

AFERIÇÃO DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITES

Elisabete Caria Moraes
Fausto Carlos de Almeida
Instituto de Pesquisas Espaciais
Ministério da Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

O aprimoramento das técnicas de extração de informações meteorológicas utilizando satélites meteorológicos, aliado à escassez de estações meteorológicas em grande parte do País, tem motivado o crescente interesse no desenvolvimento destas técnicas. Em particular, o problema de estimativa da radiação solar incidente à superfície tem sido estudado utilizando-se a imagem do canal visível do satélite geostacionário GOES. Neste trabalho, a partir de um experimento de campo (São José dos Campos abril-maio de 1985) foram realizadas comparações entre estimativas instantâneas e integradas (diárias), obtidas por satélite; piranômetro; observações de brilho solar e modelos convencionais baseados em parâmetros meteorológicos obtidos em superfície. Levando em consideração a resolução espacial e temporal aliada à cobertura geográfica fornecida pelo satélite, e o erro (14% para céu claro e cirrus e 35% para céu misto) encontrado neste trabalho, conclui-se que o método indireto via satélite é o mais prático. Além disso, testes realizados, indicaram que esta estimativa pode ser melhorada com estudos sobre a atenuação, devido ao espalhamento por aerossóis, interações entre radiação e nuvens.

ABSTRACT

The recent improved results shown by meteorological satellites data extraction techniques, together with the existing very sparse basic meteorological network in Brazil, has motivated a greater interest in the development of these techniques. In particular, the problem of solar radiation incident on the earth's surface has been studied using the GOES satellite visible channel imagery. In this study, based on a field experiment (São José dos Campos, April-May, 1985); comparisons among instantaneous and integrated (daily) estimations, obtained by satellite, piranometer, sunshine observations and conventional models (based on surface meteorological data) were done. The results showed that the satellite estimations, taking into consideration its temporal and spatial resolutions, error (14% for clear skies or cirrus cover and 35% for cloudy skies), and geographical coverage; it is the most practical of all. The study also indicates that a better understanding of aerosol scattering and cloud radiation interactions will improve the accuracy of the satellite estimates.

1 - INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente no sistema terra-atmosfera é responsável pela manutenção da maioria dos processos naturais, existentes no planeta, sendo portanto, essencial aos seres vivos. O conhecimento da radiação solar com melhor resolução espacial e temporal, possibilitará o aprimoramento de estudos em áreas como: agricultura; armazenamento de energia da atmosfera; superfície e oceano; fontes alternativas de energia e outras. Visando complementar as informações da escassa rede solarimétrica existente no Brasil (Instituto Nacional de Meteorologia-INEMET), têm sido direcionados esforços para de terminar a radiação solar com a utilização de satélites meteorológicos do tipo geostacionário.

As imagens digitais utilizadas neste trabalho são provenientes do satélite GOES-Oeste, que foi deslocado para leste temporariamente, até o lançamento do satélite que substituirá o GOES-Leste (avariado).

O satélite GOES possui resolução espacial no ponto sub-satélite, de aproximadamente 7 x 3km no canal infra-vermelho e de aproximadamente 0,8 x 0,8km no canal visível (Hambrick e Phillips, 1980)

A utilização do canal visível do satélite geostacionário possibilita a análise da radiação solar incidente à superfície terrestre de uma maneira mais abrangente (cobertura geográfica). Este canal observa as interações da radiação solar com o sistema terra-atmosfera como um todo, fornecendo dados de distribuição de cobertura de nuvens. Portanto, uma metodologia que utilizasse imagens de satélite possibilitaria um estudo mais econômico e centralizado da radiação solar em todo território nacional.

O principal objetivo deste trabalho consiste em comparar a estimativa da radiação solar incidente à superfície terrestre, obtida com a utilização de imagens do canal visível do saté

lite geostacionário GOES, com os dados de verdade terrestre e com a radiação solar calculada através de metodologias empíricas.

2 - METODOLOGIAS

Estudos de métodos que estimam a radiação solar utilizando imagens de satélites geostacionários têm sido desenvolvidos e implementados basicamente com dois enfoques: físico e estatístico.

Neste estudo, é utilizado o modelo físico de Gautier et alii (1980), que considera os efeitos de absorção do vapor d'água e o espalhamento como sendo isotrópico e a absorção e espalhamento por nuvens. Este modelo físico já encontra-se implementado no INPE (Arai e Almeida, 1982 e 1984). Na comparação dos dados obtidos por piranômetro e por satélite é utilizado o algoritmo de navegação de imagens de satélites desenvolvido por Hambrick e Phillips (1980) e implementado no INPE por Conforte et alii (1983).

Este modelo, classificado como método indireto via satélite foi comparado com os aqui chamados métodos direto (medidas de piranômetros); semi-direto, que utiliza horas de brilho solar (Bennett, 1964) e indireto convencional, que utiliza medidas meteorológicas convencionais (Brooks, 1959; Archer, 1964 e Schulge, 1976).

3 - DADOS

Os dados utilizados no presente trabalho foram coletados no experimento realizado entre 27 de abril e 09 de maio de 1985 em São José dos Campos, SP, Brasil (Lat. $23^{\circ}14'S$; Long. $45^{\circ}51'W$; Alt. 644m).

Neste experimento, utilizando-se um sistema automático de aquisição de dados, foram coletados a cada minuto, com piranômetros especiais Eppley, medidas de radiação solar global (0,28 a $2,8 \mu m$), difusa e em duas faixas dentro do espectro visível (0,495 a $2,8 \mu m$ e 0,71 a $2,8 \mu m$). Esta diferença (espectral) situa-se próximo à faixa do canal visível do satélite GOES (0,65 a $0,75 \mu m$). Estes dados e os de pressão atmosférica local foram registrados em disco flexível. Durante este mesmo período, foram feitas gravações de imagens de satélite a cada 30 minutos além de observações de coberturas de nuvens, direção e intensidade do vento, presença de material particulado e umidade a superfície.

4 - RESULTADOS

Foram realizadas comparações de medidas instantâneas da radiação solar (global) estimada através dos métodos indiretos em relação aos dados de verdade terrestre (piranômetros). Esta comparação é mostrada na Figura 1.

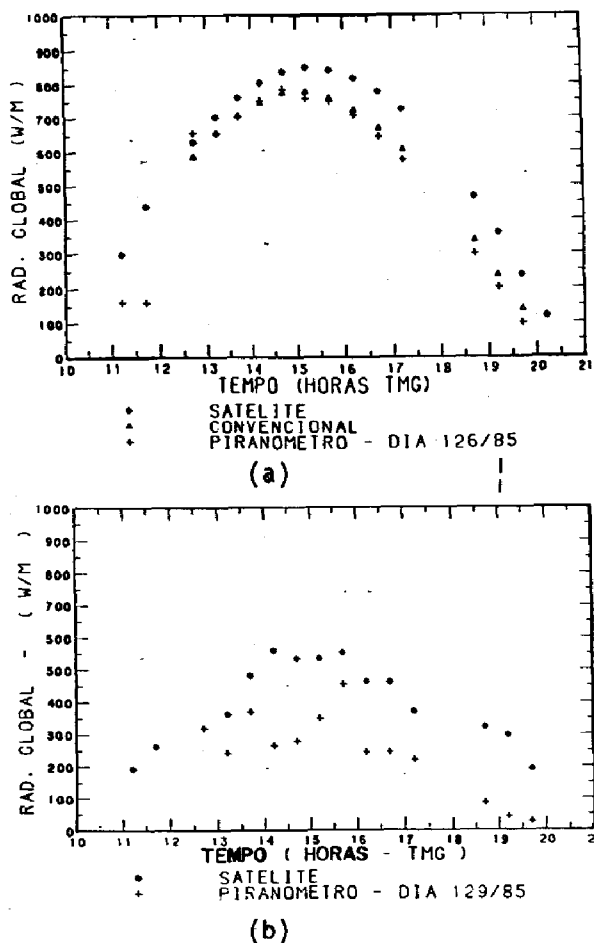


Fig. 1 - Radiação solar instantânea incidente à superfície terrestre registrada por piranômetro e estimada através dos métodos indiretos convencionais e via satélite, a) céu limpo praticamente durante todo o dia; b) céu com nuvens durante todo o dia.

No método indireto convencional a radiação solar global foi obtida através do modelo de Brooks (1959) e de Archer (1964), que estimam a radiação solar direta e difusa, respectivamente. O modelo de Brooks (1959) é válido somente para situação de céu limpo e suas variáveis são: conteúdo de água precipitável; pressão na superfície e parâmetro de poeira. A variável conteúdo d'água precipitável é obtida através da fórmulação de Smith (1966), adaptada ao Hemisfério Sul por Viswanadham (1981). Esta formulação possui como variável de entrada a temperatura do ponto de orvalho na superfície. A variável "parâmetro de poeira" é inferida a partir da equação de Brooks (1959) e dos dados de superfície. Na análise das variáveis deste modelo, o parâmetro de poeira, mostrou ser o termo mais influente na estimativa da radiação solar. O modelo de Archer (1964), também restrito à situação de céu limpo, possui como variável, o ângulo solar zenital e é dependente da radiação solar difusa média ao meio dia local.

Como pode ser visto na Figura 1a, a radiação solar global (radiação direta + radiação difusa) calculada pelo método indireto convencional (indicado por Δ) apresentou ótima concordância (coeficiente de correlação (r) de 0,98) com o método direto (registro de piranômetro). Este resultado se deve ao fato de que no modelo de Brooks (1959), que estima a radiação solar direta, é feito um ajuste do parâmetro de poeira aos dados de superfície. Segundo Schulze (1976), o parâmetro de poeira é dependente do estado local da atmosfera e em seus estudos, o máximo valor determinado foi 3, que difere do valor de 6,1 obtido para São José dos Campos. O que demonstra a importância da estimativa do fator de poeira para se alcançar bons resultados. A radiação solar difusa apresentou alto erro ($r = 0,50$), mas ela não é muito influente no cálculo da radiação solar global por representar apenas 15% desta.

Na análise da radiação instantânea do método indireto via satélite foi verificada uma superestimativa da radiação solar global (Figura 1), com os maiores erros ocorrendo em situações com nuvens (Figura 1b), principalmente quando a cobertura de nuvens possui características óticas diferentes na trajetória da radiação solar incidente no piranômetro e na trajetória da radiação refletida para satélite (cones de observação). Nossos resultados mostraram como Stowe e Taylor (1984) verificaram, que é inviável a estimativa da radiação solar por satélite para ângulos zenitais maiores do que 60 graus. Além disso, foi observada a ocorrência de maiores erros no período da tarde (Figura 2).

Os erros maiores na parte da tarde podem ter ocorrido devido ao aumento da concentração de aerossóis durante o dia, causado pela intensa atividade industrial de São José dos Campos, acarretando um aumento na atenuação da radiação solar. Este aumento na concentração de aerossóis não é levado em consideração no modelo físico (Gautier et alii, 1980). Nele, se utiliza o coeficiente de espalhamento determinado por Paltridge (1973), que é função somente do ângulo solar zenital (caminho ótico), consequentemente o coeficiente é simétrico em relação ao meio-dia. O aumento de concentração de aerossóis na atmosfera é confirmado no método indireto convencional, pois ao analisar a variação do "parâmetro de poeira" no decorrer do dia, foi observado a ocorrência dos maiores valores à tarde.

A superestimativa da radiação solar global no método indireto via satélite, na realidade é menor, pois a determinação do fator de conversão para a transformação da faixa espectral do canal visível do satélite GOES (0,55 a 0,75 μm), para a faixa global do piranômetro (0,28 a 2,8 μm) foi obtida pela relação calculada para o topo da atmosfera. Esta determinação do fator de conversão implica numa superestimativa, pois não são considerados os fatores de atenuação atmosférica que ocorrem fora da banda do canal visível do satélite.

Na análise da radiação solar global diária

estimada pelo método semi-direto, foi pressuposto que os coeficientes mensais do modelo de Bennett (1965), cujas variáveis são horas de brilho solar e altitude, fossem representativas dos dias estudados. Com esta suposição calculou-se o total diário da radiação solar global e comparou-se com valores. Esta comparação pode ser vista na Tabela 1, onde se verifica que o erro relativo apresentou uma variância de 13,30, ao se excluir os dias julianos 118 e 120. Nestes dois dias, que apresentaram erros relativos altos, observou-se que a cobertura de nuvens era variável ao longo do dia, com períodos encobertos próximos ao meio dia local. Isto sugere que na análise da radiação solar global diária, com a utilização do método semi-direto, sejam atribuídos pesos aos diversos horários durante o dia.

TABELA 1

COMPARAÇÃO ENTRE TOTAIS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL OBTIDAS ATRAVÉS DO MÉTODO SEMI-DIRETO E REGISTRADO POR PIRANÔMETRO

Dia Juliano	Semi-direto (SD) KJm ² dia ⁻¹	Registrado (R) KJm ² dia ⁻¹	Erro Relativo (SD R) / R (%)
118*	244,42	152,51	60,26
119	228,42	247,25	- 7,62
120*	176,15	133,75	31,70
124	198,00	197,18	0,42
125	245,27	243,65	0,66
126	274,76	286,80	- 4,20
127	275,20	279,88	- 1,67
129	94,17	103,37	- 8,90
Erro Médio Relativo = 3,91 s = 13,30			

* Eliminado no cálculo do erro relativo médio

Os cálculos dos totais diários para os métodos direto e indireto foram obtidos integrando-se em áreas parciais (método do trapézio) as estimativas instantâneas.

A radiação solar global obtida através do método indireto convencional apresentou pequenos erros (Tabela 2), devido ao ajuste do "parâmetro de poeira", como mencionado anteriormente.

Ao analisar o total integrado da radiação solar global, com a utilização do método indireto convencional, supondo que o valor do parâmetro de poeira para São José dos Campos fosse o valor máximo (3,0), obtido por Schulze (1976), foi verificado um erro relativo de 19,92% (variância de 14,48). Este erro foi maior do que o obtido quando se utilizou o parâmetro de poeira determinado para esta região (6,1), o que indica que o valor aqui calculado é representativo desta região e da época em questão.

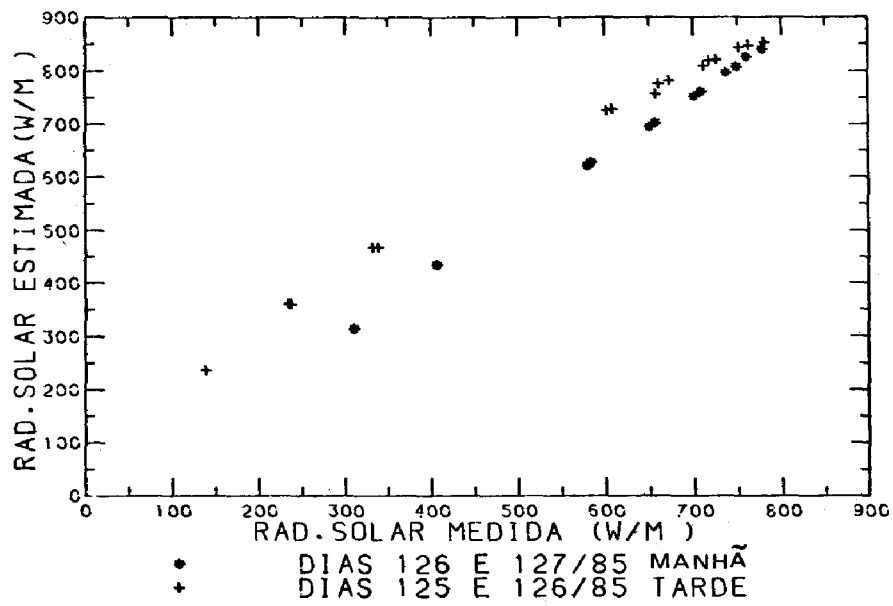


Fig. 2 - Relação entre a radiação solar global estimativa através do método indireto via satélite e a registrada por piranômetro.

TABELA 2

COMPARAÇÃO ENTRE TOTAIS DE RADIAÇÃO GLOBAL
OBTIDAS ATRAVÉS DO MÉTODO INDIRETO CONVEN
CIONAL E REGISTRADOS POR PIRANÔMETRO

Dia	GLOBAL		
	Estimada KJm ⁻² dia ⁻¹	Registrada KJm ⁻² dia ⁻¹	Erro Relativo (E-R)/R (%)
114	253,98	262,19	- 3,13
117	97,07	103,47	- 6,19
118	101,26	101,76	- 0,49
119	113,98	117,30	- 2,83
124	163,48	177,07	- 7,68
125	148,41	146,23	1,49
126	268,79	265,87	1,10
127	258,33	259,58	- 0,48
128	156,15	153,78	1,54
Erro Relativo Médio = 2,77 σ = 6,54			

A Tabela 3 apresenta a integração diária das estimativas instantâneas da radiação solar na faixa do canal visível obtida pelo método indireto via satélite, considerando somente as estimativas com ângulos zenitais menores que 60 graus. Verificou-se que para situações de céu limpo ou com cirrus tênues (dias julianos 118, 126, 127 e 128) o erro relativo médio foi de 14%, enquanto que para situações com cobertura variável o erro aumentou para 35%. Os altos erros em dias com nuvens é devido principalmente a existência de coberturas distintas nos cones de observação.

TABELA 3

COMPARAÇÃO ENTRE TOTAIS DE RADIAÇÃO GLOBAL
OBTIDA ATRAVÉS DO MÉTODO INDIRETO VIA SATE
LITE E REGISTRADA POR PIRANÔMETRO

Dia Juliano	Indireto Via Satélite (IS)	Registrada (R)	Erro Relativo (IS-R)/R (%)
118	16,356	14,466	13,06
119**	49,733	41,809	18,95
120*	4,027	2,902	38,77
124**	46,871	36,420	28,70
125**	46,540	33,524	38,83
126	53,469	47,007	13,75
127	52,311	46,495	12,51
128	29,297	25,344	15,60
129*	25,492	17,238	47,88

* situação com cobertura de nuvens durante todo o dia.
** alguns períodos com cobertura de nuvens.

Como explicado para o caso da Figura 2, na realidade os erros encontrados na Tabela 3 são menores. Esta diferença é devido a subestimação da radiação solar causada pela conversão da faixa global para a faixa do canal visível do satélite GOES.

O erro introduzido, ao se fazer este tipo de conversão para o topo da atmosfera, foi analisado com um conjunto de dados existentes para Balboa, Zona do Canal do Panamá entre abril e maio de 1976. Nesta análise, verificou-se que este erro era da ordem de 5% para situações de céu limpo.

Ao analisar as variáveis no método indireto via satélite, identificou-se o coeficiente de reflexão direta como o termo mais influente na estimativa da radiação solar para situações de céu limpo. Testes com os dias julianos 125 (parte da tarde), 126 (após às 10:00 HL) e 127 (parte da manhã) mostraram melhores estimativas da radiação solar com alterações nestes coeficientes. Os resultados desta correção, como também as correções de 5% nos dados de verdade terrestre podem ser vistos na Tabela 4.

TABELA 4

TOTAIS INTEGRADOS PARA SITUAÇÃO DE CÉU LIMPO
OBTIDOS ATRAVÉS DE ANÁLISE COM O MÉTODO INDIRETO VIA SATELITE (SEM E COM ALTERAÇÕES)

Dia Juliano	ERRO RELATIVO DAS ANÁLISES		
	Original (%)	Com correção de 5% nos dados de superfície.(%)	Com correção no parâmetro (coeficiente de Reflexão Direta (α = 0.03)) (%)
125	18.29	12.66	14.11
126	18.76	13.11	15.03
127	11.36	6.06	7.46

A intercomparação da radiação solar diária estimada através dos três métodos: semi-direto; indireto convencional e indireto via satélite, em relação ao método direto encontra-se apresentada na Figura 3. Na integração foram analisados somente os períodos sem nuvens. Através da Figura 3, observa-se que: o método indireto convencional apresentou o menor erro, isto devido ao ajuste do parâmetro de poeira; o método semi-direto apresentou alta variância, portanto, não é confiável para estimativas diárias; e o método indireto via satélite superestimou os resultados em torno de 14%.

Uma análise mais completa dos resultados encontra-se no trabalho de Moraes (1986) e Moraes e Almeida (1986).

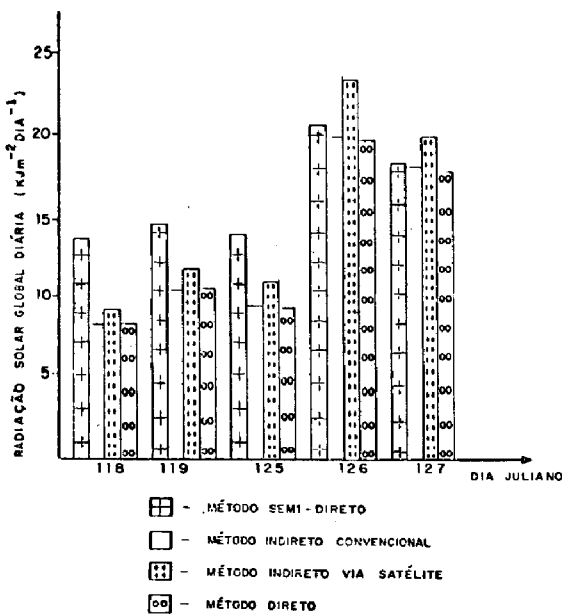


Fig. 3 - Radiação solar global integrada durante o dia (áreas parciais)

5 - CONCLUSÃO

Dos três métodos analisados verificou-se que o método semi-direto é o menos confiável, talvez devido a não consideração do período do dia em que ocorre a cobertura do sol.

O método indireto convencional, válido somente para céu limpo, apresentou os melhores resultados, isto por ser uma de suas variáveis (parâmetro de poeira) inferida a partir dos próprios dados de radiação solar incidente à superfície terrestre. A obtenção, de forma indireta do parâmetro de poeira, limita a aplicação deste método a regiões onde há coletas regulares durante o dia dos dados necessários ao modelo.

O método indireto via satélite superestimou os resultados em aproximadamente 14%. Como discutido anteriormente, este erro pode ser diminuído se for feita uma correção quando da conversão da faixa de sensibilidade do satélite para a faixa global, obtida no topo da atmosfera.

O método indireto via satélite também pode ser aprimorado determinando-se os valores do coeficiente de reflexão direta mais representativos para esta região em estudo. No trabalho de Gautier et alii (1980) são utilizados os valores destes coeficientes definidos por Paltridge (1973). Estes coeficientes foram obtidos para o oceano rugoso, e segundo alguns testes realizados neste trabalho, não são os ideais para regiões continentais.

Na análise das variáveis dos métodos indiretos foi verificado que, para situação de céu limpo, a concentração de aerossóis e gases são os fatores mais influentes na atenuação atmosférica. A variabilidade destes parâmetros durante o dia influi na estimativa da

radiação solar obtida por satélite e não foi levado em consideração neste método.

Comprovou-se ainda a inviabilidade da utilização do método indireto via satélite na estimativa da radiação solar para ângulos zenitais maiores que 60 graus.

Este estudo indicou que o método indireto via satélite é mais eficiente na estimativa da radiação solar, tanto instantânea como diária, pois além da alta resolução espacial e temporal possibilitou a análise da radiação solar sobre qualquer condição de cobertura de céu.

O desenvolvimento e aprimoramento desta técnica de estimar a radiação solar incidente à superfície terrestre, utilizando satélite geostacionário, possibilitará um reestudo sobre a manutenção e expansão da atual rede solarimétrica do País.

6 - REFERÊNCIAS

- ARAI, N.; ALMEIDA, F. C. *Estimativa da radiação solar que chega à superfície terrestre utilizando satélites meteorológicos*. São José dos Campos, INPE, 1982 (INPE-2567-PRE/215).
- *Estimativa da radiação solar instantânea por satélite para céu claro ou encoberto*. São José dos Campos, INPE, 1984 (INPE-3390-PRE/661).
- BENNETT, I. Monthly maps of mean daily insolation for the United States. *Solar Energy*, 9 (3): 145-152, March, 1965.
- BROOKS, F. A. An introduction to physical microclimatology. Davis, University of California, 1959.
- CONFORTE, J. C.; ARAI, N. ALMEIDA, F. C. *Navegação das imagens dos satélites meteorológicos geoestacionários*. São José dos Campos, INPE, 1983 (INPE-2772-RPE/435).
- DIAK, G. R.; GAUTIER, C. Improvements to a simple model for estimating insolation from GOES data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(3): 505-508, March, 1983.
- GAUTIER, C.; DIAK, G. R.; MASSE, 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, Aug., 1980.
- MORAES, E. C. *Estimativa de radiação solar incidente à superfície terrestre: comparação de métodos convencionais e por satélite*. Dissertação de mestrado. São José dos Campos, INPE, 1986.
- MORAES, E. C.; ALMEIDA, F. C. *Estimativa de radiação solar (satélite e convencional) para abril e maio de 1986*. São José dos Campos, INPE, 1986 (no prelo).
- PALTRIDGE, G. W. Direct measurement of water

vapor absorption of solar radiation in the free atmosphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 30(1):156-160, Jan, 1973.

SCHULZE, R. E. A physically based method of estimating the total solar radiation from suncards. *Agricultural Meteorology*, 16(2):85-101, Feb., 1976.

SMITH, W. L. Note on the relationship between total precipitable water and surface dew point. *Journal of the Applied Meteorology*, 5(5):726-727, May, 1966.

TAYLOR, V. R.; STOWE, L. L. Reflectance characteristics of uniform earth and cloud surfaces derived from NIMBUS-7 ERB. *Journal Geophysical Research*, 89(D4):4987-4996, 1984.

VISWANADHAM, Y. The relationship between total precipitable water and surface dew point. *Journal of the Applied Meteorology*, 20(1): 1-8. Jan., 1981.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a colaboração dos Srs. Jorge Luiz Martins Nogueira, Julio Lucatto, Paulo Rogério de Aquino Arlindo, pela montagem e coleta dos dados. Agradecemos também as sugestões e cuidadosa revisão do texto pelo Sr. Nelson Arai e datilografia pela Sra. Sueli A. F. V. Camargo Pinto.