

# PRECISÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DO ANEL DE SOMBREAMENTO NA DETERMINAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIRETA HORÁRIA USANDO DOIS PIRANÔMETROS

Modesto A. CHAVES<sup>1</sup>, João Francisco ESCOBEDO<sup>2</sup>, Alexandre DAL PAI<sup>3</sup>

## RESUMO

Neste trabalho foi analisada precisão dos fatores de correção isotrópico, de LeBaron e de Ricieri na obtenção da radiação direta horária numa superfície horizontal, com o uso de dois piranômetros, sendo um deles sombreado com anel. Os dados utilizados foram oriundos da Estação de Radiometria Solar da UNESP de BOTUCATU-SP. O software SIMRAS (Chaves e Escobedo, 1998) foi utilizado, gerando arquivos para cada dia, com os valores de irradiância horária e dos fatores de correção. Para cada fator foi calculado o erro padrão, o erro médio e o coeficiente de correlação (R) em relação aos valores medidos com pireliômetro. Também se calculou desvio padrão ( $\sigma$ ). Conclui-se que, nas condições de Botucatu-SP, embora os três fatores apresentem uma aproximação satisfatória da irradiância solar direta horária medida com o pireliômetro, no longo prazo ocorreu uma superestimação dos valores da irradiância solar direta horária na horizontal com o uso do Fator de Ricieri e uma subestimação com o uso dos fatores de Drummond e LeBaron em relação aos valores medidos com pireliômetro. A existência de um erro sistemático no fator isotrópico leva praticamente a inviabilidade de se usar apenas este fator de correção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Anel de Sombreamento; Irradiância Solar Direta horária

## INTRODUÇÃO

A quantificação da irradiância solar direta é de extrema importância no levantamento do potencial energético solar de uma região, uma vez que ela é responsável pela energia disponível para uso, por exemplo, dos coletores solares do tipo concentradores e dos constituídos de células

---

1 M.S. Prof. Assistente UESB Doutorando da UNESP - Energia na Agricultura - Fazenda Lageado Botucatu-SP E-mail: [btchaves@zaz.com.br](mailto:btchaves@zaz.com.br)

2 Dr., Prof. Adjunto Departamento de Ciências Ambientais - UNESP - Fazenda Lageado Botucatu\_SP

2 Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Agronomia Energia na Agricultura - Fazenda Lageado Botucatu-SP

fotovoltaicas. Quando esses sistemas são fixos, o estudo da variação horária da irradiância solar direta é de grande relevância para seu melhor posicionamento (Souza e Alves, 1998).

Todavia, no Brasil, dados de irradiância solar direta praticamente inexistem, em virtude do alto custo e pouca disponibilidade de pireliômetros.

Uma alternativa, de custo relativo menor, é a utilização de um piranômetro medindo a radiação global e outro, sombreado por anel, medindo a difusa (este equipamento é muitas vezes chamado difusógrafo). A radiação solar direta numa superfície horizontal pode, então, ser obtida subtraindo-se da radiação global a difusa.

Uma vez que o anel de sombreamento intercepta uma parte de radiação difusa oriunda do céu uma correção precisa ser feita no valor registrado pelo piranômetro sombreado. Contudo, em virtude da anisotropia da radiação solar difusa, é difícil de se computar uma correlação teórica exata (Iqbal, 1983).

Vários fatores têm sido propostos para correção dos valores registrados pelo piranômetro sombreado por anel. Drummond (1956), levando em consideração apenas condições isotrópicas desenvolveu um fator de correção baseando-se na configuração de anel de sombreamento da EPPLEY. Mello (1993) propôs uma configuração própria de anel, também desenvolvendo um fator para condições isotrópicas. Estes desenvolvimentos envolvem a integração da taxa de energia radiante que chega a um elemento de superfície do local, da qual se subtrai a taxa de energia radiante interceptada pelo anel. Dependem, portanto, do local e da geometria do anel. Todavia, condições de isotropia da radiação difusa são extremamente raras de se obter o que leva a se acrescentar valores empíricos a estas correções. O próprio Drummond (1964) propôs correções para o seu fator, de acordo com o tipo de cobertura do céu.

LeBaron et al. (1990) propôs um procedimento de correção dos dados obtidos com o anel de sombreamento que, segundo este autor, se aplica em qualquer condição de céu. O procedimento envolve vários parâmetros, e leva em consideração o próprio fator de correção para condições isotrópicas.

Ricieri (1998) propôs uma metodologia de correção usando uma equação de regressão linear. A equação foi obtida ajustando-se os dados diários do anel de sombreamento aos medidos por um pireliômetro e um piranômetro. Embora a metodologia de obtenção da equação utilize dados diários os mesmos coeficientes estão sendo testados, com bons resultados, na obtenção de valores horários.

O objetivo deste trabalho foi analisar a precisão dos fatores de correção isotrópico, de LeBaron e de Ricieri na obtenção da radiação direta horária numa superfície horizontal, com o uso de dois piranômetros, sendo um deles sombreado com anel.

## METODOLOGIA

Os dados utilizados, oriundos da Estação de Radiometria Solar da UNESP de BOTUCATU-SP, foram obtidos por meio de um pireliômetro e dois piranômetros EPPLEY sendo um dos piranômetros sombreado na configuração proposta por Mello (1993).

Os dados foram coletados usando-se a DATALOGGER 21XL da Campbell Scientific Inc. Operando na frequência de 1Hz, sendo armazenada a média de 300 leituras (5 minutos). O período de coleta foi de 16/03/1996 a 04/09/1998.

O software SIMRAS (Chaves e Escobedo, 1998) foi utilizado, gerando arquivos para cada dia, com os valores de irradiância horária e dos fatores de correção, este arquivos foram posteriormente reunidos e analisados em software de planilha eletrônica e de geração de gráficos.

Para cada fator foi calculado o erro padrão (RMSE) e o erro médio (MBE) conforme, tomando os valores do pireliômetro, devidamente projetados para uma superfície horizontal, como referência IQBAL (1983). Também foram calculados o coeficiente de correlação (R) e o desvio padrão ( $\sigma$ ).

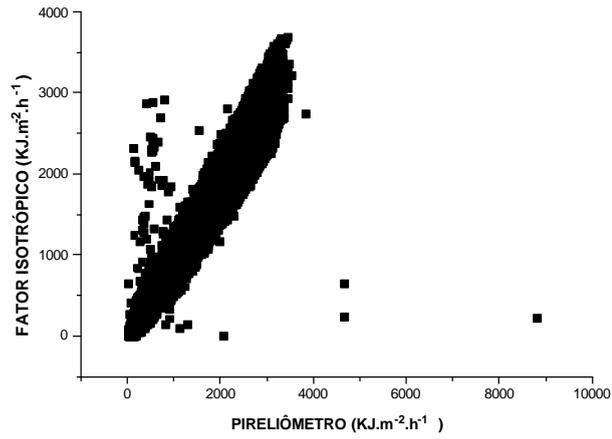
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os valores do erro padrão (RMSE), do erro médio (MBE), do coeficiente de correlação (R) e do desvio padrão ( $\sigma$ ), para os valores obtidos com cada fator de correção utilizado, em relação aos valores obtidos com o pireliômetro.

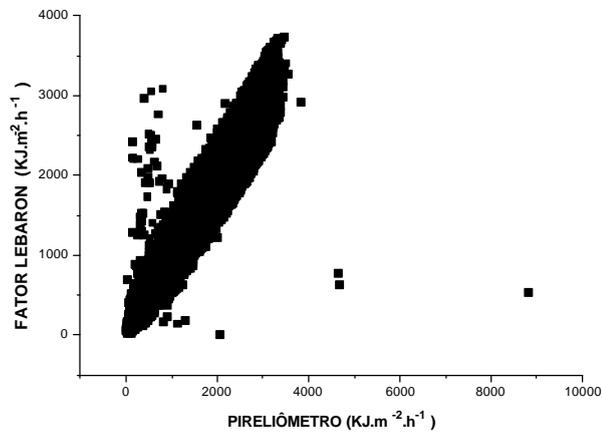
**Tabela 1.** valores do erro padrão (RMSE), do erro médio (MBE), do coeficiente de correlação (R) e do desvio padrão ( $\sigma$ ) para cada fator utilizado.

FATOR	RMSE	MBE	R	$\sigma$
ISOTRÓPICO	382,58	-122,30	0,91952	341,94339,87
LEBARON	144,12	-44,39	0,93274	317,87
RICIERI	150,60	109,96	0,92013	339,87

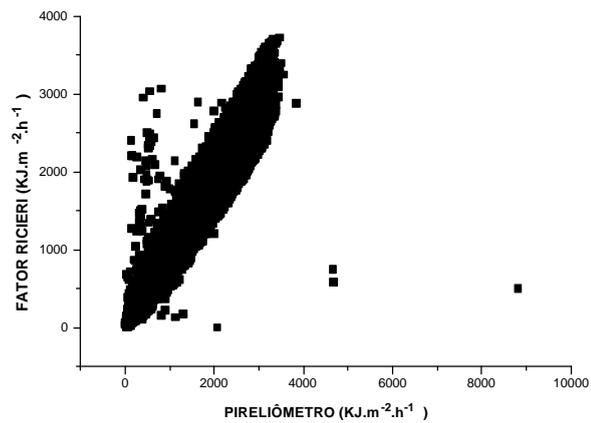
A Figura 1 mostra os valores das irradiâncias horárias, obtidos com cada um dos fatores de correção, em relação à obtida com o pireliômetro e a Figura 2 mostra os erros de cada fator, também em relação aos valores obtidos com o pireliômetro.



(a)

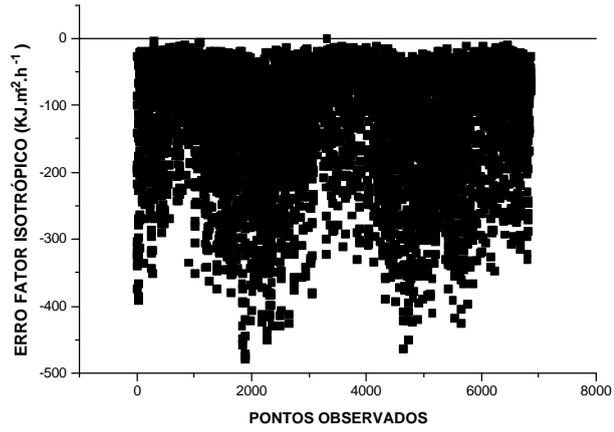


(b)

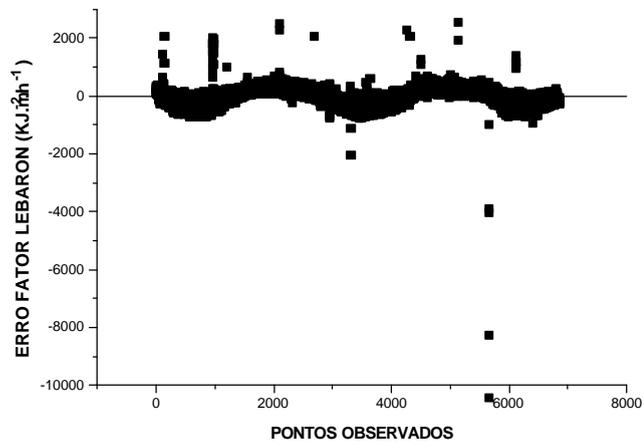


(c)

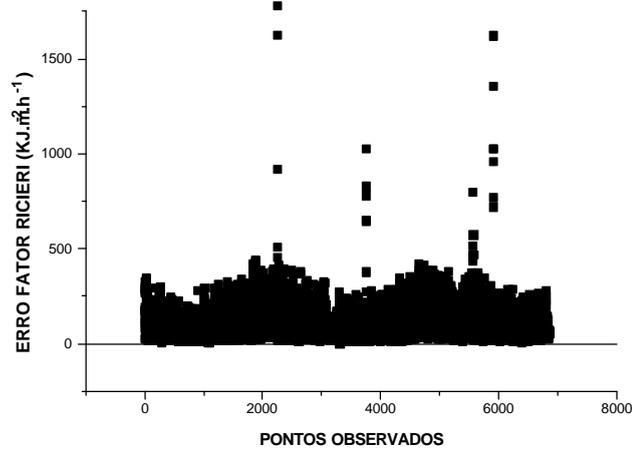
**Figura 1.** Irradiâncias horárias em relação aos valores do pireliômetro: a) Fator Isotrópico; b) Fator de LeBaron; c) Fator de Ricieri.



(a)



(b)



(c)

**Figura 2.** Erros em relação aos valores do pireliômetro: a) Fator Isotrópico; b) Fator de LeBaron; c) Fator de Ricieri.

Pelos altos coeficientes de correlação mostrados na Tabela 1, e pela distribuição dos pontos na Figura 1, nota-se que todos os modelos descrevem bem a irradiância solar horária com coeficientes de correlação muito próximos para que se possa destacar algum deles. Todavia, uma ordenação destes coeficientes indica que o modelo que descreve uma maior quantidade de pontos é o de LeBaron, seguido do de Ricieri e do Isotrópico, nesta ordem.

Pela Tabela 1 observa-se ainda que com o uso dos fatores isotrópico e de LeBaron, (que apresentaram valores de MBE negativos) subestimou-se, na média, os valores da irradiância horária enquanto que o uso do fator de LeBaron, (que apresenta MBE positivo), na média, superestimou estes valores.

Os valores de RMSE, que é uma medida da variação dos valores obtidos com os fatores em relação aos do pireliômetro, são relativamente altos. Deve-se observar, todavia, que a existência de uma pequena quantidade de valores altos de erros é suficiente para produzir grandes variações no RMSE. Tudo indica ser este o caso em que uma filtragem dos valores extremos, com o estudo de suas causas, poderia, talvez, diminuir estes valores. A Figura 1 mostra que os valores extremos ocorrem, em sua maioria, quando os valores da radiação solar direta, medida pelo pireliômetro, são baixos, podendo estar associados aos momentos próximos do nascer e do por do sol quando os erros na medição com os piranômetros são maiores.

Pela Figura 2, nota-se que enquanto com o uso do fator de LeBaron os erros apresentam-se ora positivos, ora negativos. O fator de Ricieri apresentou a imensa maioria dos valores de erros positivos ou nulos, com pouquíssimos valores negativos. Este resultado para o fator de Ricieri é bastante interessante, visto que na obtenção dos coeficientes para este fator se utilizou valores diários, e sugere que um modelo semelhante, com coeficientes gerados a partir de valores horários possa, provavelmente, fornecer resultados melhores ainda.

O Fator Isotrópico somente apresentou valores de erros negativos, com exceção de um valor nulo. Isto indica a existência de um erro sistemático para menos, quando se usa apenas este fator na correção dos valores medidos com o piranômetro sombreado por anel. A causa deste erro pode estar no fato de que, como a correção é feita apenas com base na geometria do anel, acrescenta-se sempre ao valor medido a fração da radiação difusa isotrópica oriunda do céu que estaria incoberta pelo anel. A existência deste erro sistemático torna relativamente difícil aceitar apenas a correção isotrópica como, inclusive, já foi apontado por Drummond (1964).

O uso do fator de Ricieri, levou a superestimação dos valores da irradiância solar direta horária (Figura 2) enquanto que os fatores Isotrópico e de LeBaron mostrou uma tendência a subestimar esta irradiância. Todavia, dos três fatores o que apresentou uma distribuição de erros mais próxima do esperado, com valores ora positivos, ora negativos, foi o fator de LeBaron.

## CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, podemos concluir que, nas condições de Botucatu-SP, embora os três fatores apresentem uma aproximação satisfatória da irradiância solar direta horária medida com o pireliômetro, no longo prazo ocorreu uma superestimação dos valores da irradiância solar direta horária na horizontal com o uso do Fator de Ricieri e uma subestimação com o uso dos fatores de Drummond e LeBaron em relação aos valores medidos com pireliômetro. A existência de um erro sistemático no fator isotrópico leva praticamente a inviabilidade de se usar apenas este fator de correção.

## BIBLIOGRAFIA

- CHAVES, M. A., ESCOBEDO, J. F. Solar Radiation Data Base Management Software In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, VII, 1998, Rio de Janeiro, Proceedings... p. 1190-1195
- DRUMMOND, A. J. On the measurement of sky radiation. *Archives of Meteorological, Geophysical and Bioklimatological Service*. London, v.7 p. 3-4, 1956.
- DRUMMOND, A. J. Comments on "Sky radiation measurement and correction" *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.3, p.810-11, 1964.
- IQBAL, M. *An Introduction to Solar Radiation*. New York, Academic Press, 1983. 390p.
- MELLO, J. M. *Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta*. Botucatu: UNESP, 1993 265p Tese de Doutorado em Agronomia.
- RICIERI, R. P. *Modelos de estimativa dos métodos de medida da radiação solar difusa*. Botucatu: UNESP, 1998, 287p Tese de Doutorado em Agronomia.
- SOUZA, M. J. H., ALVES, A. R. Irradiância solar direta horária: uma avaliação de modelos para sua estimacão. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.17. p. 1-14, 1998.