

ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE:
PROCESSAMENTO DA SÉRIE TEMPORAL DE JANEIRO DE 1996 A SETEMBRO DE 2002 E
ABRIL E MAIO DE 2003

Marcus Jorge Bottino

bottino@cptec.inpe.br

Sylvio Villas Boas Neto

Sylvio_netol@hotmail.com

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

RESUMO

Este trabalho descreve a produção de uma estimativa de radiação solar da América do Sul no período de janeiro de 1996 a setembro de 2002 e dos meses de abril e maio de 2003, utilizando o modelo GL1.2 (Ceballos et al., 2004). O modelo é executado operacionalmente no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE, utilizando imagens do canal visível do satélite GOES-E. São apresentados os procedimentos utilizados para o processamento e uma análise preliminar dos resultados.

ABSTRACT

This work describes a production of a solar radiation estimate over South America during the period January 1996 until September 2002 and the months of April and May 2003, using the model GL1.2 (Ceballos et al., 2004). The model is run operationally at Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE, using images from visible channel of the GOES-E satellite. We present the procedures used for processing and a preliminary analysis of the results.

1. INTRODUÇÃO

É reconhecido o valor que tem a radiação solar para diversos fins, dentre eles os meteorológicos e de disponibilidade de energia. Os primeiros estudos sobre estimativa por satélite de radiação solar à superfície foram iniciadas na década de 1970. Um dos modelos mais referenciados é o de Gautier *et al.* (1980), e uma primeira referência no Brasil pode ser encontrada em Arai e Almeida (1982). Já na década de 1990, com a recepção operacional de imagens de satélites no Brasil, surgiram também os modelos que usam os dados dos satélites GOES ou Meteosat (Pereira *et al.*, 1996; Ceballos e Moura, 1997; INMET/LABSOLAR, 1998; Ceballos *et al.*, 2004). Atualmente, o CPTEC processa operacionalmente o modelo GL1.2 baseado em imagens GOES (Ceballos *et al.*, 2004). Os campos de irradiância média diária sobre a América do Sul são divulgados através do endereço <http://www.cptec.inpe.br/satélites>. Contudo, séries temporais de estimativa de radiação solar em escala continental são escassas. Alguns trabalhos são encontrados em Whitlock et al. (1995), para escala global com resolução

de 2,5°; sobre a América do Sul, utilizando imagens GOES de três em três horas em INMET/LABSOLAR (1998); e, por dados observacionais, em Tiba e Freidenreich (2002).

O modelo GL1.2 é executado operacionalmente desde setembro de 2002, tendo obtido estimativa de irradiância média diária a partir do satélite GOES-8 até março de 2003 e, pelo GOES-12, a partir de abril de 2003. O presente trabalho relaciona as seguintes atividades: 1) pesquisa e disponibilização dos arquivos de imagens do GOES sobre a América do Sul, nos cinco canais (mas apenas o canal 1 foi utilizado para executar o modelo); 2) execução do modelo para os períodos de janeiro de 1996 a setembro de 2002, e dos meses de abril de maio de 2003; 3) ordenação das imagens e saídas do modelo para o arquivamento em fita. Portanto, está disponível no CPTEC uma série de nove anos de estimativa de radiação solar por satélite.

As características e a fonte de recepção dos dados de satélite utilizados variaram durante o período considerado e encontram-se descritas na seção 2. A frequência dos dados processados e uma análise de coerência dos resultados do período de 1996 a 2004, que incluiu o processamento operacional nos últimos dois anos, são apresentadas na seção 3. Conclusões e agradecimentos encontram-se nas seções 4 e 5.

2. DADOS E PROCEDIMENTOS

O modelo GL1.2 utiliza a estimativa de irradiância média horária para processar arquivos de imagem com medidas do fator de refletância, acompanhados de arquivos de latitude e longitude. Os campos de estimativa do modelo são escritos em projeção regular latitude-longitude com resolução de 0,04° x 0,04°, entre as longitudes 100°W a 30°W e as latitudes 50°S e 20°N.

Durante o período de janeiro 1996 até setembro de 1997, foram utilizadas imagens binárias gravadas em count de 8 bits em projeção do satélite e em grade regular latitude-longitude, devendo, portanto, serem calibradas e navegadas. Para o período de outubro de 1997, em diante, os arquivos de imagens utilizados foram gravados por software específico (Terascan) incluído no sistema de recepção e ingestão de imagens, já com o fator de refletância e acompanhados dos arquivos de navegação. As imagens processadas até agosto de 2002 eram separadas em dois setores: *norte* e *sul* (acima e abaixo de 20°S, respectivamente), e, para os meses de abril e maio de 2003 (início operacional do GOES-12), consistiam em um único arquivo com os setores concatenados.

A estimativa da irradiância solar de uma imagem é efetuada pixel a pixel, e, posteriormente, é feita uma média com seus 8 pixels vizinhos para corresponder a uma média horária (maiores detalhes em Ceballos *et al.*, 2004). Cada pixel de imagem corresponde a uma área nominal 1 km x 1 km no ponto subsatélite para todo o período processado. Contudo, os arquivos foram gravados com uma amostragem de 1 a cada 4, a partir de outubro de 1997, e, de 1 a cada 12, no período anterior.

Diferenças na cobertura, na amostragem e na fonte das imagens definiram alguns aspectos e procedimentos dos dados gerados, conforme descrição a seguir.

2.1 - Período de Janeiro de 1996 até Setembro de 1997

Durante o período de janeiro a junho de 1996, os arquivos de imagens disponíveis eram de 512 x 512 pixels, cobrindo a América do Sul, entre as longitudes 82°W e 35°W e entre as

latitudes 45°S e 12°N, numa frequência de até meia hora. No período de julho a dezembro de 1996, os arquivos estavam com cobertura global, mas disponíveis de três em três horas e recortados para as mesmas dimensões do período anterior. No período de janeiro a setembro de 1997, os arquivos voltaram a ter a mesma configuração do primeiro período do ano de 1996. As tarefas de recorte e geração de arquivos de navegação foram realizadas por programas em Fortran utilizando uma subrotina denominada GeoPixel (METEO FRANCE) que relaciona latitude e longitude com linha e coluna da imagem em projeção satélite. A conversão dos valores de count em fator de refletância foram obtidos pela equação de calibração fornecida por Weinreb et al.(1997).

Devido à amostragem dos arquivos de imagem neste período (1 pixel a cada 12 km aproximadamente), os campos de estimativa do modelo foram produzidos num espaçamento de 0,12° em latitude e longitude.

2.2 – A Partir de Outubro de 1997

Neste período, as imagens gravadas tiveram a cobertura redefinida em três datas, sendo gradativamente aumentada. As áreas definidas por estes três períodos são descritas como se segue: 1) o setor *norte*, no período de outubro de 1997 até setembro de 2001, cobria os limites de 20°S a 18°N e de 90°W a 30°W, e, no setor *sul*, de 45°S a 20°S e de 85°W a 30°W; 2) de outubro de 2001 a março de 2003, os limites passaram a ser de 20°S a 21°N e de 93°W a 30°W para o setor *norte*, e de 48°S a 20°S e de 95°W a 30°W para o setor *sul*; 3) a partir de abril de 2003, um único arquivo cobre a área de 50°S a 21°N e de 110°W a 30°W.

A amostragem destes arquivos (1 pixel a cada 4 km aproximadamente) permitiu a estimativa do modelo com a resolução de 0,04° em latitude e longitude.

2.3 - Procedimentos

A execução do trabalho iniciou-se pelo levantamento das mídias que continham os arquivos de imagens. Em seguida foram criados scripts e programas que automatizaram a solicitação de leitura e disponibilização das imagens em diretórios temporários, gravados de forma não sistemática em termos de setores, datas e canais. Um outro script teve a função de organizar e renomear os arquivos de imagens na hierarquia de setor (ano, mês e canal) para que modelo GL1.2 pudesse processá-las de forma automática. Posteriormente, esses arquivos de imagens e as saídas do modelo foram arquivadas em fitas DLTs e CDs.

Um aspecto interessante e importante da implementação é o fato dos scripts e programas, assim como o modelo, terem sido montados de forma a suportarem mudanças de diretórios e máquinas sem que haja a necessidade de se modificar os códigos fonte dos mesmos, otimizando o trabalho.

3. RESULTADOS

3.1 - Frequência dos Dados Processados

A irradiância média diária é obtida pela integração das estimativas horárias ao longo do dia, portanto afetada pelo número de imagens disponíveis. O modelo exige um mínimo de quatro dados diários em cada local para esta estimativa. Foi processada uma média de 15 imagens por dia, havendo flutuações significativas em algumas datas. A Tabela 1 mostra o número de dias

processados por este trabalho e também operacionalmente, os quais também foram utilizados para uma análise preliminar.

Anos	Meses												Total
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1996	31	29	31	30	30	30	31	28	08	14	27	29	317
1997	20	15	31	30	31	30	31	31	23	19	28	31	320
1998	29	28	29	29	30	27	30	22	30	30	30	31	345
1999	31	28	31	24	31	30	27	30	26	31	27	23	339
2000	28	28	31	30	31	30	31	29	30	25	29	31	353
2001	31	28	31	30	18	30	30	31	28	31	30	31	349
2002	31	28	30	30	21	30	31	31	29	31	30	31	353
2003	29	28	31	30	31	27	30	30	27	29	29	25	346
2004	25	29	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	360
Total													3083

Tabela 1 - Número de dias processados.

3.2 - Análise Preliminar dos Resultados.

Para fins de otimização da análise dos resultados, os campos de irradiância média diária foram degradados da grade de 0,04° (0,12° de janeiro de 1996 até setembro de 1997) para uma média espacial de 0,4°. Foram analisados dois aspectos estatísticos:

1. Campos de anomalias anuais de radiação. Foi calculada a diferença da média anual com a média de todos os anos de 1996 a 2004. As flutuações regionais das anomalias não excedem valores de $\pm 25 \text{ W/m}^2$ (Figuras 1a a 1i), comparável com 10% da radiação média de todos os anos (Figura 1j). Não são observados desvios sistemáticos regionais sobre anos consecutivos, sugerindo que não há erros sistemáticos induzidos pelo modelo de estimativa. Relações destas flutuações com eventos climáticos significantes poderão ser posteriormente estudadas.
2. Uma análise das anomalias mensais foram calculadas por médias espaciais sobre os setores norte (15°S - 10°N e 78°W - 45°W), nordeste (15°S - 10° N e 45°W - 30°W), e sul-sudeste (45° S - 15°S e 78°W - 30°W) da América do Sul (Figuras 2a a 2m). De forma geral, as anomalias encontram-se dentro da faixa de $\pm 25 \text{ W/m}^2$. Nota-se que, nos meses de maio a setembro, verificam-se anomalias semelhantes para os três setores e uma tendência de anomalia positiva para o início e o fim do período estudado e negativa para o período intermediário. Espera-se uma tendência de anomalias positivas a partir de abril de 2003, devido ao efeito de degradação do sinal do satélite (menor reflectância, ocasionando uma maior estimativa da radiação), segundo mostrado por Ceballos e Bottino (2004). A Figura 2 sugere a existência de uma anomalia positiva crescente a partir de 2003, coerente com o previsto.

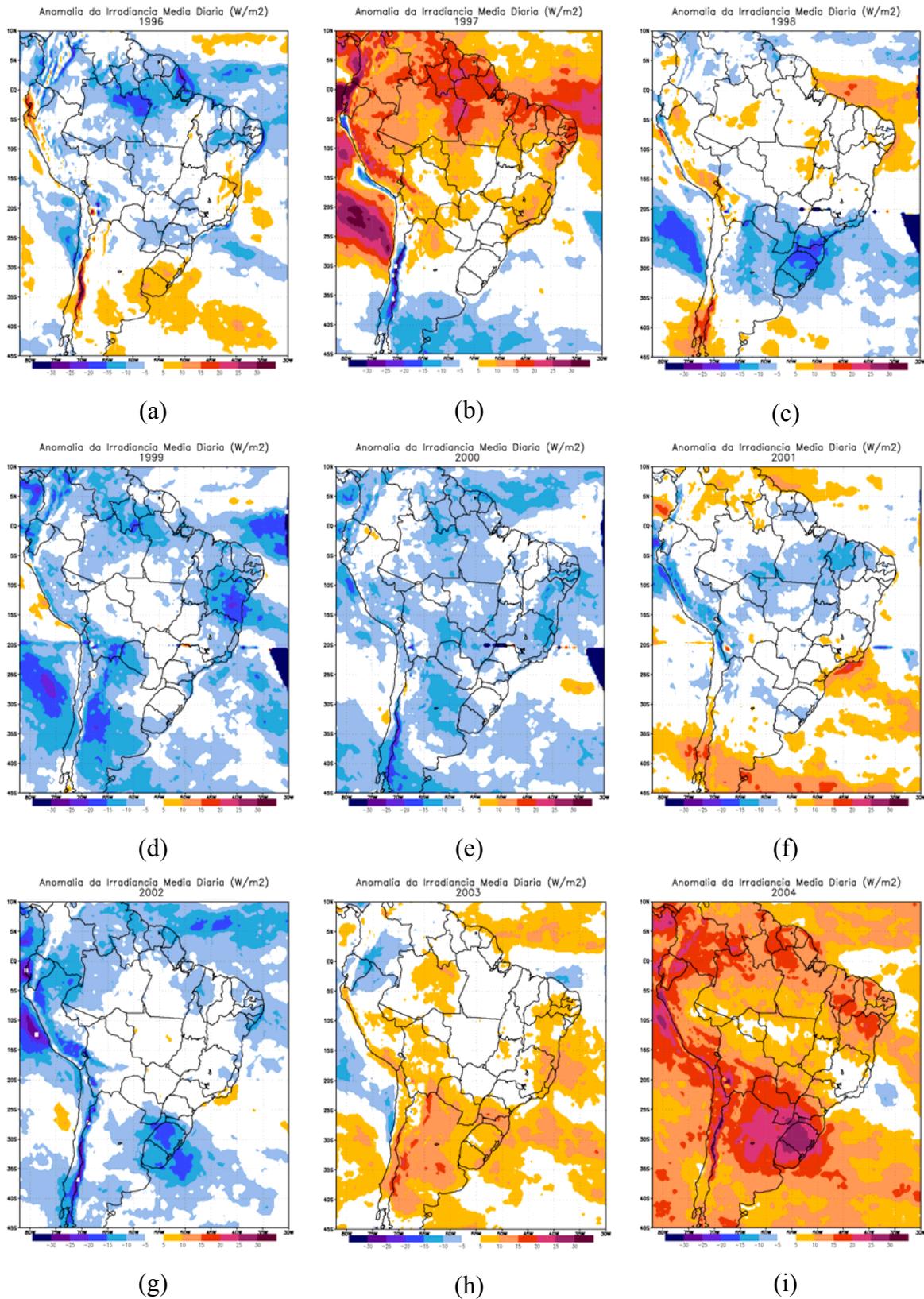
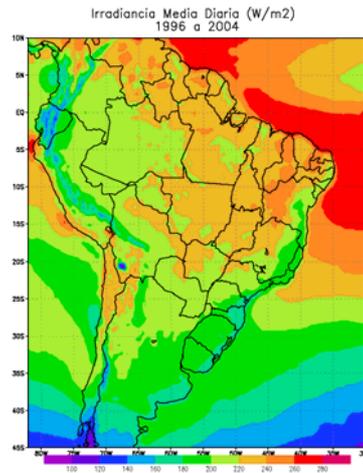
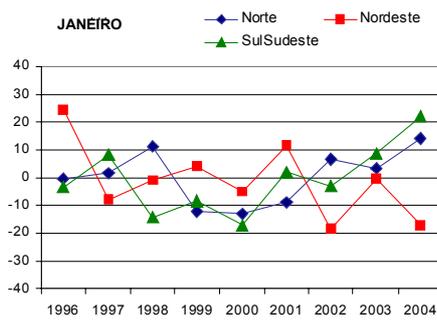


Figura 1 - Anomalias anuais da irradiância média diária (a a i) e campo médio irradiância média diária do período 1996 a 2004 (j).

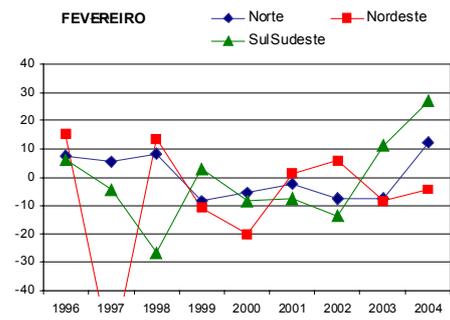


(j)

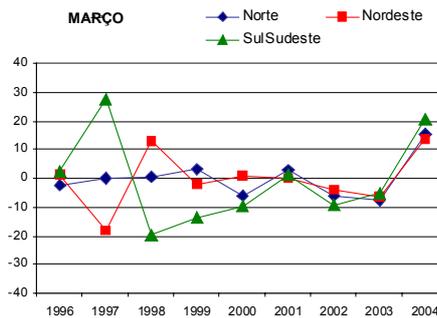
Figura 1 - Continuação.



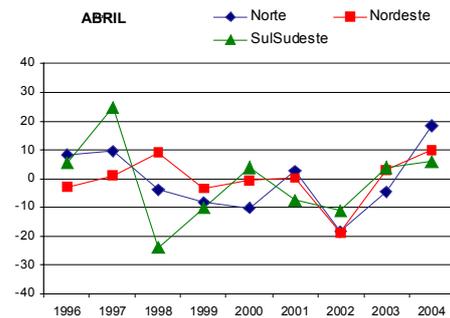
(a)



(b)

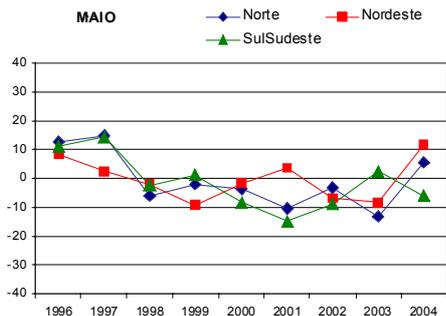


(c)

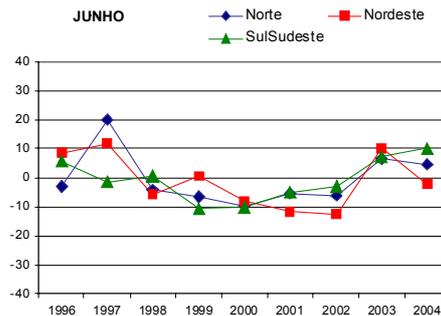


(d)

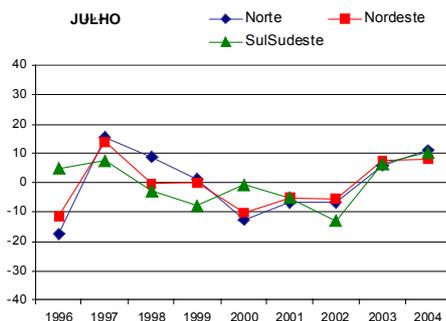
Figura 2 - Anomalias mensais da irradiância média diária para os meses de janeiro a dezembro (a a m) sobre os setores norte, nordeste e sul-sudeste da América do Sul (ver texto).



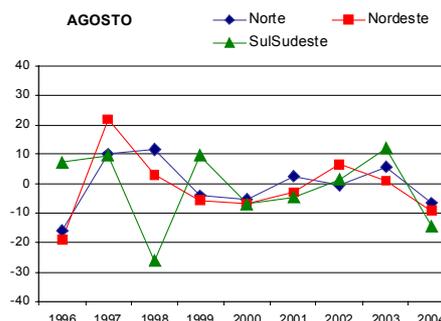
(e)



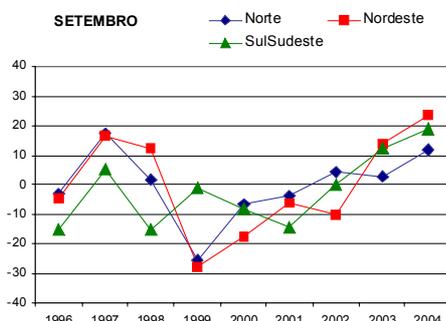
(f)



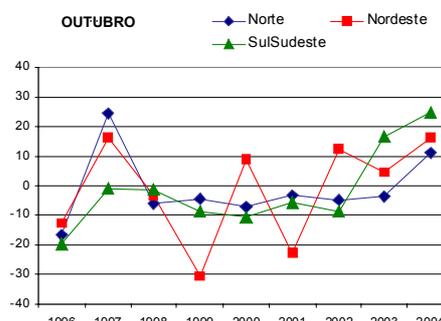
(g)



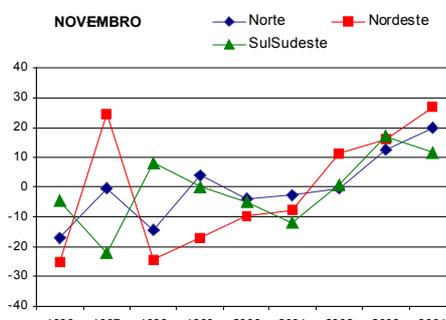
(h)



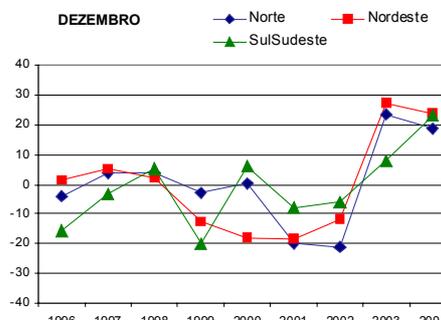
(i)



(j)



(l)



(m)

Figura 2 - Continuação.

4. CONCLUSÃO

De acordo com as análises dos resultados, observou-se que as anomalias mensais e anuais da radiação encontram-se dentro da faixa de $\pm 25 \text{ W/m}^2$. Devido à degradação do sinal do satélite, é esperável uma tendência de anomalias positivas a partir abril de 2003. Com a execução deste trabalho, completou-se o processamento de uma série de nove de anos de radiação utilizando o modelo GL1.2. Uma versão GL1.3 está sendo implementada incluindo o fator de correção da degradação do sinal do GOES-12 e a regionalização do conteúdo de água precipitável.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Paulo Nobre por ter-nos cedido, gentilmente, uma área em disco para o processamento das imagens, ao Dr. Juan Carlos Ceballos, pelas valiosas discussões, sugestões e contribuições para o desenvolvimento do trabalho e, ao Projeto Moore – CPTEC - Cenários Amazônicos, pelo financiamento do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Arai N. e F.C. de Almeida, 1982. Estimativa de radiação solar que chega a superfície terrestre utilizando satélite meteorológico. Anais, II Congresso Brasileiro de Meteorologia, Pelotas, RS.
- Ceballos J. C. e M. J. Bottino, 2004. Estimativa de radiação solar por satélite: Desempenho do modelo operacional GL1.2. Anais, XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza [Doc. PDF] .
- Ceballos J. C., M. J. Bottino e J. M. de Souza, 2004. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *J. of Geophys. Research*, v. **109**, D02211, doi:10.1029/2003JD003531.
- Gautier C., G. Diak and S. Masse, 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite. *J. Appl. Meteor*, **19**, 1005-1012.
- INMET/LABSOLAR (Instituto Nacional de Meteorologia/Laboratório de Radiação Solar, UFSC), 1998. Irradiação solar do Brasil. Publicação conjunta Instituto Nacional de Meteorologia (Ministério da Agricultura e Abastecimento) e Laboratório de Energia Solar (Universidade Federal de Santa Catarina). Brasília, 58 pp..
- Pereira, E. B., S. L. Abreu, E. Stuhlmann, M. Rieland and S. Colle, 1996. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data, *Solar Energy*, **57**, 125-132.
- Tiba, Ch. e N. Freidenreich, 2002. Atlas solarimétrico do Brasil. Editora Universitária da UFPE, Recife, 111 pp..
- Weinreb M., M. Jamieson, N. Fulton, Y. Chen, J. X. Johnson, J. Bremer, C. Smith and J. Baucom, 1997. Operation calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 imagers and sounders. *Appl. Opt.*, **36**, 6895–6904.
- Whitlock, C.H., T.P. Charlock, W.F. Staylor, R.T. Pinker, I. Laszlo, A. Ohmura, H. Gilgen, T. Konzelman, R.C. Di Pasquale, C.D. Moats, S.R. LeCroy and N.A. Ritchey, 1995. First global WCRP shortwave surface radiation budget dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **76**, 905-922.