



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Correções numéricas para radiação difusa horária em superfícies inclinadas com a face para o Norte



Adilson Pacheco de Souza¹; João Francisco Escobedo²

¹Doutor em Irrigação e Drenagem, Professor Adjunto II, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais - ICAA, UFMT, Campus de Sinop. E-mail: adilsonpacheco@ufmt.br

²Professor Adjunto III, Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP – Campus Universitário de Botucatu. E-mail: escobedo@fca.unesp.br

RESUMO: A radiação global incidente em superfícies inclinadas é dada pelas componentes direta, difusa e refletida. As radiações direta e refletida apresentam comportamentos geométricos definidos e variações sazonais dependentes das medidas na horizontal. De maneira simplificada, a grande dificuldade na avaliação do comportamento da radiação difusa, está na composição das subcomponentes circunsolar, isotrópica e anisotrópica. Objetivou-se propor fatores de correções para medidas horárias da radiação difusa em superfícies inclinadas realizadas pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo, nas condições climáticas de Botucatu-SP. Foram avaliadas as medidas nas inclinações de 12,85° (latitude local – 10°), 22,85° (latitude local) e 32,85° (latitude local + 10°) com a face voltada para o Norte. Para as correções geométricas, astronômicas, isotrópicas e anisotrópicas foram propostos fatores numéricos que englobam quatro parâmetros: ângulo zenital, ângulo de inclinação, épsilon (ϵ) e delta (Δ) - adaptados da proposta de Perez et al. 1990 e indicam a turbidez atmosférica e do brilho atmosférico. Foram realizadas correlações entre a radiação difusa medida e a radiação difusa referência (obtida pela diferença entre a radiação global, direta e refletida) distribuídas em quatro classes para cada parâmetro supracitado, indicando a obtenção de 64 fatores de correção por inclinação. Independente do ângulo de inclinação da superfície, o ângulo zenital (Z) diminui com o aumentada transmissividade atmosférica. O incremento do ângulo de inclinação propicia a diminuição dos fatores de correção em todas as classes de variação de Z , ϵ e Δ . Os melhores resultados da correção numérica são obtidos em condições isotrópicas (céu nublado), contudo, nas demais condições de nebulosidade, os espalhamentos foram inferiores a 0,13 MJ m⁻² h⁻¹ (28,16%) e os índices de ajustamentos superiores a 95%.

PALAVRAS-CHAVE: transmissividade atmosférica, anel de sombreamento Melo-Escobedo, indicativos estatísticos

Numerical corrections for hourly diffuse radiation on inclined surfaces face to the North

ABSTRACT: The global incident radiation on inclined surfaces is given by the direct components, diffuse and reflected. The direct and reflected radiation have defined geometric dependent behaviors and seasonal variations of measures horizontally. In a simplified way, the great difficulty in assessing the behavior of diffuse radiation, is the composition of subcomponents circumsolar, isotropic and anisotropic. The objective was to propose correction factors for hourly measurements of diffuse radiation on inclined surfaces performed by Melo-Escobedo shading ring, the climatic conditions of Botucatu-SP. We evaluated the measures on the slopes of 12.85° (local latitude - 10°), 22.85° (local latitude) and 32.85° (local latitude + 10°) face to the North. For geometric corrections, astronomical, isotropic and anisotropic were proposed numerical factors that include four parameters: zenith angle (Z), tilt angle, epsilon (ϵ) and delta (Δ) - adapted the proposal of Perez et al. 1990, what indicate the atmospheric turbidity and atmospheric glow. Correlations were made between the diffuse radiation

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

measured and the reference diffuse radiation (obtained by the difference between the global radiation, direct and reflected) divided into four classes for each parameter above-mentioned, indicating obtaining 64 correction factors to tilted surface. Regardless of the surface tilt angle, the zenith angle (Z) decreases with increasing atmospheric transmissivity. The increase in the tilt angle provides a reduction of the correction factors in all variation classes of Z, ϵ and Δ . The best results of the numerical correction are obtained in isotropic conditions (cloudy), however, in other cloudy conditions, the scattering was less than $0.13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (28.16%) and adjustments of rates greater than 95%.

KEY WORDS: atmospheric transmissivity, shadingringMelo-Escobedo, statisticalindicative

INTRODUÇÃO

A variação temporal da quantidade de radiação solar incidente em qualquer localidade na superfície terrestre depende basicamente dos fatores astronômicos, geográficos e climáticos locais (concentrações de vapor de água, aerossóis e nuvens presentes na atmosfera). Por conseguinte, dentre as características locais, a topografia é um fator importante para determinar a quantidade de energia solar, pois as variações de altitude, inclinação (declividade), orientação (azimute) e sombreamento podem afetar os níveis energéticos disponíveis (principalmente a geometria de incidência de fluxos solares diretos) que por sua vez, interferem nos processos biofísicos de aquecimento do ar e do solo, além dos processos fisiológicos de produção.

A radiação global incidente em planos horizontais é composta pelas componentes direta e difusa, enquanto que, em planos inclinados, ocorre ainda a contribuição de fluxos energéticos refletidos. Em termos de instrumentação, atualmente, as radiações global, direta e difusa são medidas por piranômetros, pireliômetros acoplados a rastreadores solares e por piranômetros dispostos sob mecanismos de sombreamento, respectivamente. Em geral, são realizadas medidas de duas componentes e a outra é obtida por diferença, visto que a componente direta pode ser projetada em superfícies com diferentes inclinações por relações geométricas.

Dentre os mecanismos de sombreamento empregados na medida da radiação difusa, os anéis de sombreamento apresentam boa aceitação e baixo custo, todavia, necessitam de correções decorrentes da porção de radiação difusa bloqueada pelo próprio anel. Essas correções devem englobar as variações astronômicas, geográficas, geométricas do anel e climáticas (DRUMMOND, 1956; LEBARON et al., 1990; BATTLES et al., 1995; MUNNER e ZHANG, 2002; DAL PAI, 2005).

As duas montagens de anéis de sombreamento mais conhecidas e comerciais foram apresentadas por Drummond (1956) e Robinson e Stoch (1964), ambas caracterizadas pela fixação do sensor e diferenciadas pela movimentação do anel em translação paralelo ao eixo polar ou em rotação em torno do centro do anel. Uma montagem alternativa (anel fixo e inclinado na latitude local com translação do sensor paralela ao plano horizontal) foi desenvolvida nas condições brasileiras por Melo (1994). Em planos horizontais estudos tornaram essa proposta mais recente viável para o monitoramento de rotina da radiação solar difusa em estações meteorológicas. No entanto, a sua aplicação para medidas em superfícies inclinadas ainda precisa ser validada, principalmente, no que se vinculam as correções supracitadas.

Este trabalho objetivou propor fatores numéricos totais para correção da radiação difusa horária medida pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo em superfícies inclinadas a $12,85^\circ$ (latitude local $- 10^\circ$); $22,85^\circ$ (latitude local) e $32,85^\circ$ (latitude local $+ 10^\circ$) com face voltada para o Norte.

MATERIAL E MÉTODOS

As medidas das radiações global, direta na incidência e difusa, em conjunto com suas projeções para superfícies horizontal e inclinadas para o Norte, foram realizadas no período de abril de 1998 a dezembro de 2007 e fazem parte da base de dados da Estação de Radiometria Solar da UNESP, na Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu-SP, localizados na latitude 22°51' S, longitude 48°26' W e com 786 m de altitude. Em virtude dos custos de aquisição e de manutenção dos aparelhos, as medidas nos planos inclinados foram realizadas nos seguintes períodos: para 12,85° as medidas ocorreram entre 09/2001 (latitude local – 10°) e 02/2003; para 22,85° (latitude local) entre 04/1998 e 08/2001; e para 32,85° (latitude local + 10°), entre 03/2003 e 12/2007. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa, caracterizado como temperado úmido, com inverno seco e verão quente.

As medidas instantâneas da radiação global na horizontal foram obtidas com um piranômetro EPPLEY-PSP, cujas características operacionais são apresentadas na Tabela 01. Na plataforma inclinada foram empregados piranômetros CM 3 da Kipp&Zonen, que possuem uma sensibilidade de resposta de $\pm 10\text{-}35 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, tempo de resposta de 18 s, resposta a temperatura de $\pm 1,0\%$ para a faixa de -40°C a 80°C e desvios para o efeito cosseno de $\pm 2\%$ ($0 < z < 80^{\circ}$). As medidas da radiação direta na incidência foram obtidas por um pireliômetro EPPLEY-NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley (Tabela 1).

Para as medições das radiações difusas na horizontal também foram empregados piranômetros EPPLEY-PSP, enquanto que para os planos inclinados empregou-se piranômetro Branco & Preto da EPPLEY com sensibilidade de resposta de $9,0 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, tempo de resposta de 1,0 s, linearidade de $\pm 0,5\%$ de 0 a 2800 Wm^{-2} e resposta para normalização do efeito cosseno de: $\pm 1\%$ para ângulo zenital (Z) de 0 - 70° e de $\pm 3\%$ para (Z) de 70 a 80° . Em ambos os casos utilizou-se o anel de sombreamento proposto por Melo (1994) e por Melo & Escobedo (1994). Os dados foram armazenados em médias instantâneas de 5 minutos, em um sistema de aquisição de dados Microlloger CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., modelo CR23X, operando na frequência de 1Hz, armazenando médias de 5 minutos ou 300 leituras. Na transferência dos dados foi empregado um módulo de memória SM192 também da Campbell com interface SC532.

Tabela 1. Características operacionais dos detectores da radiação global, direta e difusa.

Radiação	Global	Direta	Difusa
Sensor- Marca	Piranômetro EPPLEY PSP	Pireliômetro - EPPLEY	Piranômetro CM3
Fator de Calibração	$7,45 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	$7,59 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	$18,99 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Range Espectral	295-2800 nm	250-2800 nm	300-3000 nm
Tempo de Resposta	1s	1s	18 s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a $2800 \text{ W}/\text{m}^2$)	$\pm 0,5\%$ (0 a $1400 \text{ W}/\text{m}^2$)	$\pm 1,0\%$ (0 a 2800
Cosseno	$\pm 1\%$ ($0 < z < 70^{\circ}$)	--	$\pm 2\%$ ($0 < z < 80^{\circ}$)
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C	$\pm 1,0\%$ de

A radiação difusa horária foi obtida pela diferença entre as radiações global, direta e refletida incidentes nos planos inclinados. Para geração do fator de correção (F_c) adaptou-se a metodologia desenvolvida por LeBaron et al. (1990) para superfícies horizontais, que baseia-se em quatro parâmetros: ângulo solar zenital, ângulo de inclinação da superfície, epsilon e delta, sendo que neste caso, os dois últimos parâmetros são obtidos conforme as recomendações de Perez et al. (1990), com base na turbidez atmosférica e no brilho atmosférico. As correlações foram desenvolvidas com agrupamentos de dados horários distribuídos nas classes de variação apresentadas abaixo:

- i) **ângulo solar zenital:** classe 1: 0,00 a 35,00; classe 2: 35,01 a 50,00; classe 3: 50,01 a 60,00; classe 4: 60,01 a 90,00.
ângulo de inclinação da superfície: classe 1: horizontal; classe 2: 12,85°; classe 3: 22,85°; classe 4: 32,85°.
Epsilon: classe 1: 0,00 a 1,2530; classe 2: 1,2531 a 2,1340; classe 3: 2,1341 a 5,9800; classe 4: superior a 5,9801.
Delta: classe 1: 0,00 a 0,1200; classe 2: 0,1201 a 0,2000; classe 3: 0,2001 a 0,3000; classe 4: acima de 0,3001.

Dentre as quatro classes de cada parâmetro, originou-se 256 equações para cada interação entre os fatores. Na geração das equações foram empregadas as medidas realizadas nos seguintes períodos: para 12,35° - de 01/01/2002 a 31/12/2002; para 22,85° - entre 01/01/1999 a 31/12/2000; e para 32,85° - de 01/01/2004 a 31/12/2005. As demais medidas foram empregadas nas avaliações de desempenho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso de anéis de sombreamento na medida da radiação difusa é importante, pois apresenta baixo custo e facilidade de operação. Segundo Oliveira et al. (2002) e Dal Pai (2005), na proposta de Melo (1994) o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado com ângulo igual a latitude local, e para compensar a declinação solar, o piranômetro translada paralelamente ao plano do horizonte local numa base móvel para permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel. Para a realização de medidas nas superfícies inclinadas, não foram alterados os princípios supracitados, com a modificação apenas do ângulo de inclinação da superfície.

Para tanto foram empregadas simplificações do índice de turbidez atmosférica (ϵ) e o índice de brilho atmosférico (Δ) apresentados pelo modelo de estimativa da radiação difusa de Perez et al. (1990). Em geral, independentemente do ângulo de inclinação da superfície, o ângulo zenital (Z) diminui a medida que aumenta a transmissividade atmosférica. Na geração dos fatores numéricos de correção, a base de dados de cada ângulo de inclinação foi separada e agrupada nas classes de variação do ângulo zenital, ϵ e Δ . Em cada agrupamento foram correlacionadas (por meio de regressão linear simples) as radiações difusas horárias obtidas pela diferença (referência) e medidas. Nas Tabelas 03a 05 são apresentados os coeficientes angulares obtidos em cada correlação, sendo traduzidos, como fatores de correção totais.

Tabela 2. Fatores de correção da radiação difusa medida com anel de sombreamento Melo-Escobedo (largura: 0,10m; raio: 0,40m), na inclinação de 12,85°.

Delta (Δ)	Epsilon (ϵ)			
	0 - 1,25	1,25 - 2,14	2,14 - 5,98	> 5,98
Ângulo zenital: 0 – 35°				
0 - 0,12	1,15955	1,16702	0,76162	0,70594
0,12 - 0,20	1,15162	1,08166	1,12441	1,12544
0,20 - 0,30	1,16260	1,16019	1,23926	-
> 0,30	1,20313	1,23946	1,24147	-
Ângulo zenital: 30 – 50°				
0 - 0,12	1,14208	-	-	0,94692
0,12 - 0,20	1,13412	1,09939	1,10076	1,13889
0,20 - 0,30	1,13107	1,13593	1,21014	1,22521
> 0,30	1,19848	1,22888	1,20226	1,25930
Ângulo zenital: 50 – 70°				
0 - 0,12	1,12376	1,15620	-	0,80235
0,12 - 0,20	1,13991	1,15338	1,07786	1,12233
0,20 - 0,30	1,14202	1,13822	1,19459	1,14277
> 0,30	1,19546	1,21298	1,20200	1,1922
Ângulo zenital: 70 – 90°				
0 - 0,12	1,05894	1,10252	1,08425	0,81128
0,12 - 0,20	1,11731	1,12757	1,07401	0,85821
0,20 - 0,30	1,11672	1,12547	1,14066	1,03297
> 0,30	1,16182	1,15891	1,19379	1,17102

Tabela 3. Fatores de correção da radiação difusa medida com anel de sombreamento Melo-Escobedo (largura: 0,10m; raio: 0,40m), na inclinação de 22,85°.

Delta (Δ)	Epsilon (ϵ)			
	0 - 1,25	1,25 - 2,14	2,14 - 5,98	> 5,98
Ângulo zenital: 0 – 35°				
0 - 0,12	1,13985	0,93303	0,97909	1,04973
0,12 - 0,20	1,11750	1,10098	1,10883	1,11557
0,20 - 0,30	1,13374	1,15617	1,17488	1,19846
> 0,30	1,18117	1,21270	1,23323	-
Ângulo zenital: 30 – 50°				
0 - 0,12	1,12648	0,85419	0,87978	0,88560
0,12 - 0,20	1,11011	1,10106	1,04875	1,11095
0,20 - 0,30	1,12450	1,13821	1,15548	1,18812
> 0,30	1,16588	1,19554	1,22596	1,21194
Ângulo zenital: 50 – 70°				
0 - 0,12	1,13227	0,94789	0,90153	0,77189
0,12 - 0,20	1,12365	1,07976	1,02015	1,02073
0,20 - 0,30	1,12652	1,11786	1,10985	1,2011
> 0,30	1,15500	1,17559	1,20445	1,11255
Ângulo zenital: 70 – 90°				
0 - 0,12	1,12935	1,11926	1,19269	0,73205
0,12 - 0,20	1,10420	1,09651	1,09530	0,83548
0,20 - 0,30	1,11139	1,10744	1,02642	0,89806
> 0,30	1,14044	1,13957	1,11719	1,06705

Tabela 4. Fatores de correção da radiação difusa medida com anel de sombreamento Melo-Escobedo (largura: 0,10m; raio: 0,40m), na inclinação de 32,85°.

Delta (Δ)	Epsilon (ϵ)			
	0 - 1,25	1,25 - 2,14	2,14 - 5,98	> 5,98
Ângulo zenital: 0 – 35°				
0 - 0,12	1,02028	0,92319	0,86721	0,82046
0,12 - 0,20	1,02869	0,96952	0,86870	0,86420
0,20 - 0,30	1,05354	1,01406	0,96378	0,91109
> 0,30	1,09227	1,10234	1,05368	-
Ângulo zenital: 30 – 50°				
0 - 0,12	1,00721	0,89454	0,75994	0,75071
0,12 - 0,20	1,00954	0,92711	0,82381	0,79249
0,20 - 0,30	1,00906	0,96811	0,93767	0,92825
> 0,30	1,07421	1,08419	1,08419	-
Ângulo zenital: 50 – 70°				
0 - 0,12	1,01353	0,87831	0,85598	0,74317
0,12 - 0,20	1,00801	0,91638	0,89653	0,81240
0,20 - 0,30	1,02269	0,98369	0,96029	1,10206
> 0,30	1,09893	1,10860	1,15000	1,14475
Ângulo zenital: 70 – 90°				
0 - 0,12	0,99404	0,92932	0,84351	0,70948
0,12 - 0,20	1,00652	0,91069	0,84653	0,79270
0,20 - 0,30	1,01915	0,95087	0,94958	0,87821
> 0,30	1,08273	1,06680	1,08093	1,17297

Na Tabela 5 observa-se que nas condições intermediárias de cobertura de céu (parcialmente nublado e parcialmente aberto) ocorre uma diminuição do desempenho do modelo de correção com os fatores numéricos, sendo que, a correção empregada em 22,85° (latitude local) propiciou subestimativas independentemente da cobertura de céu, em níveis energéticos máximos de $-0,019 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (-2,53%).

Para céu aberto, a correção em 32,85° apresentou MBE de 3,80%, porém em níveis energéticos representa uma superestimativa de $0,0321 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Os espalhamentos (RMSE) foram inferiores a $0,13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (28,16%), que em termos percentuais, podem ser considerados normais para a partição temporal estudada (horária). No geral, considera-se que a aplicação dos fatores de correção numéricos permitiram desempenhos com ajustamentos superiores a 95%, sendo melhores nas condições de céu nublado (condições isotrópicas).

Tabela 5. Indicativos estatísticos de desempenho dos fatores de correção da radiação difusa medida pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo (raio: 0,40m e largura: 0,10m).

Inclinação	MBE (MJ m ⁻² h ⁻¹)	RMSE (MJ m ⁻² h ⁻¹)	MBE (%)	RMSE (%)	d
Todas as coberturas					
12,85	0,00079	0,08047	0,12	12,69	0,9939
22,85	-0,0094	0,06634	-1,78	12,48	0,9934
32,85	0,01119	0,0812	2,67	19,39	0,9892
Aberto					
12,85	-0,0380	0,09749	-6,44	16,52	0,9819
22,85	-0,0075	0,06221	-1,52	12,52	0,9868
32,85	0,0321	0,1301	3,80	28,16	0,9570
Parcialmente Aberto					
12,85	0,01381	0,10249	1,93	14,31	0,9878
22,85	-0,0134	0,07815	-1,98	11,58	0,9916
32,85	0,01466	0,08279	3,07	17,32	0,9889
Parcialmente nublado					
12,85	0,01133	0,11149	1,08	10,6	0,9910
22,85	-0,0193	0,08661	-2,53	11,35	0,9925
32,85	-0,0068	0,08257	-0,99	12,13	0,9921
Nublado					
12,85	0,0079	0,03449	1,85	8,09	0,9982
22,85	-0,0037	0,04883	-1,00	13,12	0,9946
32,85	-0,0103	0,04472	-3,28	14,26	0,9953

CONCLUSÕES

O anel de sombreamento Melo-Escobedo pode ser empregado para medidas da radiação difusa em superfícies inclinadas com aplicação de fatores numéricos de correção dependentes do ângulo zenital, inclinação da superfície e parâmetros que indiquem a interação da radiação com a atmosfera. Os melhores resultados da correção numérica são obtidos em condições isotrópicas.

REFERÊNCIAS

- BATLLES, F. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v. 54, n. 2, p.105-114, 1995.
- DAL PAI, A. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 87f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp, Botucatu, 2005.
- DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. **Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie**, v. 7, p. 413-436, 1956.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAT and NIR to global solar radiation under various Sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 2, p. 299-309, 2009.
- LEBARON, B. A.; MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 249-56, 1990.
- MELO, J. M. D.; ESCOBEDO, J. F. Uso do anel de sombreamento para medida contínua da radiação solar difusa. **Energiana Agricultura**, v. 9, n. 1, p. 1-13, 1994.
- MUNEER, T.; ZHANG, X. A new method for correcting shadow band diffuse irradiance data. **Journal of**



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

Solar Energy Engineering, New York, v. 124, n. 1, p.34-43, 2002.



OLIVEIRA, A.P.; ESCOBEDO, J.F.; MACHADO, A. J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.19, n.5, p.698-708, 2002.

PEREZ, R. INEICHEN, P.; SEALS, R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990.