

ESTIMATIVA DE INSOLAÇÃO MEDIANTE SATÉLITE GEOSTACIONÁRIO: RESULTADOS PRELIMINARES

Juan Carlos Ceballos, Marcos Lima Rodrigues

Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, CPTEC/INPE – Cachoeira Paulista – SP

ceballos@cptec.inpe.br, marcos@cptec.inpe.br

RESUMO. A insolação diária pode ser estimada a partir de imagens do canal visível de satélite geoestacionário. Apresenta-se um algoritmo simples, baseado na relação linear entre cobertura de nuvens e refletância observada no canal VIS do GOES. A comparação de resultados com verdade terrestre (heliogramas) sugere estimativa satisfatória de insolação diária dentro de 10% de erro sistemático.

ABSTRACT. Daily sunshine duration can be assessed from VIS channel imagery of geostationary satellite. We present a simplified algorithm, based on a linear relationship between cloud cover and pixel reflectance in GOES VIS channel. Comparison with ground truth (provided by sunshine recorder) suggests that assessment is accurate within 10% of systematic deviation.

Palavras-chave: insolação, heliógrafo, satellite GOES

INTRODUÇÃO

A radiação solar é fator de importância fundamental para as atividades agrícolas, seja do ponto de vista da evaporação ou da geração de massa. No primeiro caso, o balanço de radiação costuma ser a variável predominante e a radiação solar global é um componente dela (usualmente, a que tem maior peso relativo) do balanço de radiação. No segundo caso, a radiação no espectro visível é a variável de interesse. Na América do Sul a radiação global tem sido objeto de vários trabalhos recentes de recopilação histórica de medidas de solarímetros e de aproximações mediante dados de heliógrafo, no Brasil (Tiba 2000) e na Argentina (Grossi e Righini 2007). Estimativas climatológicas a partir de imagens de satélites geoestacionários registram publicações para o Brasil (INMET 1998, Pereira et al. 2007), ou difusão através da internet para a região da América do Sul (ver página do CPTEC de Satélites/Radiação Solar e Terrestre). Até há pouco tempo, a escassez de dados de radiação solar era evidente; nos últimos anos as redes meteorológicas brasileiras têm introduzido numerosas estações automáticas que incluem piranômetros e permitem monitorar irradiação solar global em escalas de uma hora e difundem seus dados através da Internet (dois exemplos são: rede do INMET, escala uma hora; rede associada ao SCD, Satélite de Comunicação de Dados, do Brasil, escala de 3 horas. Vide referências no final do artigo).

A duração do brilho solar ou insolação (¹) medida por heliógrafos tem sido a variável usualmente utilizada para estimativas de irradiação solar (energia por unidade de área acumulada num dia), devido à simplicidade da medição. Entretanto, os valores de insolação obtidos apresentam diversas limitações (Ceballos *et al.* 1992), associadas especialmente à

¹ *Sunshine duration* em inglês – não confundir con *insolation*- ou *heliofania* na terminologia em espanhol.

confiabilidade da combustão de papel no heliograma. A conclusão geral é que a estimativa de insolação média tende a ser mais confiável como média mensal. De fato, a expansão de redes de estações automáticas tende a banir o uso de heliógrafos a favor dos piranômetros com sinal de saída elétrico. A medição automática de insolação requer do equivalente de pireliômetros (medidores de radiação direta a incidência normal) e de um dispendioso sistema de acompanhamento do sol. Assim, nos próximos anos poderá assistir-se a uma reversão dos dados de insolação e ao avanço dos acervos de irradiação solar.

Entretanto, a duração do brilho solar (diário e acumulado num ciclo fenológico) pode ser de grande importância em atividades agrícolas. Por exemplo, ela tem relação estreita com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) de arroz irrigado e portanto correlação elevada com o rendimento da cultura (Klering *et al.* 2007). Como segundo exemplo, Mandelli e Tonietto (2003) expressam que “a videira é uma planta exigente em luz, requerendo elevada insolação durante o período vegetativo, fator importante no processo da fotossíntese, bem como na definição da composição química da uva”. A variável diagnóstica utilizada é a quantidade de horas de insolação durante o ciclo fenológico ou em partes de ele. Esta variável tem íntima relação com a irradiação no intervalo visível (medida como PAR: *Photosynthetically Active Radiation*), mas esta última não tem um histórico de determinações tão extenso como a insolação. Assim, o monitoramento de insolação continua sendo uma atividade relevante e sua eventual estimativa por satélite especialmente recomendável, dada a grande extensão, a resolução espacial e a frequência de observações de satélites geoestacionários como os da série GOES. No presente trabalho apresentam-se um método de monitoramento da insolação e alguns resultados preliminares.

A ESTIMATIVA DE INSOLAÇÃO POR SATÉLITE

Os sensores de satélite no espectro solar usualmente incluem um canal próximo do máximo do espectro visível. Neste trabalho nos limitamos a analisar o canal 1 do GOES Imager, centrado em 0,55 μm . A informação recebida em terra corresponde a uma radiância espectral L_λ (em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sterad}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$) observada como valor médio na área de um pixel (*picture element*, da ordem de 1 km \times 1 km no nadir do satélite). A irradiância espectral no topo da atmosfera é $E_o = \mu S_\lambda$, onde S_λ é o fluxo específico espectral (irradiância a incidência normal) proveniente do sol nesse mesmo intervalo espectral, e $\mu = \cos Z_o$ o cosseno do ângulo zenital solar local Z_o . Supondo que esta radiância refletida pelo sistema Terra-atmosfera é isotrópica, a irradiância espectral emergente no topo da atmosfera será $E^\uparrow = \pi L_\lambda$ e a refletância observada $RI = E^\uparrow/E_o$. Operacionalmente, a partir de imagens de satélite define-se o fator de refletância FI ⁽²⁾ e a refletância estimada RI como

$$FI = \pi L_\lambda / S_\lambda ; RI = fFI / \mu . \quad (1)$$

O fator f é um coeficiente de correção por afastamentos da isotropia; no que segue, considera-se $f=1$. É natural considerar que a refletância observada é um valor médio entre aquele de nuvens (com uma refletância típica R_{max}) e aquele do solo (com R_{min}), ponderado com a cobertura parcial de nuvens C dentro do pixel observado. Uma hipótese simples é considerar a ponderação

$$RI = C.R_{\text{max}} + (1-C).R_{\text{min}}, \quad (2)$$

² Outros autores denominam de albedo (ver p.ex. manuais da NOAA)

o que leva à estimativa da nebulosidade C (e da área não coberta $1-C$) segundo a expressão

$$C = (RI - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}). \quad (3)$$

O critério subjacente é que o conceito de nebulosidade parcial se aplica basicamente a céu com cobertura de cumulus. Quando seu desenvolvimento vertical (e horizontal) leva a um ocultamento total do disco solar, do ponto de vista satelital tem-se uma transição entre coberturas por cumulus e por estratiformes. A classificação de nuvens permite avaliar a refletância típica associada a esta transição. A partir dela, o desenvolvimento vertical da camada estratiforme conduz ao incremento de refletância corresponde sempre a $C=1$. Os valores extremos encontrados por Ceballos *et al.* (2004) para a eq. (3) são $R_{\max} = 0,465$ e $R_{\min} = 0,09$ para superfície continental. Considerando uma frequência de imageamento de uma imagem a cada intervalo $\Delta t =$ meia hora, e que a nebulosidade C avaliada é característica desse intervalo, então a insolação N ao longo do período diurno resulta avaliado por

$$N = \sum_{k=1,K} (1 - C_k) \Delta t \text{ [horas]} \quad (4)$$

A eq. (4) é equivalente a aproximar uma integral pela conhecida regra dos trapézios. Esta regra é aplicável na eventual falta de imagem para o k -ésimo intervalo. O número usual de imagens durante um período diurno (abrangendo a América do Sul) é de $K = 30$.

RESULTADOS

Uma primeira verificação do valor extremo R_{\max} realizou-se a partir de imagem classificada para América do Sul e do arquivo de refletância no canal VIS (ambas em projeção satélite). As características da classificação podem ser vistas na página CPTEC www.satellite.cptec.inpe.br → Classificação de nuvens. Para cada tipo fundamental de nuvem foi construído um histograma de frequência acumulada (ou função de distribuição, na sua versão padronizada com relação ao total de pixels nessa classe). A Figura 1 ilustra os resultados.

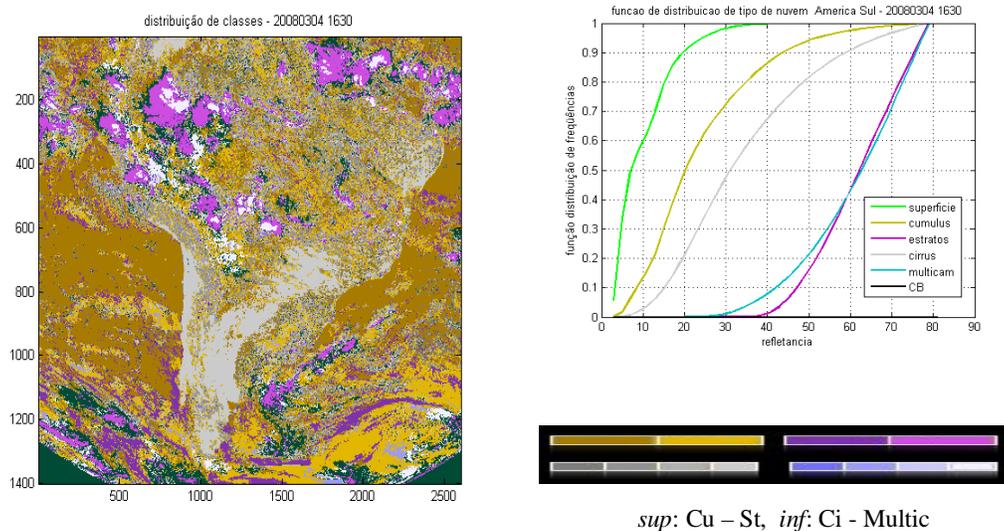


Figura 1. Distribuição geográfica do tipo de nebulosidade e da função de distribuição de frequências na América do Sul, dia 20080304 1630GMT

Observa-se a imagem classificada (em projeção satélite) e as funções de distribuição para o dia 04 de março de 2008, 1630 GMT. É evidente que o 10% superior da função de distribuição de Cu começa em $RI = 0,44$ e o primeiro 10% para St apresenta refletâncias entre 0,4 e 0,47. Portanto, o valor 0,465 adotado é coerente com uma região de transição entre Cu em desenvolvimento e sua fusão em blocos estratiformes. Valores $RI > 0,465$ representam cobertura total e portanto $C=1$.

A verificação do valor R_{max} de transição permite a aplicação das eqs. (3) e (4), e a construção de cartas de insolação. As figuras 2 ilustram o resultado (em horas) para o dia 23 de março de 2008, e o valor médio para os quinze dias precedentes.

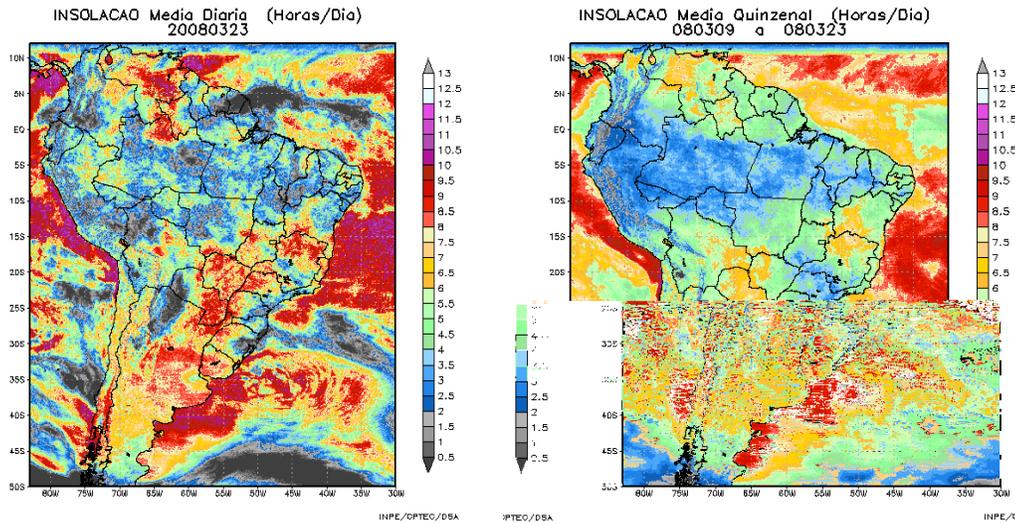


Figura 2. Estimativa da distribuição geográfica de insolação (em horas) para América do Sul no dia 20080323 e do valor médio nos 15 dias precedentes.

Para verificar a qualidade da estimativa proposta, foi realizada comparação com dados heliográficos das estações meteorológicas do IAG/USP em São Paulo, e da Universidade do Ceará em Fortaleza. A comparação tem resolução espacial de um pixel (aproximadamente 4 km). Percebe-se que existe uma linearidade definida entre os dados de heliógrafo e a insolação estimada, com alguma tendência a subestimar a insolação medida (em torno de 10% em média para valores elevados de insolação).

CONCLUSÕES

A insolação diária (medida em horas) pode ser monitorada a partir de imagens de satélite geoestacionário, sendo compatível com a informação fornecida por heliógrafo. A precisão na escala de um dia é da ordem de 10%. Estimativas mais precisas de desvio e dispersão estão em andamento. Os resultados sugerem a aplicação operacional do método, que oferece uma resolução espacial melhor que 10 km.

Agradecimentos. Às Estações Meteorológicas do IAG-USP e da UFCE, pela gentileza do fornecimento de dados heliográficos locais.

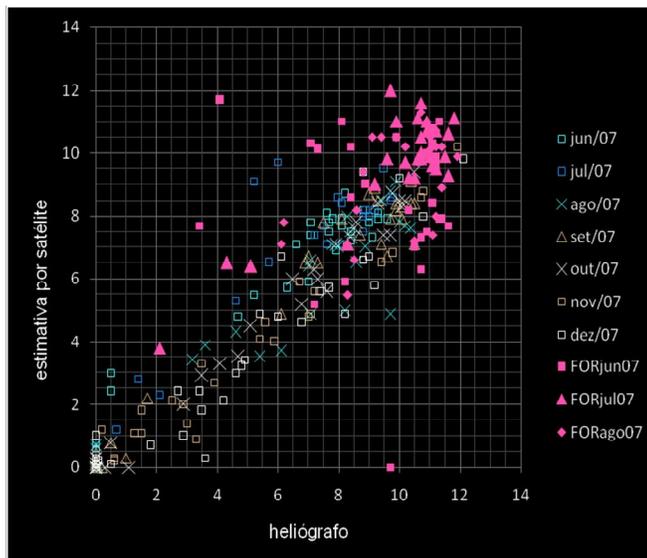


Figura 3. Comparação da estimativa de insolação com dados de heliógrafo da estação do IAG-USP (Parque do Estado, São Paulo), e da Universidade Federal do Ceará (Campus do PICI, Fortaleza, dados indicados em verde).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ceballos, J.C., G.B.A. Moura, V.F. Bezerra, J.d'A.A. Farias. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasil. de Meteor.** V7, 563-581, 1992.
- Ceballos, J.C., M.J. Bottino, J.M. Souza. 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.
- Grossi Gallegos, H., R. Righini. **Atlas de energia solar de la República Argentina.** SECYT Dirección Nacional de Programas y Proyectos Especiales/Universidad Nacional de Luján, Argentina, 2007. 74 pp.
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia. **Irradiação solar do Brasil.** INMET Instituto Nacional de Meteorologia / LABSOLAR Laboratório de Energia Solar EMC-UFSC, 1998. 58 pp.
- Klering, E.V.; M.S. Custódio; D.C. Fontana; M.A. Berlato. Relação entre os perfis temporais de NDVI/MODIS da cultura do arroz irrigado, a insolação e o rendimento na região da Campanha do Rio Grande do Sul. Anais, **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, p. 249-254, 2007.
- Mandelli, F.; J. Tonietto. Uvas Viníferas para Processamento em Regiões de Clima Temperado. In: **Embrapa Uva e Vinho.** Sistema de produção, 4. Versão eletrônica julho 2003. Endereço <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Uva/UvasViniferasRegioesClimaTemperado/clima.htm>. Visitado em março 2008.
- Pereira, E.B., F.R. Martins, S.L. de Abreu, R. Rütther. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** INPE, São José dos Campos, 2006. 60 pp.
- Tiba, Ch. (coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres.** Ed. Universitária da UFPE, Recife, 2000. 111 pp.

Endereços internet

INMET: acesso a estações automáticas. <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>

CPTEC/Satélites/Radiação Solar e Terrestre. <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/> Nesta página, podem ser obtidas séries históricas do modelo GL

CPTEC. Dados de Radiação solar. http://satelite.cptec.inpe.br/PCD/historico/consulta_radsol.jsp

CPTEC/Satélites/Classificação de nuvens. <http://sigma.cptec.inpe.br/nuvens/>