

UMA ANÁLISE DA INSOLAÇÃO DIÁRIA ESTIMADA POR HELIÓGRAFO, PIRELIÔMETRO EQUIVALENTE E SATÉLITE EM MACEIÓ, AL

ANTHONY CARLOS SILVA PORFIRIO¹; JUAN CARLOS CEBALLOS²; JOSÉ
LEONALDO DE SOUZA³; MARCOS LIMA RODRIGUES⁴

1 - Meteorologista, Mestrando em Meteorologia, DSA/CPTEC/INPE, Cachoeira Paulista, SP, anthony.carlos@cpotec.inpe.br.

2 - Dr. em Meteorologia, Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA/CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, SP.

3 - Prof. Associado Lab. de Agrometeorologia e Radiometria Solar, Inst. de Ciências Atmosféricas, UFAL, Maceió – AL.

4 - Bacharel em Computação Científica, Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA/CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, SP.

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011
– SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari - ES

ANALYSIS OF DAILY SUNSHINE DURATION BY HELIOGRAPH, EQUIVALENT PIRELIOMETER AND SATELLITE IN MACEIO, AL

ABSTRACT: Sunshine duration obtained by heliograph within metropolitan area of Maceio, AL, November-December 2007, was compared with estimates following three methods: formal equivalent pyr heliometer, effective sunshine duration and satellite-based estimation. Ground data were obtained at CECA/UFAL Radiometric/Agrometeorological station (9°28'S, 35°49'W, 127m) and satellite estimates were provided by DSA/CPTEC/INPE. Sunshine duration assessed by equivalent pyr heliometer does not show good performance, requiring the use of fluxes averaged in less than 5 minutes. Effective duration method (which is based on the same pyr heliometric data) shows good linear fit with heliographic data, and very good agreement with satellite-based estimates. Associated error is -8 to -12%. Cumulated sunshine over ten-day periods suggests that effective-sunshine and satellite-based methods yield estimates statistically compatible with heliographic measurements.

KEYWORDS: sunshine duration, solar radiation, pyr heliometer, satellite GOES

INTRODUÇÃO: A radiação solar é uma variável fundamental para definir o clima regional e um fator essencial na produtividade agrícola. Historicamente, e dado o custo de instrumentos e de sua manutenção, os heliógrafos (registradores de insolação, duração do brilho solar ou *sunshine duration*) têm ocupado o lugar dos solarímetros (medidores de irradiância) nas estações meteorológicas. A insolação é um parâmetro importante utilizado em estudos agrometeorológicos e na previsão de produtividade agrícola. O princípio de medida do heliógrafo (modelo Campbell-Stokes) é a queima de uma faixa de papel por concentração de raios solares e a observação do registro resultante (heliograma). O processo de medição é simples e apresenta alta correlação com todas as componentes da radiação solar (global, difusa, direta) (AZEVEDO & MARQUES, 1987). Contudo, a estimativa de insolação diária apresenta diversas limitações. O patamar de radiação solar direta necessária para provocar queima do heliograma é relativamente indefinido e depende da qualidade do papel e da umidade atmosférica (IQBAL, 1983). Em condição de céu claro e baixa umidade do ar seriam necessários 70 W m^{-2} para a queima, porém, com céu nublado e umidade elevada seriam 280 W m^{-2} (COULSON, 1975). O instrumento foi adotado pela Organização

Meteorológica Mundial como instrumento padrão para avaliar insolação, propondo 120 Wm^{-2} como patamar de queima de heliograma, admitindo 20% de flutuação em torno desse valor, e indicando o pireliômetro como sensor de referência para estimativa do brilho solar (WMO, 1985). Os resultados de comparações da insolação com o fluxo direcional (a incidência normal) são variados: enquanto Chaves & Escobedo (2000) encontraram alta correlação para medidas em Botucatu, SP, Ceballos *et al.* (1992) observaram que em estações da Paraíba a linearidade é mais elevada apenas no caso de valores médios mensais.

O número de estações automáticas vem crescendo no Brasil nos últimos anos (ver, por exemplo, dados distribuídos na internet pela rede automática do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php> e pelo Sistema de Coleta de Dados gerenciado pelo INPE, <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>). Por um lado as estações não medem insolação, mas irradiância solar. Evidencia-se a oportunidade de melhor definir a relação entre insolação e irradiação solar, para dar continuidade e ampliar séries temporais de insolação. Por outro lado, extensas regiões do país ainda ficam sem registro de dados meteorológicos, e técnicas satelitais podem ser usadas para estimar insolação (CEBALLOS e RODRIGUES, 2008; ver também estimativas disseminadas na internet em <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>).

Neste trabalho apresentam-se comparações de medidas heliográficas de insolação com estimativas realizadas com pireliômetro equivalente, insolação efetiva e satélite. A presente contribuição se concentra na área metropolitana de Maceió, AL.

MATÉRIAL E MÉTODOS: Foram realizadas observações de insolação (n), irradiância solar global (E_g) e irradiância solar difusa (E_d) na estação Radiométrica/Agrometeorológica da Universidade Federal de Alagoas ($9^\circ 28' \text{S}$, $35^\circ 49' \text{W}$, 127m), Centro de Ciências Agrárias, distante 24 km do centro da cidade de Maceió. As medidas de insolação diária (em horas) foram obtidas a partir de heliogramas de um heliógrafo convencional do tipo Campbell-Stokes; as irradiâncias global e difusa (W m^{-2}) foram medidas com dois piranômetros CM5 da Kipp & Zonen, sensíveis na faixa de 0,305-2,800 μm . Um sistema automático de aquisição de dados (CR10X, Campbell Scientific) foi programado para realizar leituras a cada 10 segundos e armazenar médias de 5 minutos. Para medir irradiância solar difusa, foi acoplado um anel de sombreamento que obstrui a irradiância a incidência normal (fluxo direcional Φ no que segue). O registro da E_d podia ser corrigido mediante um fator multiplicativo que leva em conta a largura e o raio do anel de sombreamento, a latitude do local, a declinação solar, o ângulo azimutal do sol no nascer e um fator para a condição de nebulosidade (OLIVEIRA *et al.*, 2001). Dessa forma, foi possível avaliar insolação pelo método piranométrico (“pireliômetro equivalente”), estimando Φ como

$$\Phi = \frac{(E_g - E_d)}{\cos Z_o} \quad (1)$$

onde Z_o é o ângulo zenital solar. Adotando o padrão recomendado pela WMO (1985), a insolação é definida como a duração do tempo no qual ocorre $\Phi \geq 120 \text{ W m}^{-2}$. O critério foi aplicado às médias de $\langle \Phi \rangle$ de 5 minutos. Um segundo método de avaliação de insolação efetiva (CEBALLOS *et al.*, 1992) considerou que a passagem de uma nuvem inibe a queima de papel, de forma que o fluxo médio $\langle \Phi \rangle$ num intervalo de tempo Δt é representativo da fração de tempo f com raios solares diretos nesse intervalo, definindo uma insolação efetiva n_{ef} como

$$n_{ef} = \sum_i f_i \Delta t_i = \sum_i \left[\frac{\langle \Phi \rangle_i}{\Phi_{oi}} \right] \Delta t_i \quad (2)$$

ou seja a soma dos intervalos efetivos com céu claro, sendo Φ_o o fluxo direcional esperado em condição de céu claro (desprovido de nuvens). Para estimar este fluxo direcional, o espectro solar foi dividido em duas bandas: i) visível (onde a atenuação predominante deve-se a espalhamento Rayleigh) e ii) infravermelho próximo (onde não há espalhamento, mas absorção da radiação direta por gases como H_2O e CO_2). Nesta aproximação o efeito do aerossol foi desprezado. Desse modo, Φ_o pode ser avaliado de acordo com a expressão

$$\Phi_o = T_{vis} S_{vis} + (S_{iv} - \Delta S), \quad T_{vis} = \exp\left(\frac{-\tau_R}{\cos Z_o}\right) \quad (3)$$

onde S_{vis} , S_{iv} é o fluxo direcional no topo da atmosfera corrigido pela distância média terra-sol, T_{vis} é a transmitância da atmosfera, $\tau_R \approx 0.15$ valor característico da profundidade óptica da atmosfera para dispersão Rayleigh em condição de céu claro, ΔS a soma da absorção pelo vapor d'água (ΔH_2O) e dióxido de carbono (ΔCO_2). Parametrizações de absorção estão publicadas em Ceballos *et al.* (2004). O valor adotado para água precipitável foi de $w_2 = 3,5 \text{ g cm}^{-2}$ (típico para região litorânea). Um exemplo do ciclo diário de $\langle \Phi \rangle_i$ e de Φ_{oi} é ilustrado na Figura 1, para um dia com predominância de céu claro. Observa-se que a estimativa de Φ_{oi} é de boa qualidade, e que este fluxo direcional é praticamente constante no intervalo de algumas horas em torno do meio-dia.

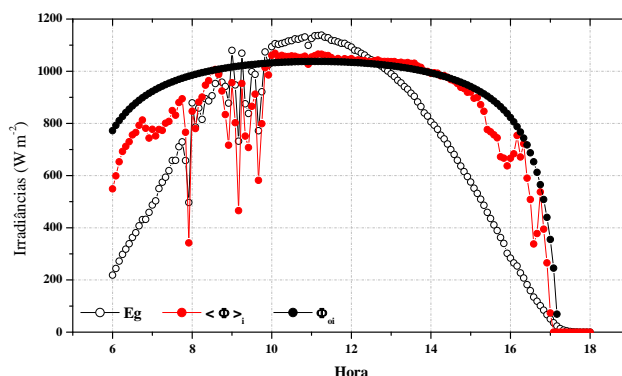


Figura 1. Ciclo diário de fluxo direcional medido ($\langle \Phi \rangle_i$) e máximo esperado (Φ_{oi}), para uma condição de céu claro (02/11/2007) na região metropolitana de Maceió, AL.

As estimativas de insolação baseadas em satélite meteorológico foram fornecidas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do INPE (DSA/CPTEC/INPE). Elas se baseiam em imagens do canal VIS do sensor GOES Imager (CEBALLOS & RODRIGUES, 2008). De forma resumida, a estimativa adota o seguinte critério: i) A refletância $R1$ observada pelo sensor do satélite representa um valor médio de áreas com refletância máxima (R_{max} , associada à transição entre cobertura por nuvens Cu e por St) e refletâncias mínimas (R_{min} , associadas à superfície), ponderadas pela cobertura parcial de nuvens C , dentro do pixel considerado; $R1 = CR_{max} + (1-C)R_{min}$, o que possibilita a estimativa de nebulosidade C . O principal modulador da insolação do ponto de vista satelital é a nebulosidade, de tal forma que a insolação pode ser avaliada como segue:

$$nsat = \sum_i (1 - C_i) \Delta t_i \quad (4)$$

C_i é a nebulosidade característica do intervalo de tempo Δt_i entre duas imagens sucessivas, geralmente meia hora. Nuvens com refletância $R > R_{max}$ correspondem a céu totalmente coberto ($C = 1$). Claramente, a qualidade desta integração pode ser afetada por eventuais falhas na recepção de imagens. Nas análises foram selecionados dias do mês de novembro e dezembro de 2007, representativos do período seco regional. Foram analisados eventuais

relações funcionais entre as variáveis insolação por heliógrafo (n), pireliômetro equivalente ($npir$), insolação efetiva (nef) e estimada por satélite ($nsat$). Também foram comparados os valores da insolação média decêndial, variável importante para fins agrícolas. Para qualificar uma relação linear entre variáveis, realizou-se regressão linear e estimativa do coeficiente de determinação R^2 . Para fins de comparação entre médias decêndiais, a flutuação esperável σ_m de uma média $\langle X \rangle$ para um período de $K=10$ dias, com desvio padrão σ dos dados, foi avaliada como $\sigma_m = \sigma/\sqrt{K}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 2 permite comparar os distintos métodos de medida (heliógrafo, pireliômetro equivalente e insolação efetiva) e estimativa satelital de insolação para dias do período seco.

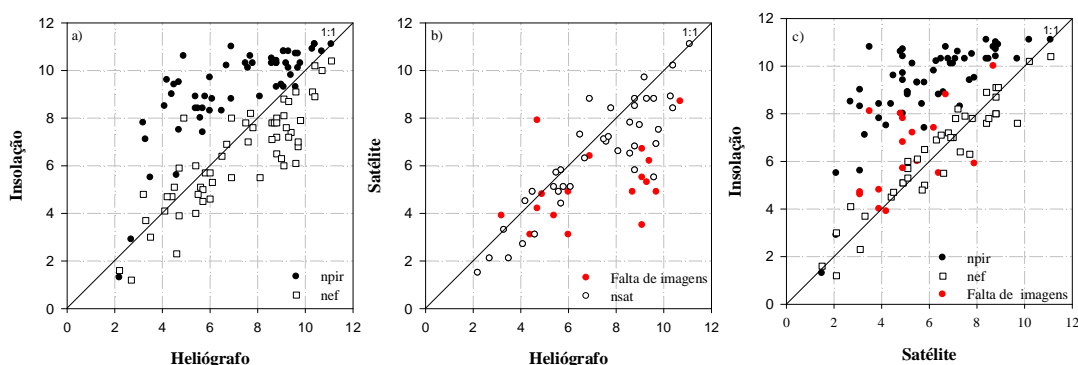


Figura 2. Relação entre insolações diárias: (a) heliógrafo x pireliômetro equivalente e insolação efetiva, (b) heliógrafo x satélite e (c) satélite x pireliômetro equivalente e insolação efetiva, para o período seco na região metropolitana de Maceió, AL. Falta de 5 imagens consecutivas (2,5 horas) representados em vermelho.

Tabela 1. Equações de estimativa diária de insolação (horas) entre: piranômetro equivalente ($npir$), heliógrafo (n), satélite ($nsat$) e fração absoluta (nef) no período seco e respectivos números de dias (K) e coeficiente de determinação R^2 .

Período	$Y = aX$	K	R^2	$Y = a + bX$	K	R^2
Seco	$npir \leftrightarrow n$ não linear	57	-	$npir \leftrightarrow n$ não linear	57	-
	$nef = 0,876 (n)$	57	0,71	$nef = 1,024 + 0,747 (n)$	57	0,73
	$nsat = 0,887 (n)$	40	0,78	$nsat = 0,194 + 0,863 (n)$	40	0,78
	$npir \leftrightarrow nsat$ não linear	40	-	$npir \leftrightarrow nsat$ não linear	40	-
	$nef = 0,982 (nsat)$	40	0,88	$nef = 0,682 + 0,887 (nsat)$	40	0,89

A insolação segundo pireliômetro equivalente aproxima-se do heliógrafo para valores baixos (< 3 horas) e altos (> 9 horas), o que representa condições atmosféricas de céu nublado e claro, respectivamente (Figura 2a), mas percebe-se grande dispersão em condições intermediárias (parcialmente nublado). A passagem intermitente de nuvens (predominantemente do tipo cúmulos) na região do estudo provoca constantes variações no fluxo direcional, que oscila entre valores abaixo do limiar de 120 W m^{-2} e acima de 600 W m^{-2} em intervalos de poucos minutos. A média de Φ em 5 min permanece na maioria dos casos acima dos 120 W m^{-2} , o que provoca uma contagem excessiva da insolação. Visivelmente o comportamento entre o n e o $npir$ é muito dispersa, ao ponto de não justificar a busca de um ajuste entre ambas. É interessante observar que em Botucatu-SP os resultados obtidos por Chaves & Escobedo (2000) mostraram forte relação linear entre n e $npir$, com coeficiente de correlação $R = 0,98$. Nesse caso, o instrumento utilizado para medida de fluxo direcional era um pireliômetro NIP-EPPLEY. A insolação efetiva nef mostrou melhor ajuste linear com

relação à insolação n (Figura 2a). Notou-se aglomeração de dados de heliógrafo entre 9 e 10 horas, causado provavelmente pela queima excessiva no papel heliográfico. É válido lembrar que a queima apropriada é influenciado pela qualidade do papel e tinta do heliograma. A nef apresentou subestimativa de 13% (Tabela 1). Essa diferença pode ser creditada a vários aspectos acumulativos, como: i) não consideração da componente ultravioleta do espectro solar (da ordem de 30 W m^{-2} à superfície) (PORFIRIO, 2010), ii) erro no cálculo de Φ para ângulos zenitais elevados, iii) não correção do efeito de anel e iv) estatística de dados ainda pobre. Entretanto, a concentração de pontos no intervalo $[8,5 < n < 10, 6 < nef < 8]$ sugere a queima excessiva de heliograma (impressão acentuada pela coerência entre nef e $nsat$ observada na Figura 2c). A eliminação desses pontos eleva o coeficiente de ajuste para 0,92 e o de correlação para 0,80 na Tabela 1. A estimativa de insolação por satélite exhibe considerável linearidade com n (Figura 2b), exceto em dias com falta de imagens (destaque em vermelho), o que afeta negativamente a integração diária de insolação (definida na equação 4). Observa-se que a estimativa $nsat$ subestima a medida do heliógrafo em torno de 12%, porém, poderia reduzir-se a 8% eliminando dias com queima excessiva de heliograma. Comportamentos similares foram obtidos por Ceballos e Rodrigues (2008), com 10% de subestimativa para São Paulo e Fortaleza. Do mesmo modo, o $npir$ não mostrou relação linear com a $nsat$ (Figura 2c). Esta última apresentou bom ajuste com nef (2 % de subestimativa, Figura 2c), salvo para dias com deficiência de imagens (marcados em vermelho). Esse resultado sugere a excelência da estimativa por satélite realizada nessas condições atmosféricas. Informações de insolação acumulada num intervalo decêndial (dez dias) são importantes nas atividades agrícolas. Para uma análise qualitativa da coerência nesse intervalo, a Figura 3 apresenta a insolação média decêndial para os quatro métodos no período seco de 2007, incluindo o desvio padrão da média. Se as barras de desvio padrão de duas variáveis se cruzam, consideramos um caso de boa compatibilidade.

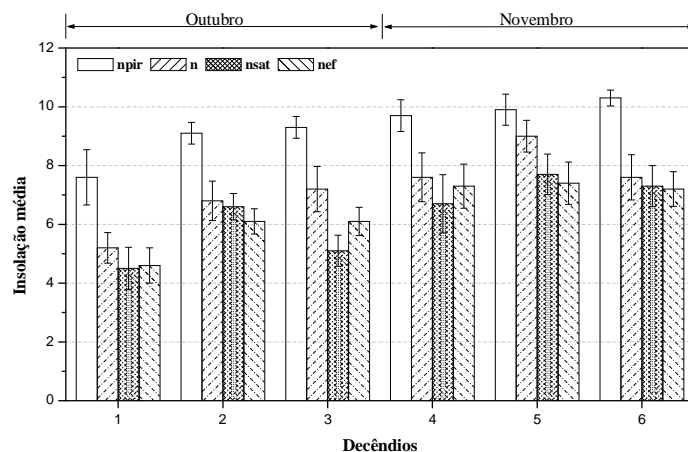


Figura 3. Insolações médias decêndiais medida por pireliômetro equivalente ($npir$), heliógrafo (n), insolação efetiva (nef), e estimada por satélite ($nsat$) para o período seco na região metropolitana de Maceió, AL.

Claramente a medida de $npir$ exhibe valores elevados de insolação, de forma que apenas em um caso (5º decênio) apresenta boa compatibilidade com o n . Com relação ao heliógrafo a insolação $npir$ acumulada em 30 dias atingiria 63 horas de diferença, acrescentando na ordem de cinco dias de insolação (n para 30 dias = 215 horas). De fato, as estimativas por satélite e insolação efetiva mostraram-se coerentes com heliógrafo, com diferença acumulada mensal de -26 e de -24 horas, respectivamente; apesar disso os valores acumulados de n , nef e $nsat$

seriam estatisticamente compatíveis a um nível elevado de significância. No terceiro decêndio houve escassez de imagens de satélite.

CONCLUSÕES: A insolação diária mediante heliógrafo n em Maceió no período seco de 2007, não apresenta relação linear com a estimada n_{pir} por pireliômetro equivalente (baseado em valores médios de fluxo direcional $\langle\Phi\rangle$ em 5 minutos), embora seus valores se aproximem em condições de céu claro ou nublado. Provavelmente, a relação seria muito mais definida ao considerar $\langle\Phi\rangle$ em intervalos menores, como 1 minuto. O método da insolação efetiva n_{ef} mostra bom ajuste linear em relação ao heliógrafo, e comportamento linear acurado quando comparado com satélite. A estimativa n_{sat} por satélite geoestacionário é realizada com acurácia razoável, exceto em dias com deficiência de imagens. A observação da insolação na base decêndial sugere que, estatisticamente, as insolações acumuladas de n_{sat} e n_{ef} são compatíveis com a de heliógrafo. Séries de dados mais extensas e de outros locais estão sendo elaboradas e podem fornecer informações mais conclusivas e abrangentes sobre a compatibilidade dos três métodos aqui apresentados.

AGRADECIMENTOS: À PGMET/CPTEC/INPE, ao LARAS/ICAT/UFAL, à DSA/CPTEC/INPE e à CAPES/MEC, que forneceram dados e deram apoio na participação no XVII CBAGRO. Este trabalho é parte do projeto CAPES Pró-Engenharias nº 871/2008.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, A.J.; MARQUES, C.V. Notícia explicativa – Insolação. **Atlas do Meio ambiente**, Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa, 1987.
- CEBALLOS, J.C.; MOURA, G.B.A.; BEZERRA, V.F.; FARIAS, J.d’A. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasil. de Meteor.** V7, 563-581, 1992.
- CEBALLOS, J.C.; BOTTINO, M.J; SOUZA, J.M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **J. Geophys. Res.** V 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- CEBALLOS, J.C.; RODRIGUES, M.L. Estimativa de insolação mediante satélite geoestacionário: resultados preliminares. In: **XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2008, São Paulo, 2008.
- CHAVES, M.A.; ESCOBEDO, J.F. Correlação entre os valores de insolação e razão de insolação medidos com pireliômetro e heliógrafo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 15, n.3, p. 47-54, 2000.
- COULSON, K.L. Solar and Terrestrial Radiation – Methods and Measurements, New York, **Academic Press**, 1975, 322p.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York, Academic press, 1983.
- OLIVEIRA, A.P; ESCOBEDO, J.F; MACHADO, A.J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at the surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, (in press), 2001.
- PORFIRIO, A.C.S. **Radiação solar ultravioleta na região metropolitana de Maceió, Alagoas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, p.60, 2010.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne). Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO III). Instruments and Observing Methods Report No. 22, WMO/TD-No. 50, Geneva, pp. 263–271, 1985.