator de correção anisotrópico dos anéis MEO₁ e MEO₂ em função dos intervalos do índice de transmissividade Kt.



Validação

Foram aplicados os fatores de correção anisotrópico da Tabela 4 em dois anos de dados previamente separados dos dados utilizados na modelagem.

A Tabela 5 apresenta as médias dos desvios (MBE) e o espalhamento (RMSE), para várias situações de correção.

Tabela 5 - Indicadores estatísticos das medidas de irradiância corrigidas anisotropicamente comparadas com as medidas de referência.

Método de correção	Anel	MBE (W/m ²)	MBE	RMSE (W/m ²)	RMSE (%)
Sem correção	MEO ₁	-32,44	-18,90	49,86	29,05
	MEO ₂	-27,46	-16,00	43,30	25,23
Com correção isotrópica	MEO ₁	-4,41	-2,57	23,94	13,95
	MEO ₂	1,61	0,94	22,06	12,85
Correção anisotrópica todas as coberturas	MEO ₁	0,96	0,56	22,96	13,38
	MEO ₂	0,31	0,18	22,00	12,82
Correção considerando as diferentes coberturas (Kt)	MEO ₁	1,10	0,64	21,57	12,56
	MEO ₂	0,57	0,33	20,28	11,81

Sem qualquer correção os dois anéis subestimam as medidas de radiação difusa. O anel MEO₁ apresenta um desvio médio de -18,90% e o anel MEO₂ -16,00%. O

espalhamento (RMSE) foi de 29,05% para o anel MEO₁ e de 25,23% para o anel MEO₂. Ambos os anéis apresentaram desvios médios negativos, este comportamento era esperado, pois uma parcela da radiação difusa foi bloqueada pelos anéis. O anel MEO₁ apresentou o maior desvio médio (MBE) quando comparado ao anel MEO₂ o mesmo ocorreu em relação ao índice RMSE.

Os índices MBE considerando a correção isotrópica e geométrica foram de -2,57% e 0,94% para os anéis MEO₁ e MEO₂ respectivamente. O índice RMSE calculado para o anel MEO₁ foi de 13,95%. Para o anel MEO₂ este índice foi de 12,85%. O anel MEO₁ subestimou as medidas enquanto o anel MEO₂ apresentou uma superestimação. Estes dados mostram que apesar de possuírem a mesma razão b/R, as diferenças nas dimensões largura/raio dos anéis influenciaram o montante de radiação difusa bloqueada.

O MBE da correção anisotrópica para todas as coberturas foi de 0,56% no anel MEO₁ e de 0,18% no MEO₂. Utilizando este método de correção o anel MEO₁ apresentou um espalhamento de 13,38% e o anel MEO₂ 12,82%. A aplicação da correção anisotrópica somada a isotrópico-geométrica proporcionou uma diminuição no índice MBE de ambos os anéis. Ocorreu uma diminuição do espalhamento quando comparado à correção isotrópico-geométrica. O índice RMSE de ambos os anéis diminuíram reforçando que a aplicação da correção anisotrópica melhorou a qualidade e a precisão dos dados.

Para a correção anisotrópica considerando as diferentes coberturas (*K_t*) o MBE do anel MEO₁ foi de 0,64% e do anel MEO₂ 0,33%. O RMSE para os anéis foram de 12,56% e 11,81% respectivamente. O MBE de ambos os anéis apresentaram um leve elevação (quando comparados à correção anisotrópica sob todas as coberturas). Porém o índice RMSE dos dois anéis diminuiu. A correção anisotrópica para diferentes coberturas de céu provocou uma maior aproximação entre os valores estimados e medidos (o que justifica a diminuição do RMSE). Esta aproximação favoreceu a diminuição dos cancelamentos o que impactou em um leve aumento no índice MBE.

A correção anisotrópica entregou medidas com desvios médios (MBE) menores que 1% em ambos os métodos (sob todas as coberturas ou considerando diferentes faixas de *K_t*). Houve diminuição do espalhamento (RMSE) em ambos os anéis quando comparadas com as medidas que sofreram somente correção isotrópica.

Vale ressaltar que a correção anisotrópica apresentada não pode ser generalizada, pois os dados utilizados na modelagem carregam características climáticas locais como: altitude, relevo, latitude, etc. Além de fatores como nebulosidade e carga de aerossóis que possuem forte dependência local e temporal.

4. CONCLUSÃO

Foram comparadas medidas de irradiância difusa de dois anéis de sombreamento do tipo MEO com dimensões diferentes numa proporção de 2:1. A razão b/R adotada nos dois anéis foi de 0,25.

O desempenho de cada anel foi analisado em função do índice de transmissividade *K_t*. Os resultados indicam que independente da cobertura de céu as dimensões dos anéis influenciam as medidas da irradiância difusa.

Comparando as medidas de irradiância difusa dos dois anéis o anel com menores dimensões bloqueia uma parcela menor de radiação difusa.

Os resultados mostram que o gap apresentado na comparação dos fatores de correção anisotrópicos, corresponde à diferença entre os raios e as larguras dos dois anéis.

Foi realizada uma validação com dois anos de dados previamente separados. A correção anisotrópica entregou medidas com desvios médios (MBE) menores que 1% em ambos os métodos (sob todas as coberturas ou considerando diferentes faixas de *K_t*). Houve diminuição do espalhamento (RMSE) das medidas em ambos os anéis quando comparadas com as medidas que sofreram somente correção isotrópica.

Os aspectos construtivos (raio e largura) do anel de sombreamento MEO influenciam as medidas de radiação difusa mesmo quando a razão b/R é mantida.

5. REFERÊNCIAS

- BATLLES, F.J.; OLMO, F.J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. **On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements**. Solar Energy, Volume 54, Issue 2, Pages 105-114, ISSN 0038-092X, 1995.
- CAMPILLO, Carlos; FORTES, Rafael; PRIETO, Maria. **Solar Radiation Effect on Crop Production**. 10.5772/34796, 2012.
- DAL PAI, Alexandre. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 74 folhas. Tese - UNESP – Campus de Botucatu - SP, 2005.
- DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; NAIMAITE, B. N.. **Desempenho dos Métodos de Medida da Radiação Solar Difusa: Método do Anel de Sombreamento E Método do Disco de Sombreamento**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, pp11.67-11.76, ISSN 2314-1433, 2015.
- DAL PAI, Alexandre; ESCOBEDO, João Francisco; DAL PAI, Enzo; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra Ramos; CODATO, Georgia. **MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover**. Renewable Energy, Volume 99, Pages 754-763, ISSN 0960-1481, 2016.
- DAL PAI, Enzo. **Radiações e Frações Solares UV, PAR, IV em Estufa de Polietileno: Evolução Anual Média Mensal Diária e Equações de Estimativa**. Dissertação de Mestrado apresentada na UNESP - Campus de Botucatu. Botucatu - São Paulo, 2010.
- DRUMMOND, A. J. On the measurement of sky radiation. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 7, pp. 413–436, 1956.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. **Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil**. Applied Energy, Volume 86, Issue 3, 2009, Pages 299-309. doi:10.1016/j.apenergy.2008.04.013
- ESCOBEDO, João Francisco et al. **Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil**. Renewable Energy. Oxford: Pergamon-Elsevier B.V. Ltd, v. 36, n. 1, p. 169-178, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/6248>>.
- IBGE .**Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 28/01/2020.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- KASTEN, F.; DEHNE, K.; BRETTSCHEIDER, W. **Improvement of Measurement of Diffuse Solar Radiation**. In: Palz W. (eds) Solar Radiation Data. Solar Energy R&D in the European Community Series F, vol 2. Springer, Dordrecht. 1983.
- KUDISH, A. I.; EVSEEV, E. G. **The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel**. Solar Energy, Volume 82, Issue 2, 2008, Pages 144-156. ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2007.06.006.
- LEBARON, B. A.; MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R. **A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions**. Solar Energy, 44(5), 249–256. doi:10.1016/0038-092x(90)90053-f. 1990.

MAKRIDES, George, *et al.* **Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 2, Pages 754-762, ISSN 1364-0321, 2010.

MELO, J. M. D.; ESCOBEDO, J. F. **Medida da radiação solar difusa.** In: **Energías Limpías en Progreso, VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. Anais International Solar Energy Society, v. 1, 1994.**

MUCHOW, R.C., SINCLAIR, T.R. and BENNETT, J.M., **Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations.** Agron. J., 82: 338-343. doi:10.2134/agronj1990.00021962008200020033x, 1990.

OLIVEIRA, A.P.; ESCOBEDO, J.F.; MACHADO, A.J. **A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface.** J. Atmos. Ocean. Technol. Boston 19, 698-708, 2002.

RENSHENG, C.; ERSI, K.; JIANPING, Y.; SHIHUA, Z.W.; YONGJIAN, D. **Estimation of Horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China.** Renewable Energy. v.29, p. 717 – 726, 2004.

ROBINSON, H.; STOCH, L. **Sky radiation and measurements and corrections.** Journal of Applied Meteorology, v.3, p.179-81, 1964.

RUIZ, G.; Bandera, C. **Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors.** Energies, 10(10), 1587. doi:10.3390/en10101587, 2017.

SIRÉN, K. E. **The shadow band correction for diffuse irradiation based on a two-component sky radiance model.** Solar Energy, Volume 39, Issue 5, Pages 433-438. doi:10.1016/s0038-092x(87)80062-2, 1987.

WENXIAN, L.; ENRONG, L.; WENFENG, G.; SHAOXUAN, P.; TAO, T. **Distribution patterns of diffuse solar radiation in Yunnan province, China.** Energy Conversion and Management v. 37, p. 553-560, 1996.

ZAMADEI, Tamara et al. **Estimativas da Radiação Difusa Diária com Base na Transmissividade Atmosférica e Insolação na Transição Cerrado-Amazônia.** Revista Brasileira de Climatologia, [S.l.], v. 23, out. 2018. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/48354/36097>>. Acesso em: 28 jan. 2020. doi:http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.48354.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS (AOD) DOS SATÉLITES TERRA/ACQUA COM MEDIDAS DE RADIAÇÃO DIFUSA OBTIDAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO PARA A REGIÃO DE BOTUCATU-SP

Angelo Feracin Neto – angelo@utfpr.edu.br

UTFPR/Cornélio Procopio/PR, Departamento de Engenharia Elétrica.

Alexandre Dal Pai – adalpai@fca.unesp.br

UNESP/FCA/Botucatu/SP, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia.

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre a profundidade óptica dos aerossóis (*AOD - Aerosol Optical Depth*) dos satélites TERRA e ACQUA com o fator de correção anisotrópico (FC_{ani}) calculado para o anel de sombreamento MEO. As medidas em terra são da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP- Botucatu entre os anos de 2001 a 2007. Além do AOD e do FC_{ani} , foram utilizados dados de precipitação pluvial e o índice de transmissividade atmosférica K_t . Os resultados deste estudo apontam que a transmissividade atmosférica interfere na relação entre a AOD e o FC_{ani} .

Palavras-chave: Anel de sombreamento MEO, Anisotropia, Sensoriamento remoto, Profundidade Óptica dos Aerossóis (AOD).

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica pode ser de origem natural ou antropogênica. São exemplos de fontes naturais os vulcões, a areia suspensa, aerossóis marinhos, incêndios florestais e o gás metano emitidos pelos animais. As principais fontes de emissões antropogênicas são os automóveis, as indústrias, a mineração (emissão de poeira), a atividade agrícola e a queima de biomassa.

Os gases e partículas dispersadas na atmosfera degradam a qualidade do ar e são prejudiciais a todo o ecossistema. A poluição atmosférica afeta a saúde humana sendo uma das principais causas de doenças no mundo. Entre os diversos poluentes prejudiciais a saúde destaca-se o material particulado (*PM - Particulate Matter*). O PM pode ser inalado e penetrar nos pulmões causando doenças respiratórias e cardiovasculares, disfunções no sistema nervoso central e doenças reprodutivas além de câncer (CHUDNOVSKY, et al., 2013, GHORANI-AZAM; RIAHI-ZANJANI; BALALI-MOOD, 2016; MANISALIDIS et al., 2020).

Além de afetar a saúde humana, os aerossóis influenciam o balanço energético da Terra espalhando e absorvendo a radiação solar. De forma indireta, atua como núcleos de

condensação de nuvem (CNN) alterando suas propriedades física, química e de albedo, impactando assim no balanço energético (KING et al., 1992; YU et al., 2006).

O monitoramento da Profundidade Óptica de Aerossóis (POA) ou em inglês (*AOD - Aerosol Optical Depth*) é uma forma eficiente de se obter dados a respeito da concentração e distribuição espacial dos aerossóis atmosféricos.

Através do sensoriamento remoto é possível monitorar a profundidade óptica dos aerossóis. Este sensoriamento pode ser realizado na superfície, por sensores aerotransportados ou com o emprego de satélites artificiais.

Das redes de observação de aerossóis baseadas em solo destaca-se a AERONET (*AErosol RObotic NETwork*) operada pela NASA (National Aeronautics and Space Administration). Esta rede faz uso de radiômetros solares interligados em rede ao redor do mundo. A rede AERONET possui sondas e torres de monitoramento no território brasileiro. Outro exemplo é a SKYNET (*Sky radiometer Network*), esta rede é formada por sete sub-redes. A SKYNET possui instrumentos nos países Asiáticos, Europa, Índia, Oceania, Antártica, EUA e no Chile. Ambas as redes (AERONET e SKYNET), fornecem dados contínuos e de longo prazo de domínio público (LIU et al., 2014; ISDC, 2020; NASA, 2020).

Os satélites TERRA e ACQUA da NASA fazem parte do projeto EOS (*Earth Observing System*) que tem como objetivo monitorar e pesquisar a superfície terrestre, a atmosfera e os oceanos a fim de pesquisar as mudanças climáticas e suas consequências. Estes satélites transportam um instrumento denominado MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). O MODIS faz medições em uma ampla faixa espectral (0,41 a 15 μm) distribuída em 36 canais, esses canais estão disponíveis com as seguintes resoluções espaciais: 2 canais com 250 m, 5 canais com 500m e 29 canais com 1Km. Na recuperação das características do aerossol são utilizados 7 canais que abrangem a faixa de (0,47 a 2,13 μm) além de comprimentos de onda adicionais para identificar nuvens e sedimentos de rios. Os satélites TERRA e ACQUA realizam a cobertura global com uma frequência de (1 a 2 dias). (KING et al., 1992; REMER et al., 2005).

O anel de sombreamento MEO é um dispositivo destinado a realizar medidas de radiação difusa. Assim como os anéis de Drummond e Robinson, o anel de sombreamento MEO projeta uma sombra sobre o piranômetro ao longo do dia bloqueando a incidência de radiação solar direta no sensor. Devido à cobertura de uma parcela do céu pelo anel, parte da radiação difusa também é barrada provocando um erro sistemático que provoca a subestimação das medidas. Para compensar esta perda é aplicado um fator de correção que considera uma distribuição isotrópica da radiação difusa. Melhores resultados são obtidos aliando a correção teórica (isotrópica) com a correção experimental (anisotrópica). (IQBAL, 1983; SIRÉN, 1987; DAL PAI et al., 2016).

Este trabalho compara os fatores de correção anisotrópicos calculados a partir das medidas de irradiância difusa, obtidas do anel de sombreamento MEO, com os dados de Profundidade Óptica de Aerossóis do sensor MODIS dos satélites TERRA e ACQUA. O objetivo é entender a relação entre o FC_{ani} e o AOD.

2. METODOLOGIA

Local

As medidas de radiação difusa foram obtidas da estação de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP-Botucatu (latitude 22,85° Sul, longitude 48,43° Oeste, altitude 786m), ver Figura 1.

Figura 1 - Estação Radiométrica da UNESP - Botucatu -SP.



Fonte: (DAL PAI, 2005).

A população de Botucatu é estimada em 146.497 habitantes segundo dados do IBGE (IBGE, 2020). A principal atividade econômica na região de Botucatu é a agricultura. Extensas plantações de cana eram queimadas nos período de julho a novembro na época que os dados foram medidos, o que contribuía com o aumento da poluição atmosférica. Atualmente as queimadas são proibidas.

Segundo Escobedo et al. (2011), o verão na região de Botucatu é quente e úmido enquanto o inverno é frio e seco. O período das chuvas é no mês de fevereiro, porém janeiro apresenta a maior precipitação mensal acumulada (260,7mm). O mês mais seco é agosto onde a precipitação é de (38,2mm).

Instrumentação

Para a medida de irradiância difusa foi utilizado um piranômetro Eppley-PSP ($K= 8,17 \mu Vm^2/W$) sob um anel configuração MEO com 0,40m de raio e 0,10m de largura, Figura 2 (a). Um pireliômetro Eppley-NIP ($K= 7,73 \mu Vm^2/W$) acoplado a um sistema de rastreamento solar ST-3 forneceu os dados da irradiância direta na incidência, ver Figura 2

(b). As medidas da irradiância global no plano horizontal foram realizadas por um piranômetro Eppley - PSP ($K = 8,13 \mu V m^2/W$), Figura 2 (c).

A precipitação pluviométrica foi medida com um pluviógrafo da Ota Keiki Seisakusho.

Todos os dados foram monitorados e armazenados automaticamente por um Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc[®]. O Datalogger armazenou a média de 60 valores de irradiância a cada 5 minutos na unidade (W/m^2), por tanto a uma frequência de varredura de 0,2Hz.

Figura 2 - Dispositivos de medida em solo. a) Piranômetro com anel de sombreamento MEO (difusa); b) Pireliômetro e rastreador solar ST-3 (direta); c) Piranômetro (global).



(a)



(b)



(c)

Fonte: (DAL PAI et al., 2015).

Dados

Foram utilizados dados dos anos de 2001 a 2007. O fator de correção anisotrópico (FC_{ani}) foi obtido a partir da regressão linear entre a irradiância difusa de referência e a irradiância medida pelo anel de sombreamento MEO corrigida isotropicamente com as equações (1) e (2) (OLIVEIRA; ESCOBEDO; MACHADO, 2002).

$$F_c = \frac{1}{1 - F_p} \quad (1)$$

Onde: F_c - Fator de correção isotrópico, F_p - Parcela da radiação difusa obstruída pelo anel de sombreamento.

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cdot \cos \delta \cdot \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos \phi} \right]^2 \cdot \int_0^{\omega_s} \cos \theta_z d\omega \quad (2)$$

Onde: b - largura do anel, R - raio do anel, δ - declinação solar, ϕ - latitude local, ω - ângulo horário, θ_z - ângulo zenital.

A irradiância difusa de referência foi calculada pelo método da diferença entre as irradiâncias global e direta projetada na horizontal conforme equação (3)

$$I_d = I_G - I_{dir} \cdot \cos \theta_z \quad (3)$$

Onde: I_d - Irradiância difusa (W/m^2); I_G - Irradiância Global na horizontal (W/m^2); I_{dir} - Irradiância direta na incidência normal (W/m^2); θ_z - Ângulo zenital.

O índice de transmissividade atmosférica (Kt) é definido como a razão entre a radiação global e a radiação extraterrestre, ver equação (4).

$$Kt = \frac{I_G}{I_o} \quad (4)$$

Onde: I_G - radiação global (MJ/m^2); I_o - radiação extraterrestre (MJ/m^2).

Os dados de Profundidade Óptica dos Aerossóis foram obtidos da plataforma Google Earth Engine. O Google Earth Engine é uma plataforma gratuita que disponibiliza mais de vinte petabytes de dados geoespaciais que inclui mais de 30 anos de dados. Estes dados estão disponíveis online e podem ser acessados a qualquer momento, bastando que o usuário faça o login no sistema. O acesso é gratuito e permite ao usuário baixar ou enviar dados para processamento em nuvem. A interface de programação de aplicativos (API) da plataforma faz uso das linguagens Java e Python permitindo ao usuário realizar processamento de dados geoespaciais utilizando a nuvem do Google. A plataforma permite o acesso a um grande número de produtos derivados de vários satélites. (GOOGLE EARTH ENGINE, 2020).

Neste trabalho foram acessados os dados do sensor MODIS que integram os satélites TERRA e ACQUA da agência NASA (National Aeronautics and Space Administration) dos Estados Unidos. O produto acessado foi o (MCD19A2.006: Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth Daily 1km) que permite obter a profundidade óptica de aerossóis. Este produto é baseado no algoritmo MAIAC (MODIS Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction). O MAIAC processa os dados dos sensores MODIS a bordo dos satélites TERRA E ACQUA em conjunto como um único sensor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 contém os dados de profundidade óptica de aerossóis (AOD), fator de correção anisotrópico anual (FC_{ani}) considerando todas as coberturas de céu além da precipitação acumulada em milímetro e decâmetro.

A Figura 4 apresenta os dados anuais do fator anisotrópico (FC_{ani}), precipitação acumulada (em decâmetro) e a profundidade óptica de aerossóis para a estação de Radiometria solar da FCA de Botucatu-SP no período de 2001 a 2007. A precipitação acumulada nestes anos segue uma tendência de queda. O fator de correção anisotrópico calculado para a irradiância difusa anual medida pelo anel de sombreamento MEO também apresentou uma tendência de queda. Por outro lado a profundidade óptica de aerossóis manteve uma tendência de alta.

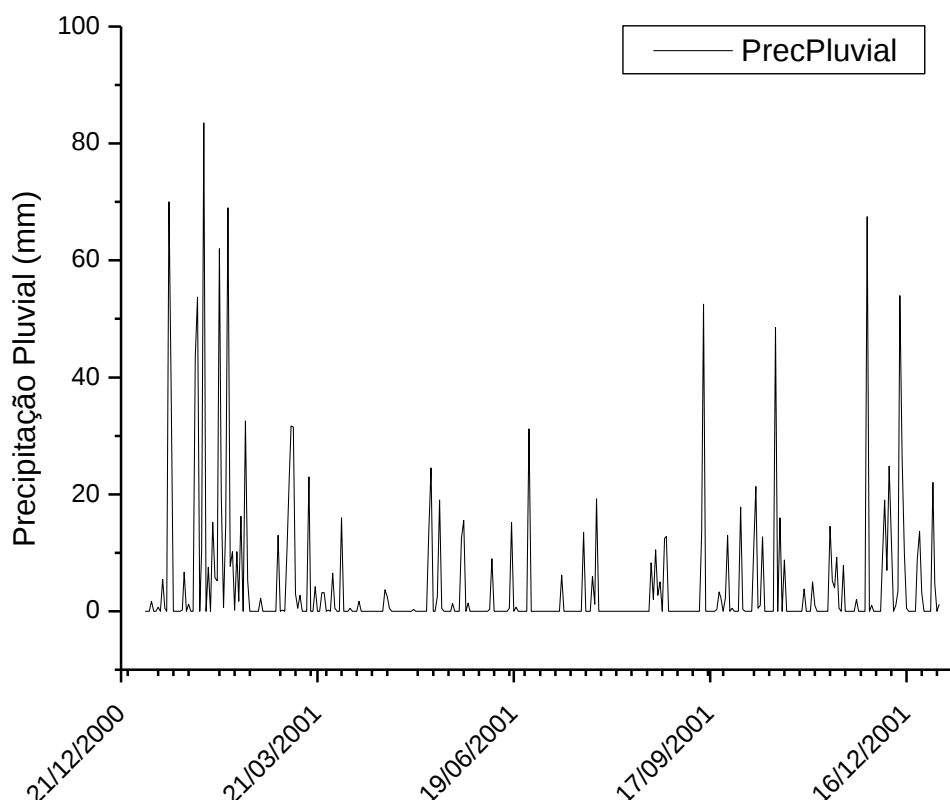
Tabela 1 - Dados dos anos de 2001 a 2007 da Profundidade Óptica de aerossóis, Fator de correção anisotrópico, Precipitação Acumulada em (milímetro e decâmetro)

Ano	AOD	Fator de correção anisotrópico (FC_{ani})	R^2 do (FC_{ani})	Kt	Precipitação Acumulada (mm)	Precipitação Acumulada (dm)
2001	0,119	1,099	0,971	0,512	1598,90	0,1599
2002	0,132	1,064	0,983	0,516	1343,10	0,1343
2003	0,120	1,049	0,982	0,511	1454,60	0,1455
2004	0,148	1,039	0,975	0,487	1330,40	0,1330
2005	0,147	1,035	0,979	0,489	1395,90	0,1396
2006	0,130	1,029	0,969	0,492	1233,20	0,1233
2007	0,156	0,978	0,973	0,470	1292,40	0,1292

A profundidade óptica de aerossóis (AOD) resulta da integração (a nadir) dos aerossóis que se encontram na coluna formada entre do sensor MODIS dos Satélites TERRA/ACQUA e o solo. As chuvas removem o material particulado da atmosfera o que justifica a diminuição da AOD nos anos que ocorreram maior precipitação. Nos anos que ocorreram menos chuvas houve um incremento do AOD. O fator de correção anisotrópico (FC_{ani}) foi obtido por meio de regressão linear entre a irradiância de referência e as medidas de irradiância do anel MEO. Quando o FC_{ani} calculado é maior que 1, significa que o anel de sombreamento subestimou as medidas. Em outras palavras, o fator de correção isotrópico não foi suficiente para compensar a parcela da radiação difusa barrada pelo anel. Valores fracionários do FC_{ani} indicam que as medidas do anel MEO foram superestimadas e necessitam de uma correção que diminua seu valor.

É possível selecionar duas situações extremas entre os anos que foram objeto deste estudo. No ano de 2001 ocorreu a maior precipitação acumulada da série (1598,90mm). O volume e a distribuição das chuvas contribuíram para que o índice AOD fosse o menor entre os anos (0,119) ver Figura 3. O FC_{ani} apresentou o maior valor (1,099), indicando que (em média), as medidas do anel de sombreamento MEO subestimaram a irradiância difusa de referência em (9,9%). Por outro lado o ano de 2001 apresentou um dos maiores índices de Kt médio (0,512) apontando que o ano de 2001 foi um dos que apresentaram maior transmissividade atmosférica.

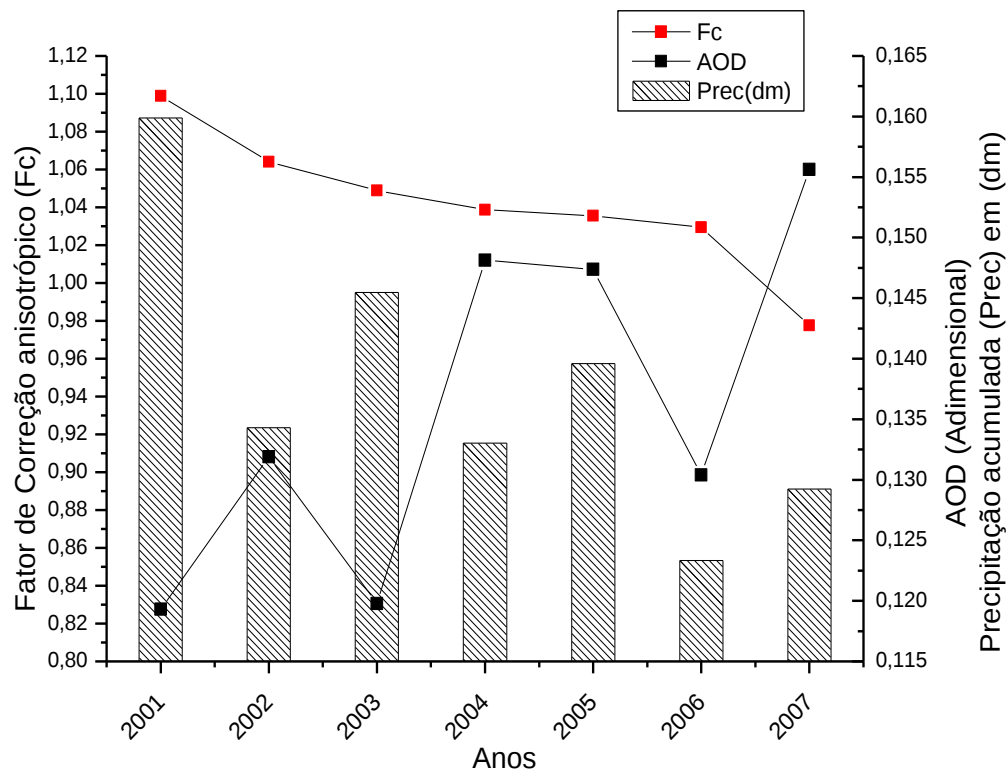
Figura 3 - Distribuição da precipitação pluvial em (mm) do ano de 2001.



Apesar de o índice AOD ser o menor da série no ano de 2001, a condição de maior transmissividade atmosférica contribuiu para que ocorresse maior interação entre a radiação solar e os aerossóis aumentando as perdas no anel. Em dias de céu claro e na presença de aerossóis ocorre uma concentração de radiação ao redor do feixe da radiação direta denominada "radiação circunsolar", que se caracteriza como uma área que circunda o anel solar onde ocorre uma concentração de radiação difusa. (SIRÉN, 1987). Esta radiação é interceptada pelo anel provocando uma subestimação nas medidas justificando o maior valor de FC_{ani} para o ano de 2001.

O Ano de 2007 apresentou condições opostas ao ano de 2001. Precipitação acumulada de (1292,40mm), uma das menores da série. O AOD para este ano foi o maior (0,156). O fator de correção anisotrópico (FC_{ani}) calculado para o ano de 2007 foi de (0,978), o menor entre os anos. O valor fracionário do FC_{ani} indica que (em média) as medidas do anel MEO corrigidas isotropicamente superestimaram a referência em (2,2%). O índice AOD para 2007 foi o maior da série. O ano de 2007 apresentou forte estiagem entre os meses de junho e outubro, ver Figura 5. A estiagem coincidiu com a época que ocorriam as queimadas nas plantações de cana de açúcar promovidas pelas usinas de açúcar e álcool na região.

Figura 4 - Fator de correção isotrópico (Fc). Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD). Precipitação acumulada (Prec) em decâmetro (dm).



Apesar destas condições ocorreu um decréscimo no fator de correção anisotrópico para o ano de 2007. Com o aumento da concentração de aerossóis e as longas estiagens, esperava-se que o fator de correção anisotrópico sofresse uma elevação quando comparado aos outros anos da série. No entanto o fator calculado para este ano foi de (0,978) indicando que ocorreu uma superestimação das medidas do anel MEO. A Figura 6 apresenta a Razão entre as médias anuais da Irradiância de Referência e a Irradiância medida pelo anel de sombreamento MEO. Estas medidas são comparadas com o índice de transmissividade K_t para os respectivos anos. Valores da razão maior do que 1, indicam que (em média) o anel MEO subestimou as medidas de radiação difusa. Valores menores significam superestimação. O gráfico aponta uma tendência de diminuição da razão com a diminuição de K_t .

O ano de 2007 apresentou baixa precipitação pluviométrica e períodos de estiagem longos no inverno. Porém foi o ano com a menor transmissividade atmosférica ($K_t = 0,47$) da série. A maior ocorrência de céu nublado interferiu na incidência de radiação direta na superfície o que compensou a maior concentração de aerossóis neste ano. Deste modo, o aumento da concentração de aerossóis apontado pelas medidas do sensor MODIS não provocaram um aumento correspondente nas perdas.

Figura 5 - Distribuição da precipitação pluvial em (mm) do ano de 2007.

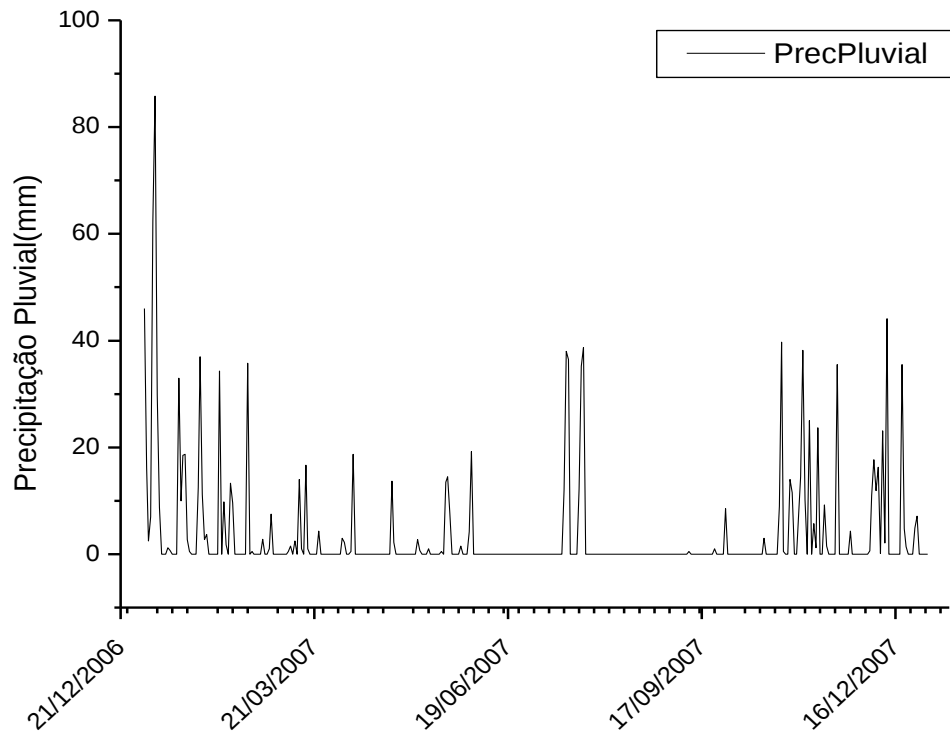
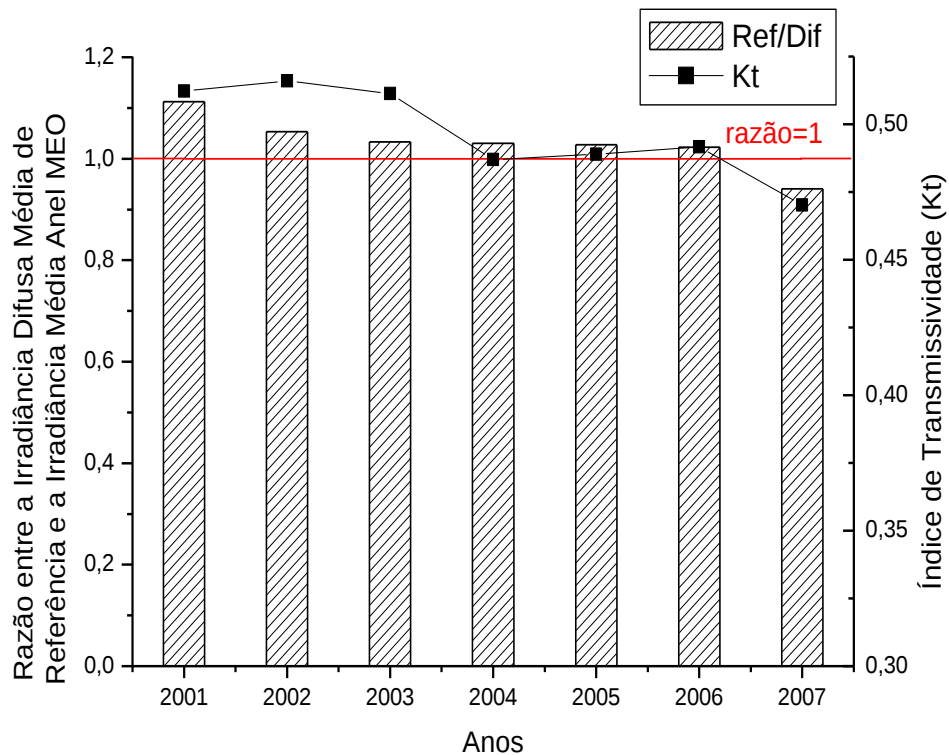


Figura 6 - Média anual da razão entre a irradiância difusa de referência e a irradiância difusa do anel MEO. Índice de transmissividade (Kt).



Conforme apresentado na Figura 5, as chuvas se concentraram no início do ano (verão 06/07) e no final do ano (início do verão 07/08). Devido à geometria do anel de sombreamento MEO, o fator de correção isotrópico calculado para os meses de verão

apresentam os maiores valores. Conforme Dal Pai et al. (2016) as nuvens funcionam como um segundo anel bloqueando os raios solares e o fator de correção isotrópico acaba superestimando as medidas. Assim, as medidas superestimadas devido ao fator isotrópico dos meses de verão não foram compensadas pelas perdas dos períodos de estiagem devido a maior ocorrência de céu nublado. Como consequência o valor médio do fator de correção anisotrópico calculado para o ano de 2007 foi fracionário.

4. CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que:

- O aumento da carga de aerossóis e consequentemente da profundidade óptica de aerossóis não implicou diretamente em um acréscimo do fator de correção anisotrópico;
- A influência da profundidade óptica de aerossóis sobre o fator de correção anisotrópico apresentou uma dependência da transmissividade atmosférica;
- A baixa transmissividade atmosférica atenua a incidência de radiação diminuindo o efeito anisotrópico causado pelos aerossóis. Por outro lado, o aumento da transmissividade potencializa a interação entre a radiação e os aerossóis aumentando a anisotropia da radiação e as perdas no anel de sombreamento MEO.

O comportamento anômalo apresentado entre a AOD e o fator de correção anisotrópico necessita ser melhor investigado. Estudos com diferentes partições de tempo devem ser considerados.

5. REFERÊNCIAS

CHUDNOVSKY, A., TANG, C., LYAPUSTIN, A., WANG, Y., SCHWARTZ, J., & KOUTRAKIS, P. (2013). **A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for fine particulate matter predictions.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(21), 10907–10917. doi:10.5194/acp-13-10907-2013.

DAL PAI, Alexandre. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa.** 2005. 74 folhas. Tese - UNESP – Campus de Botucatu - SP, 2005.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; NAIMAITE, B. N.. **Desempenho dos Métodos de Medida da Radiação Solar Difusa: Método do Anel de Sombreamento E Método do Disco de Sombreamento.** *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 19, pp11.67-11.76, ISSN 2314-1433, 2015.

DAL PAI, Alexandre; ESCOBEDO, João Francisco; DAL PAI, Enzo; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra Ramos; CODATO, Georgia. **MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover.** *Renewable Energy*, Volume 99, Pages 754-763, ISSN 0960-1481, 2016.

DUNCAN, B. N., PRADOS, A. I., LAMSAL, L. N., LIU, Y., STREETS, D. G., GUPTA, P., ZIEMBA, L. D. (2014). **Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid.** *Atmospheric Environment*, 94, 647–662. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.061

ESCOBEDO, João Francisco et al. **Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil.** *Renewable Energy*. Oxford: Pergamon-Elsevier B.V. Ltd, v. 36, n. 1, p. 169-178, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/6248>>.

GOOGLE EARTH ENGINE. **What is Earth Engine?**. Disponível em: <<https://earthengine.google.com/faq/>>. Acesso em: 05/11/2020.

GHORANI-AZAM, A., RIAHI-ZANJANI, B., & BALALI-MOOD, M. **Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran.** *Journal of research in medical sciences : the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 21, 65. <https://doi.org/10.4103/1735-1995.189646>. 2016.

IBGE **.Cidades.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 28/01/2020.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.

ISDC. Interntaional SKYNET Data Center. **About SKYNET.** Disponível em: <<https://www.skynet-isdc.org/aboutSKYNET.php>>. Acesso em:15/11/2020.

KING, M. D., KAUFMAN, Y. J., MENZEL, W. P., & TANRE, D. (1992). **Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS).** *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1), 2–27. doi:10.1109/36.124212

LIU, Yuzhi; JIA, Rui; DAI, Tie; XIE, Yongkun; SHI, Guangyu (2014). **A review of aerosol optical properties and radiative effects.** *Journal of Meteorological Research*, 28(6), 1003–1028. doi:10.1007/s13351-014-4045-z

MANISALIDIS, Ioannis et al. **Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review.** *Frontiers in public health* vol. 8 14. 20 Feb. 2020, doi:10.3389/fpubh.2020.00014

NASA, (2020). **AERONET - Aerosol Robotic Network.** Disponível em: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html>. Acesso em: 01/11/2020.

OLIVEIRA, A.P.; ESCOBEDO, J.F.; MACHADO, A.J. **A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface.** *J. Atmos. Ocean. Technol.* Boston 19, 698-708, 2002.

REMER, L. A., Kaufman, Y. J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D. A., Martins, J. V., Holben, B. N. (2005). **The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4), 947–973. doi:10.1175/jas3385.1

SIRÉN, K. E. **The shadow band correction for diffuse irradiation based on a two-component sky radiance model.** *Solar Energy*, Volume 39, Issue 5, Pages 433-438. doi:10.1016/s0038-092x(87)80062-2, 1987.

YU, H., Kaufman, Y. J., Chin, M., Feingold, G., Remer, L. A., Anderson, T. L., Balkanski, Y., Bellouin, N., Boucher, O., Christopher, S., DeCola, P., Kahn, R., Koch, D., Loeb, N., Reddy, M. S., Schulz, M., Takemura, T., and Zhou, M.: **A review of measurement-based**

assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing, Atmos. Chem. Phys., 6, 613–666, <https://doi.org/10.5194/acp-6-613-2006>, 2006.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objeto de estudo o anel de sombreamento MEO. Foi investigada a influência dos aspectos construtivos (raio e largura) na medida da irradiância solar difusa. Medidas de radiação difusa obtidas de dois anéis com dimensões diferentes foram comparadas com a radiação difusa de referência.

O desempenho de cada anel foi analisado em função do índice de transmissividade K_t . Os resultados indicam que independente da cobertura de céu as dimensões dos anéis influenciaram as medidas da irradiância difusa, apesar de se manter a mesma razão (b/R) entre eles.

Foi observado que o anel com menores dimensões tem menos perdas quando comparado ao anel maior. Portanto o anel maior barra uma parcela maior de radiação difusa devido à anisotropia da radiação.

A diferença encontrada entre os fatores de correção anisotrópicos corresponde à diferença entre os raios e as larguras dos dois anéis.

Foi realizada uma validação com dois anos de dados previamente separados. A correção anisotrópica entregou medidas com desvios médios (MBE) menores que 1% em ambos os métodos (sob todas as coberturas ou considerando diferentes faixas de K_t). Houve diminuição do espalhamento (RMSE) em ambos os anéis quando comparadas com as medidas que sofreram somente correção isotrópica.

O segundo trabalho envolveu um anel de sombreamento MEO. Medidas anuais de radiação difusa realizadas com o anel de sombreamento MEO foram comparadas com a profundidade óptica de aerossóis (AOD) do sensor MODIS dos satélites TERRA/ACQUA da NASA no período de 2001 a 2007.

Verificou-se que um aumento do AOD, e consequentemente da carga de aerossóis na atmosfera, não implicou (em média) a um acréscimo das perdas do anel MEO. A influência da profundidade óptica de aerossóis sobre o fator de correção anisotrópico depende da transmissividade atmosférica.

A baixa transmissividade atmosférica atenua a incidência de radiação diminuindo o efeito anisotrópico causado pelos aerossóis. Por outro lado, o aumento da transmissividade potencializa a interação entre a radiação e os aerossóis aumentando a anisotropia e as perdas no anel de sombreamento MEO. O comportamento anômalo apresentado entre a AOD e o fator de correção

anisotrópico necessita ser melhor investigado. Estudos com diferentes partições de tempo devem ser considerados.

REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO

BATLLES, F.J.; OLMO, F.J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. **On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements**. Solar Energy, Volume 54, Issue 2, Pages 105-114, ISSN 0038-092X, 1995.

CAMPILLO, Carlos; FORTES, Rafael; PRIETO, Maria. **Solar Radiation Effect on Crop Production**. 10.5772/34796, 2012.

DRUMMOND, A. J. On the measurement of sky radiation. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 7, pp. 413–436, 1956.

DAL PAI, Alexandre. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 74 folhas. Tese - UNESP – Campus de Botucatu - SP, 2005.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; NAIMAITE, B. N.. **Desempenho dos Métodos de Medida da Radiação Solar Difusa: Método do Anel de Sombreamento E Método do Disco de Sombreamento**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, pp11.67-11.76, ISSN 2314-1433, 2015.

DAL PAI, Alexandre; ESCOBEDO, João Francisco; DAL PAI, Enzo; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra Ramos; CODATO, Georgia. **MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover**. Renewable Energy, Volume 99, Pages 754-763, ISSN 0960-1481, 2016.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. **Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil**. Applied Energy, Volume 86, Issue 3, 2009, Pages 299-309. doi:10.1016/j.apenergy.2008.04.013

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.

KASTEN, F.; DEHNE, K.; BRETTSCHEIDER, W. **Improvement of Measurement of Diffuse Solar Radiation**. In: Palz W. (eds) Solar Radiation Data. Solar Energy R&D in the European Community Series F, vol 2. Springer, Dordrecht. 1983.

KUDISH, A. I.; EVSEEV, E. G. **The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel**. Solar Energy, Volume 82, Issue 2, 2008, Pages 144-156. ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2007.06.006.

LEBARON, B. A.; MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R. **A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions**. Solar Energy, 44(5), 249–256. doi:10.1016/0038-092x(90)90053-f. 1990.

LENZ, Lucas Carvalho. **Modelos de correção da medida da irradiância difusa pelo método do disco de sombreamento**. 2020. 46 páginas. Tese - UNESP - Campus de Botucatu - SP, 2020.

MAKRIDES, George, *et al.* **Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 2, Pages 754-762, ISSN 1364-0321, 2010.

MARTÍN, Miguel de Simón-, Montserrat Díez-Mediavilla, Cristina Alonso-Tristán. **Shadow-band radiometer measurement of diffuse solar irradiance: Calculation of geometrical and total correction factors.** Solar Energy, Volume 139, 2016, Pages 85-99, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.026>.

MELO, J. M. D.; ESCOBEDO, J. F. **Medida da radiação solar difusa.** In: **Energias Limpas em Progreso, VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. Anais International Solar Energy Society, v. 1, 1994.**

MUCHOW, R.C., SINCLAIR, T.R. and BENNETT, J.M., **Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations.** Agron. J., 82: 338-343. doi:10.2134/agronj1990.00021962008200020033x, 1990.

OLIVEIRA, A.P.; ESCOBEDO, J.F.; MACHADO, A.J. **A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface.** J. Atmos. Ocean. Technol. Boston 19, 698-708, 2002.

ROBINSON, H.; STOCH, L. **Sky radiation and measurements and corrections.** Journal of Applied Meteorology, v.3, p.179-81, 1964.

RUIZ, G.; Bandera, C. **Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors.** **Energies**, 10(10), 1587. doi:10.3390/en10101587, 2017.

ZAMADEI, Tamara et al. **Estimativas da Radiação Difusa Diária com Base na Transmissividade Atmosférica e Insolação na Transição Cerrado-Amazônia.** Revista Brasileira de Climatologia, [S.l.], v. 23, out. 2018. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/48354/36097>>. Acesso em: 28 jan. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.48354>.