

# IMPLEMENTAÇÃO DE UM MÉTODO DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE

Eduardo Jorge de Brito Bastos<sup>1</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>2</sup>  
Ana Silívia Martins Serra do Amaral<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba  
Caixa Postal 518, 58109-980, Campina Grande, Pb.  
eduardo@lapim.dca.ufpb.br

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515, 12201-970, São José dos Campos, SP.  
{bete, anasil}@met.inpe.br

**Abstract:** A physically based model is used to derive solar radiation flux at the Earth's surface and the surface/cloud albedo from Meteosat-5 satellite measurements in the 0.4 - 1.1  $\mu\text{m}$  wavelength range. The model considers clear and cloudy conditions. The model takes into account Rayleigh scattering and water vapor absorption in the wavelength intervals 0.3 - 1.1  $\mu\text{m}$  and 1.1 - 2.8  $\mu\text{m}$  respectively. It is tested at DMS/INPE using the UNIX operational system. The results for Paraíba state are printed in the form of diagrams.

**Keywords:** Implementação, Modelo, Radiação Solar, Albedo

## 1 Introdução

O monitoramento da radiação solar na superfície terrestre é extremamente importante, pois ela é a fonte primordial dos processos meteorológicos, é responsável pela manutenção de quase todos os processos naturais terrestres e é de grande utilidade para a agricultura. Mesmo que exista uma rede de instrumentos (piranômetros) para medir radiação solar na superfície, percebe-se que este não é suficiente para determinadas aplicações atmosféricas terrestres. Para avaliar variações espaciais e temporais com detalhamento, as imagens de satélite podem dar uma cobertura global e regional com rapidez, boa precisão e custo moderado.

Em anos recentes, vários autores têm investigado a possibilidade do uso de dados obtidos por satélites geoestacionários para estimar a radiação solar na superfície da Terra. A aplicação desses métodos é viável no Brasil, desde que exista a tecnologia necessária para captar e gravar imagens com resolução plena. Por exemplo, Moraes (1986) testou o método de Gautier et al. (1980) com base em imagens GOES captadas no INPE (estação de Cachoeira Paulista, SP). Mais recentemente, Stuhlmann et al. (1990) e Moura (1993) desenvolveram um método para monitoramento de radiação solar na superfície a partir de dados obtidos de imagens Meteosat. No Brasil existem instituições que captam e armazenam operacionalmente imagens do Meteosat-5 e do GOES-8 nos diversos canais. Uma dessas instituições é o INPE.

Devido a importância do assunto, foi implementada uma metodologia para estimar radiação solar na superfície que utiliza imagens de satélites geoestacionários meteorológicos. Neste trabalho foi

implementado um método simples, que trata de uma versão modificada do método de Gautier et al. (1980), adaptada para o uso de imagens do Meteosat-5, acatando-se algumas novas considerações apresentadas pelos autores, por Moraes (1986) e Moura (1992).

## 2 Modelo de estimativa de radiação solar na superfície

Consideram-se dois intervalos espectrais que compõem o espectro solar: 1) o intervalo espectral de 0,3 - 1,1  $\mu\text{m}$ , denominado VIS; e, 2) o intervalo espectral, 1,1 - 2,8  $\mu\text{m}$ , que é o complemento do intervalo 1 para radiação observada por um piranômetro. Note-se que a banda espectral VIS do Meteosat-5 corresponde ao intervalo de 0,4 - 1,1  $\mu\text{m}$ .

No intervalo 1 considera-se que não há absorção pelos gases atmosféricos, em particular pelo vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio, pois neste intervalo as bandas de absorção são relativamente fracas (Ceballos, 1986, Dedieu et al. 1987, Bastos, 1994). Sendo assim, sua influência foi desprezada, considerando-se a priori que os erros de estimativas da radiação solar na superfície são maiores. Nesta caso, aplica-se um modelo de dispersão. Por outro lado, para o intervalo do infravermelho próximo (intervalo 2) despreza-se o espalhamento atmosférico e considera-se apenas os processos de absorção pelo vapor d'água.

O modelo considera duas situações: uma de céu aberto e uma outra com nebulosidade (céu coberto), definidas a partir das imagens de satélite de acordo com "thresholds" pré-estabelecidos.

## 2.1 Atmosfera sem nuvens (céu aberto)

Irradiância detectada pelo sensor VIS do Meteosat-5 é dada por:

$$E(\text{sat}) = \text{### a count} = \{ \text{###} E_o(\text{sat}) + E_o(\text{sat})(1 - \text{###})(1 - \text{###}o) \text{Avis} \} \Phi \quad (2.1)$$

onde  $E_o(\text{sat}) = S_o \cos(Z_o)$  é a irradiância solar incidente no topo da atmosfera no intervalo espectral VIS do satélite ( $S_o$  é a Constante solar da banda VIS do satélite),  $\text{###}$  é a reflectância Rayleigh da atmosfera,  $\text{###}o = 0,0685$  é a reflectância atmosférica de radiação difusa proveniente da superfície (Paltridge e Platt, 1976),  $\text{Avis}$  é o albedo da superfície e  $\Phi$  é a função filtro média do canal. A reflectância Rayleigh varia em função do ângulo zenital do sol ( $Z_o$ ) e é parametrizada segundo Lacis e Hansen (1974). Tanto a reflectância Rayleigh como a radiação difusa são adaptadas para o intervalo espectral do satélite. Ainda, considera-se que o espalhamento atmosférico é isotrópico.

O albedo da superfície de contorno  $\text{Avis}$ , é determinado resolvendo a Equação 1 e utilizando os valores de "count" obtidos das imagens. A partir do cálculo do albedo, a irradiância global na superfície no intervalo espectral 1 é dada por:

$$E_g(1) = E_o (1 - \text{###}) (1 + \text{Avis } \text{###}o), \quad (2.2)$$

onde  $E_o = S_o \cos(Z_o)$  é a irradiância solar incidente no topo da atmosfera no intervalo 1. O termo  $1 + \text{Avis } \text{###}$  o introduz os efeitos das reflexões múltiplas entre o solo e a atmosfera. Dados os valores usuais de  $\text{Avis}$  e  $\text{###}o$ , seu efeito pode ser igualmente descrito por um fator  $(1 - \text{Avis } \text{###}o)$  no denominador.

A irradiância solar incidente na superfície no infravermelho próximo (intervalo 2), considerando-se apenas processos de absorção é dada por:

$$E_g(2) = \text{###}o (S_o(\text{iv}) - \text{ABSvp}) \quad (2.3)$$

onde  $S_o(\text{iv})$  é a Constante solar no intervalo do infravermelho solar (intervalo 3 ou intervalo IV) e  $\text{ABSvp}$  é o fluxo direcional absorvido pelo vapor d'água; a absorptância do vapor d'água é calculada segundo a parametrização proposta por Gautier et al. (1980).

A irradiância global incidente na superfície é dada pela soma das irradiâncias  $E_g(1)$  e  $E_g(2)$ , ou seja,

$$E_g = E_g(1) + E_g(2) \quad (2.4)$$

## 2.2 Atmosfera com nuvens (céu coberto)

O cálculo da radiação incidente na superfície numa atmosfera nublada é mais complexo que para uma atmosfera sem nuvens. Para avaliar os processos de

espalhamento e absorção com relação ao modelo com nuvens, o modelo Gautier tenta descrever o fluxo em posições acima e abaixo do nível das nuvens. O brilho da imagem indica a presença (ou ausência) de nuvens e ainda fornece informação qualitativa sobre a espessura delas. Nuvens estratiformes baixas e médias são as que mais atenuam a radiação solar incidente, dada a sua frequência espacial e temporal.

Para descrever as componentes da energia que chegam ao satélite em condições de nebulosidade, considera-se que 70% da água precipitável está concentrada abaixo da camada de nuvens e 30% acima dela. A partir desta suposição calcula-se a absorção do vapor d'água acima e abaixo da camada de nuvens. A absorção por nuvens está no máximo entre 20 - 40% do fluxo incidente (Reynolds et al., 1975). Como não se tem certeza sobre o tipo de nuvem, escolhe-se uma relação simples entre a absorção ( $a_n$ ) e o brilho da nuvem, considerando  $a_n$  nula quando não há nebulosidade, o que aumenta linearmente até um valor máximo  $a_n$  para céu coberto. O modelo da Gautier assume  $a_n = 20\%$  para céu completamente nublado.

Das hipóteses precedentes (aproximações), a irradiância detectada pelo sensor VIS do satélite é:

$$E(\text{vis}) = \Phi \{ \text{###} E_o(\text{sat}) + E_o(\text{sat})(1 - \text{###})(1 - \text{###}o) \text{Ant} + E_o(\text{sat}) (1 - \text{###}) (1 - \text{###}o) (1 - \text{Ant}) (1 - \text{Anb}) \text{Avis} \} \quad (2.5)$$

onde  $\text{Anb}$  é o albedo da base das nuvens. Para efeitos de simplificação  $\text{Anb} = \text{Ant} = \text{An}$ .

Os três termos da Equação 2.5 representam i) energia espalhada pela atmosfera na direção do satélite; ii) energia refletida pelas nuvens e atenuada pela atmosfera na direção do satélite; e, iii) energia refletida pelo solo que é atenuada pela atmosfera - nuvens - atmosfera na direção do satélite. É notório que, havendo uma superfície sob as nuvens com albedo baixo, o terceiro termo da Equação 2.5 pode ser considerado nulo (desprezível). O efeito de nuvens tênues é comparável àquele de solo com albedo baixo, mas pode chegar a ser significativo para camadas de nuvens sobre superfície com albedo alto.

Partindo da radiação medida pelo satélite e da determinação do albedo da superfície, a Equação 2.5 permite calcular o albedo da camada de nuvens desprezando-se o seu último termo. A partir da obtenção desses dados, a irradiância na superfície no intervalo espectral 1 é dada por:

$$E_g(1) = E_o (1 - \text{###}) (1 - \text{An}) \quad (2.6)$$

Observe que neste caso, o termo  $(1 - \text{Avis } \text{An})$  é desprezado na Equação (2.5).

A irradiância solar incidente na superfície no infravermelho próximo (intervalo 2), considerando-se apenas processos de absorção pelas nuvens (ABS<sub>n</sub>) e pelo vapor d'água (ABS<sub>vp</sub>), é dada por:

$$Eg(2) = \text{###}o [So(iv) - ABS_n - ABS_{vp}]. \quad (2.7)$$

A irradiância solar incidente na superfície é dada pela soma das irradiâncias Eg(1) e Eg(2), como na Equação 2.5. O limiar de nuvem obedece os mesmos critérios apresentados anteriormente.

### 3 Implementação do modelo

A área de estudo é o continente sul-americano, com ênfase no Brasil. Todavia, neste trabalho foram apenas utilizadas imagens setorizadas do Estado da Paraíba. As imagens são do canal visível (VIS) do satélite Meteosat-5. Além disso, foram utilizados dados de água precipitável característica Estado da Paraíba

O modelo foi implementado em ambiente UNIX, na Divisão de Meteorologia por Satélites (DMS) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujo objetivo é fornecer estimativas de radiação solar na superfície para o projeto de monitoramento de água no solo da Divisão de Ciências Atmosféricas (DCM) do INPE.

A partir das imagens Meteosat-5 foram obtidos dados referentes ao dia, mês e ano, definidos os "pixels" de céu aberto e céu nublado através de um "threshold" pré-estabelecido. Além disso, dados de nível de cinza (count) são armazenados para determinação da irradiância detectada pelo satélite. A implementação segue o fluxograma de execução apresentado na Figura 3.1.

### 4 Resultados e conclusões

São apresentados campos de radiação global e albedo de superfície/nuvens para o Estado da Paraíba. A visualização dos campos foi obtida utilizando o GRADS, cuja interpolação é feita pelo método de análise objetiva - rotina OACRES.

Como conclusão podemos enfatizar a importância de trabalhos desta natureza, para diversas aplicações, e em particular para monitoramento de água no solo. Finalmente é notório que os resultados apresentados são consistentes com os padrões de radiação global para a

Paraíba, cujos resultados do modelos foram previamente validados por Moura (1993). A priori aceita-se a precisão obtida pelo modelo. No futuro, serão implementadas modificações físicas que necessitarão de melhor validação com a verdade terrestre.

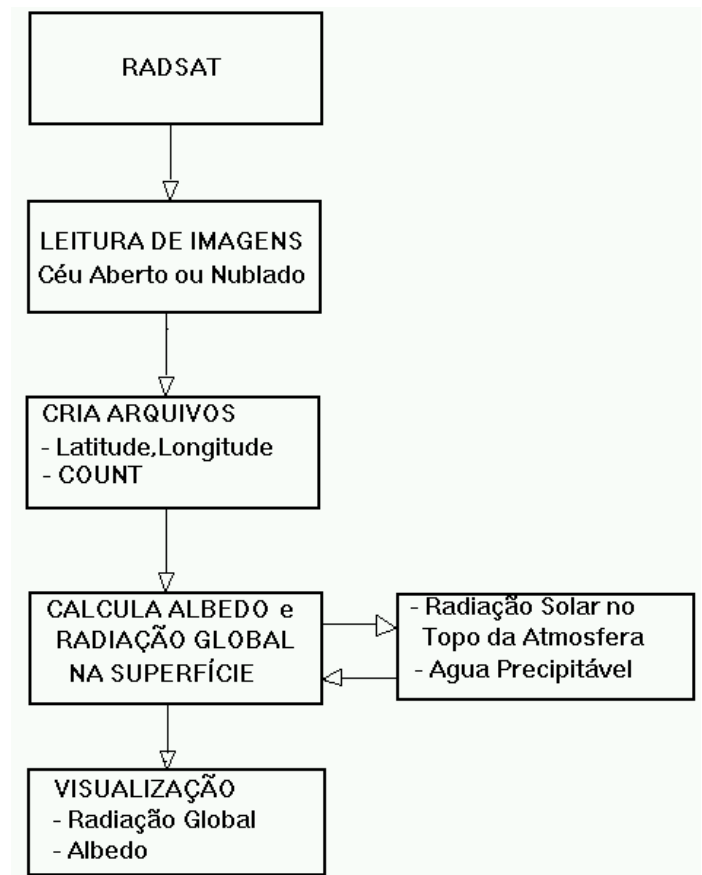


Fig. 3.1 Fluxograma de execução do Programa RADSAT

## RADIACAO GLOBAL

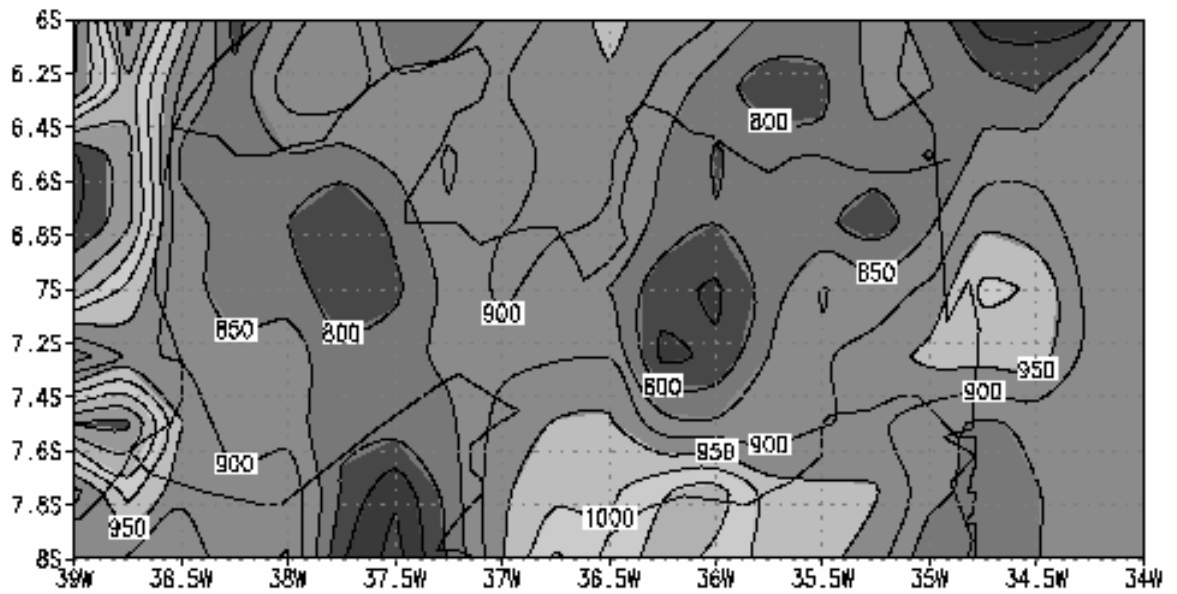


Fig. 4.1 Radiação global na superfície estimada a partir de imagens Meteosat-5 das 11:00UTC do dia 03/11/95.

## ALBEDO

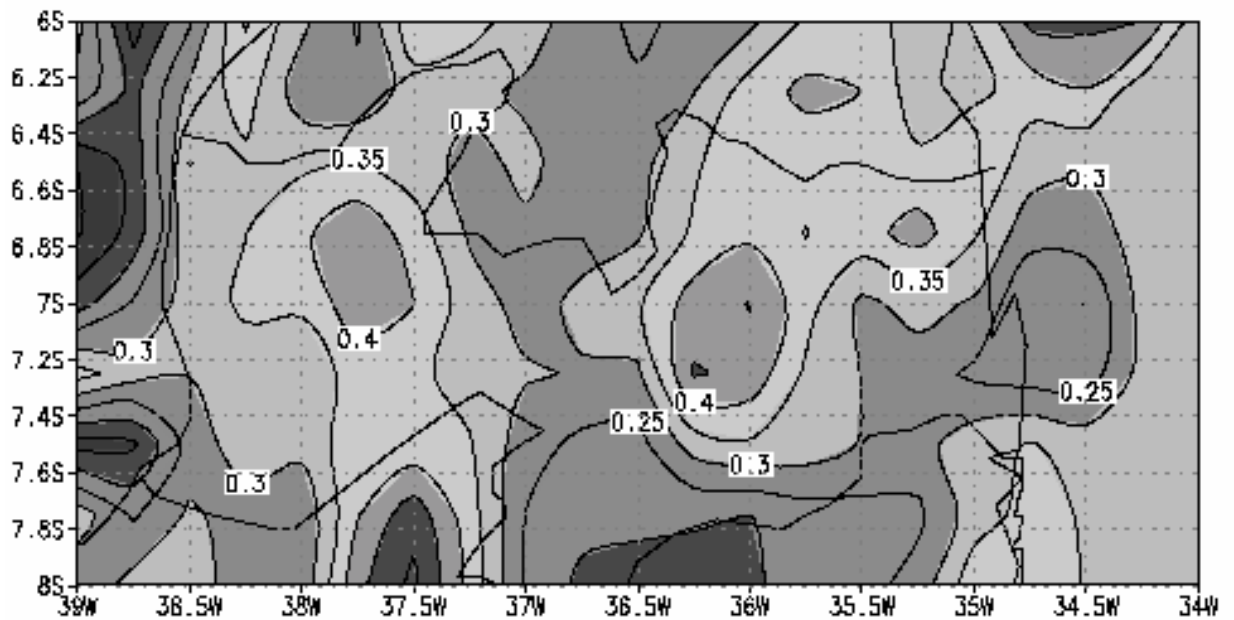


Fig. 4.2 Albedo (superfície e nuvens) estimado a partir de imagens Meteosat-5 das 11:00UTC do dia 03/11/95.

## 5 Referências

- Bastos, E.J.B. Modelagem de radiancias emergentes do sistema terra-atmosfera para calibração de imageadores no visível (Tese de Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994. 180p. (INPE....)
- Ceballos, J.C. Um modelo estocástico de propagação da radiação solar na atmosfera. (Tese de Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986. 368p.
- Coulson, K.L. *Polarization and intensity of light in the atmosphere*. A. Deepak Publishing. Hampton, Virginia, 1988. 596p.
- Dedieu, G.; Deschamps, P.Y.; Kerr, Y.H. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the earth and surface albedo using a physical model applied to Meteosat data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26(1):79-87, 1987.
- Gautier, C.; Diak, G.R.; Mase, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 19(8):1005-1012, 1980.
- Lacis, A.A.; Hansen, J.E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 21(1):118-122, 1974.
- Liou, K.N. *An introduction to atmospheric radiation*. New York, NY, Academic Press, 1980. 292p.
- McCartney, E.J. *Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles*. New York, NY, John Wiley, 1976. 407p.
- McClatchey, R.A.; Fenn, R.W.; Selby, J.E.A.; Volz, F.E.; Garing, J.S. Optical properties of the atmosphere. Air Force Cambridge Research Laboratory, *Environment Research Paper n<sup>o</sup> 441*, 1972.
- Moraes, E.C. *Comparação entre métodos de estimativa da radiação solar: satélite e convencional*. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986. 110p. (INPE-4025-TDL/242).
- Moura, G.B.A. *Estimativa de radiação solar na Paraíba mediante satélite Meteosat: testes de dois modelos usuais*. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992. 88p.
- Paltridge, G.W. Direct measurement of water vapor absorption in the free atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(1):156-160, 1972.
- Paltridge,
- Reynolds, D.W.; Vonder Haar, T.H.V.; Stephens, K.C. The effect of solar radiation absorption in the tropical troposphere. *Journal of Applied Meteorology*, 14(4):422-444, 1975.
- Robinson, M. *Solar radiation*. New York, NY. Elsevier, 1966. 247p.
- Stuhlmann, R.; Rieland, M.; Rascke, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 29(7):586-602, 1990.
- Yamamoto, G. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19(2):182-188, 1962.