

INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE COBERTURA DE NUVENS OBTIDO A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE NA PRECISÃO DAS ESTIMATIVAS DE ENERGIA SOLAR INCIDENTE NA SUPERFÍCIE.

Fernando Ramos Martins¹, Enio Bueno Pereira¹, Samuel Luna de Abreu²

Resumo

O índice de cobertura de nuvens (*CCI*) é o dado de entrada mais importante para a obtenção de estimativas de recurso energético solar com uso de modelos de transferência radiativa como, por exemplo, o modelo BRASIL-SR. A sua obtenção a partir de imagens de satélites é uma tarefa complexa devido à variabilidade das características climatológicas apresentadas no Brasil de modo que um grande esforço científico tem sido desenvolvido para obtenção de valores precisos e confiáveis. Este trabalho descreve duas técnicas desenvolvidas com o objetivo de maximizar a precisão dos valores de *CCI* obtidos a partir das imagens dos canais 1 e 4 do satélite GOES. Essas técnicas baseiam-se em análise estatística e geométrica para cada um dos píxeis da imagem do satélite. Ambas as técnicas são analisadas, em relação à técnica de limiar, por meio da comparação dos desvios das estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR. Os dados de superfície foram medidos na estação instalada em Caicó(PE) como parte do projeto SWERA. Verificou-se uma redução de até 66% no desvio médio e de até 50% no erro quadrático médio com a aplicação das novas técnicas. A correlação entre valores medidos e estimados foi incrementada em até 50% com a aplicação das técnicas propostas.

Abstract

Cloud cover index (*CCI*) is a very important input data for radiative transfer models and great effort is being made to its determination from satellite images with high confidence. The influence of *CCI* on solar radiation assessment becomes evident in large continental areas such as the Brazilian territory, with a wide range of climatic environments. This work describes two techniques to obtain *CCI* information using channel 1 (visible) and channel 4 (infrared) data from GOES satellite in

¹ Divisão de Clima e Meio Ambiente/Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - Instituto de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC-INPE). Caixa Postal 515. CEP: 12201-970. São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: fernando@dge.inpe.br, fone: 55 12 39456778, fax: 55 12 39456810.

² Laboratório de Energia Solar/Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC). Campus Universitário Trindade. Florianópolis, SC, Brasil.

order to maximize the reliability of *CCI* evaluation. The techniques are based on statistical and geometry analyses for each pixel of satellite data. This work also presents a comparison among ground measurements and solar irradiation estimates provided by the BRASIL-SR using *CCI* data obtained with both techniques and with the threshold methodology. The ground data were measured in Caicó/PE as part of the SWERA project. The MBE was reduced up to 66% and the RMSE was decreased up to 50% due to implementation of the new techniques. The correlation factor among measured and estimated values of surface global solar irradiation increased 50% when new techniques were used to get *CCI* values.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética em países em desenvolvimento e a preocupação com os problemas ambientais causados pelo consumo de energia vêm impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias, notadamente na área de energias renováveis. (IPCC, 2001; Goldemberg, 1998; Pereira and Colle, 1997). A radiação solar é uma fonte renovável de energia com reduzido impacto ambiental e vem se tornando viável técnica e economicamente. O levantamento dos recursos disponíveis desta fonte de energia é uma tarefa de suma importância para o planejamento energético de países em desenvolvimento como o Brasil. Alguns modelos computacionais estão em desenvolvimento com o objetivo de realizar esta tarefa utilizando dados de satélites geoestacionários (Ceballos et al., 2004; Martins et al., 2003). A precisão e confiabilidade deste levantamento estão fortemente associadas à determinação, a partir de imagens de satélite, do índice de cobertura de nuvens que é o principal fator de modulação da irradiação solar que incide na superfície do planeta e a principal fonte de erro nas estimativas obtidas com o uso de modelos de transferência radiativa.

O coeficiente de cobertura efetiva de nuvens em um determinado pixel da imagem, em um dia e horário específicos, é determinado a partir do valor de radiância visível do pixel medido pelo satélite (L_r) e dos valores de radiância visível associados às condições de céu claro (L_{clr}) e céu encoberto (L_{cld}) para o mesmo pixel, conforme descrito na eq. (1).

$$CCI = \frac{L_r - L_{clr}}{L_{cld} - L_{clr}} \quad (1)$$

A determinação dos valores de L_{clr} e L_{cld} pode ser realizada a partir da análise espacial e/ou temporal das imagens obtidas por satélite. Diversas técnicas foram publicadas para a determinação dos valores de radiância visível de céu claro e céu encoberto (Simpson e Gobat, 1995; WMO,

1991; Rossow et al., 1989a e b; Mossu et al., 1989; Minis et al., 1987; Gutman et al., 1987; Matthews e Rossow, 1987; Seze e Desbois, 1987; Saunders, 1986; Minis e Harrison, 1984 a, b, c; Tarpley, 1979). As técnicas desenvolvidas podem ser separadas em dois grupos: i) técnicas que estabelecem valores limiares para a detecção de nuvens e trabalham pixel a pixel da imagem de um ou mais canais espectrais do satélite e ii) técnicas que analisam propriedades estatísticas das radiâncias visível e/ou infravermelha em grupos de píxeis ou segmentos de imagens. Todas as técnicas publicadas apresentam problemas similares. Dentre eles pode-se citar a dependência que apresentam em relação às propriedades de superfície, à ocorrência de cobertura de nuvens parcial em um pixel da imagem, e à presença de nuvens com emissividades variáveis (Seze e Desbois, 1987; England e Hunt, 1985). Embora as técnicas estatísticas apresentem maior potencial para solucionar estes problemas, ainda não estão suficientemente testadas e validadas para serem consideradas como melhores do que as técnicas de limiares (Seze e Desbois, 1987). Diversas técnicas estatísticas e técnicas de valores limiares foram testadas e avaliadas no âmbito do projeto de climatologia de nuvens por satélite (ISCCP - International Satellite Cloud Climatology Project), mas o estudo desenvolvido concluiu que a avaliação dos algoritmos de nuvens está limitada por 2 fatores: (a) resolução espacial e espectral das imagens de satélite e (b) inexistência de dados de “verdade de superfície” que permita a avaliação do desempenho dos diversos algoritmos (Simpson e Gobat, 1995).

Uma técnica de valores limiares bastante utilizada em trabalhos publicados (Diekman et al., 1988; Dedieu et al., 1987; Saunders, 1986; Gautier et al., 1980) adota os valores mínimo e máximo de radiância visível para determinação de L_{clr} e L_{cld} , respectivamente. Como o albedo de superfície e as propriedades atmosféricas variam no decorrer do ano devido a geometria Sol/Terra e devido a alterações de propriedades e características da cobertura do solo, os valores extremos de radiância medidos por satélite devem ser corrigidos (Moussu et al., 1989) ou sua aplicação deve ser limitada temporalmente (Matthews e Rossow, 1987). Quando a determinação dos valores extremos é limitada em um intervalo de tempo específico, os valores de L_{clr} e L_{cld} são válidos apenas para esse período que deve ser definido de forma tal que o albedo de superfície não apresente uma variação significativa e as diferenças na geometria do sistema Sol/Terra/Satélite sejam pequenas a fim de que apresente pouca influência na variabilidade da radiância visível medida pelo satélite.

A adoção de valores extremos de radiância visível para a determinação do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens apresenta alguns inconvenientes. A dificuldade primária deste método reside no fato de que no intervalo de tempo necessário para garantir a ocorrência de pelo menos uma situação sem contaminação de nuvens no pixel da imagem podem ocorrer muitos fenômenos que geram um valor de radiância menor do que o valor correspondente à condição céu claro.

Sombras produzidas por nuvens (“broken clouds”), movimentos do pixel causados por incerteza da navegação, variações na estrutura da vegetação devido a variações de umidade são exemplos de eventos que podem reduzir os valores radiância observados por satélite para um pixel da imagem. Quanto maior o intervalo de tempo utilizado para a obtenção do valor mínimo de radiância visível, maior a probabilidade de ocorrência de um dos eventos de “ruído” atmosférico ou radiométrico, ou seja, o uso de um intervalo de tempo grande aumenta a sensibilidade do método a eventos raros e adiciona um erro sistemático na determinação da radiância de céu claro (Matthews e Rossow, 1987).

Outro fator de grande importância é a ocorrência de nebulosidade por períodos maiores do que o intervalo de tempo utilizado no método. A ocorrência de nebulosidade persistente é comum em regiões sob o efeito da zona de convergência intertropical, por exemplo, nas florestas tropicais como a Floresta Amazônica (Fisch et al., 2001; Matthews e Rossow, 1987) e na região do Atlântico Sul (Rossow, 1989).

De modo similar, a falta de ocorrência de nuvens durante o intervalo de tempo adotado para a determinação do valor de L_{clr} , também, acarretará imprecisão na determinação do índice de cobertura de nuvens. Na região semi-árida nordestina caracterizada pela baixa precipitação anual, a persistência de céu claro ocorre ao longo do ano e produz valores irreais de cobertura de nuvens que, quando usados como dado de entrada em modelos de transferência radiativa, produzem valores subestimados de irradiação solar na superfície.

O objetivo deste trabalho é apresentar duas novas técnicas para a determinação dos valores de L_{clr} e L_{cld} e verificar a como a precisão das estimativas de irradiação solar para Caicó/PE fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR é afetada. Caicó está localizada no sertão nordestino onde a precipitação média anual é inferior a 700mm e apresenta uma grande número de dias de insolação (cerca de 120 dias por ano).

METODOLOGIA

Estação solarimétrica de Caicó

Os valores de irradiação solar em superfície utilizados neste trabalho foram obtidos em Caicó (06°28'01"S – 037°05'05"W / 176m) onde se encontra em operação, desde novembro de 2002, uma estação de medida de radiação solar instalada como parte do Projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resources Assessment). A estação mede radiação solar global e direta, temperatura e umidade relativa com resolução temporal de 1 minuto e a Figura 1 apresenta algumas imagens da

estação. O projeto SWERA é um projeto multinacional financiado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (GEF/UNEP) cujo objetivo principal é produzir um levantamento detalhado dos recursos disponíveis de energia solar e eólica em diversas regiões do planeta, utilizando técnicas de modelagem atmosférica e dados de superfície confiáveis, com a finalidade de produzir informação científica relevante a ser utilizada no planejamento energético e em processos decisórios sobre investimentos na área de energia de modo a conciliar desenvolvimento sócio-econômico e proteção ao meio ambiente. Maiores detalhes sobre os objetivos, países participantes e andamento do projeto podem ser obtidos em www.tucupi.cptec.inpe.br/swera. Todos os dados medidos em Caicó encontram-se disponíveis em http://www.cptec.inpe.br/swera/EN/bdd/bdd_sup_sol.html.



Figura 1. Estação de medida em superfície operando em Caicó desde novembro/2002 como parte do Projeto SWERA.

Modelo BRASIL-SR

A obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície utilizando o modelo BRASIL-SR está dividida em três etapas: a) tratamento dos dados climatológicos e imagens de satélite; b) aplicação do “Método de Dois-Fluxos”; e c) cálculo da radiação global. A Figura 2(a) mostra o diagrama em blocos dos processos executados na primeira etapa. O banco de dados de temperatura foi desenvolvido a partir da compilação e análise geoestatística dos dados de todas as estações de superfície na América do Sul disponíveis na base de dados “Global Surface Summary of Day Data” mantida pelo National Climatic Data Center (NCDC). O banco de dados de umidade relativa foi desenvolvido a partir da interpolação de dados obtidos no junto à “International

Research Institute for Climate Prediction” (IRI) para toda a América do Sul. A base de dados de albedo de superfície foi gerada a partir das grades mensais na resolução 1°X1° disponibilizadas por “Distributed Active Archive Center – Goddard Space Flight Center” (DAAC-GSFC). Essas grades mensais foram obtidas a partir de valores do “índice de vegetação por diferença normalizada” (IVDN) determinados por satélite e outros parâmetros biofísicos relacionados ao tipo de vegetação (Sellers *et al.*, 1996). Os valores de altitude para todo o território da América do Sul foram obtidos pela manipulação da base de dados GTOPO produzida pelo Earth Resources Observation System Data Center (EROS) mantido pelo U.S Geological Survey (USGS).

A determinação estatística do índice de cobertura de nuvens, *CCI* é também realizada nesta primeira etapa. Originalmente, os valores de L_{clr} e L_{cld} são, respectivamente, os valores mínimo e máximo da radiância visível medida pelo satélite no período de um mês. Os valores *CCI* descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: a fração do céu com cobertura de nuvens e as variações espaciais da profundidade ótica das nuvens.

A Figura 2(b) apresenta um fluxograma descritivo dos procedimentos principais do modelo BRASIL-SR para a modelagem atmosférica e aplicação do método de “Dois-Fluxos”. O modelo assume que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas céu claro e céu encoberto (Martins, 2001; Pereira *et al.*, 2000; Stuhlmann *et al.*, 1990). O modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, de modo que se pode escrever:

$$\Phi_g = \Phi_0 \{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud}) \cdot (1 - CCI) + \tau_{cloud} \} \quad (2)$$

onde Φ_g é fluxo de radiação solar incidente na superfície, Φ_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera, τ_{clear} e τ_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas. Em resumo, a radiação solar incidente na superfície é estimada a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à condição de céu claro, τ_{clear} e a segunda refere-se à condição de céu encoberto, τ_{cloud} . As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos e a aproximação de Dois-Fluxos para solução da equação de transferência radiativa. A natureza aleatória do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura de nuvens (*CCI*).

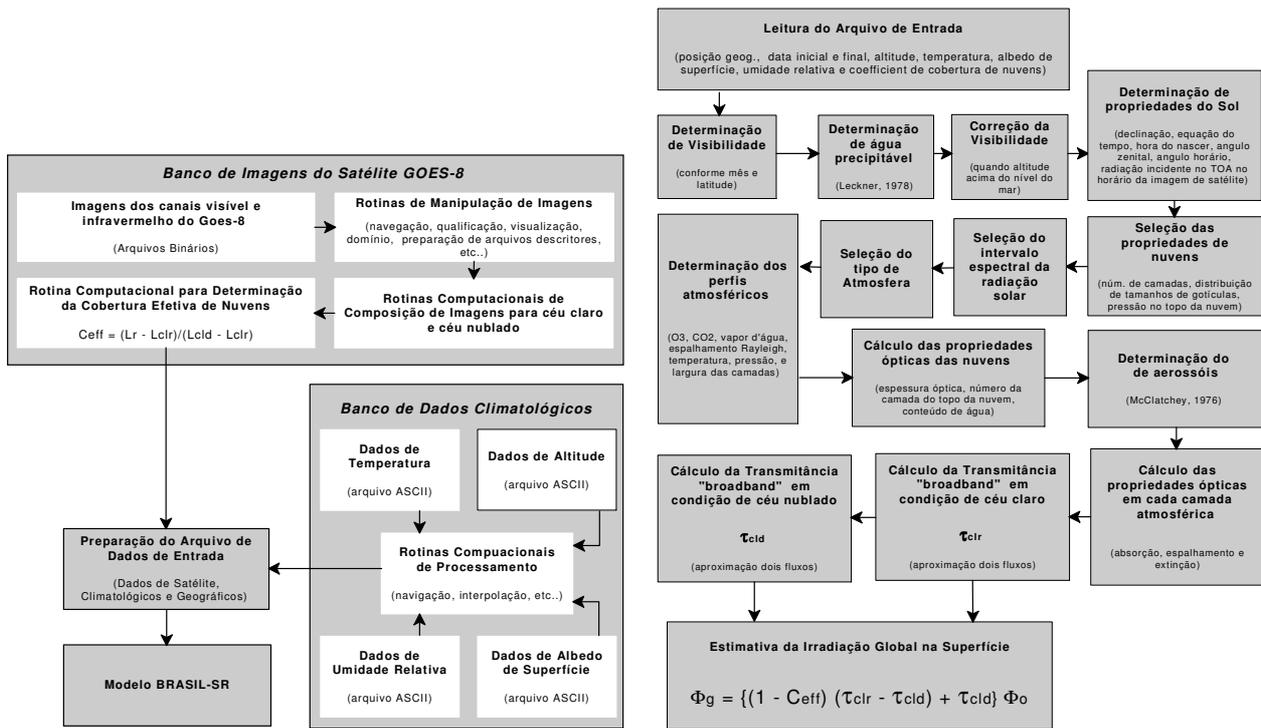


Figura 2. Fluxograma de procedimentos para estimativas de irradiação solar na superfície utilizando o modelo BRASIL-SR

Imagens do satélite GOES-8

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas imagens do satélite GOES-8 que está posicionado na longitude de 75° Oeste, latitude 0° e altitude de 36000km. Foram utilizadas apenas as imagens “full-disk” dos canais 1 (visível - 0,52 μm a 0,72μm) e 4 (infravermelho - 10,2 μm a 11,2 μm) recebidas na estação receptora do CPTEC/INPE nos seguintes horários sinóticos: 8h45, 11h45, 14h45, 17h45 e 20h45. As imagens apresentavam a resolução espacial de 0,125° (latitude) X 0,155° (longitude) e foram, posteriormente, recortadas para uma região de aproximadamente 0,5° X 0,5° (4 linhas X 4 colunas - 16 píxeis) em torno da posição geográfica da estação de Caicó para determinação dos valores de *CCI*.

Determinação dos valores de *L_{clr}*

Os valores da radiância de céu claro, *L_{clr}*, para cada um dos 16 píxeis foram obtidos com o uso de dois diferentes algoritmos: (a) menor radiância visível e (b) razão IR/VIS. Os valores de radiância de céu claro não são críticos para a determinação do índice de cobertura de nuvens em Caicó uma vez que o albedo de superfície não apresenta variações significativas ao longo do ano em razão do tipo de vegetação característica da região onde a estação de medida de superfície está

localizada. Além disso, não há ocorrência de nebulosidade persistente por período maior que um mês.

Assim, o primeiro algoritmo adotado para determinação de L_{clr} determina o valor mínimo mensal da radiância visível medida pelo satélite no intervalo de um mês para cada pixel da imagem. No entanto, a adoção do valor mínimo mensal da radiância visível continua sujeito a desvios causados por sombras de nuvens em dias parcialmente nublados, presença de nuvens cirrus e a erros de navegação na imagem do satélite. A precisão da navegação das imagens do satélite GOES-8 são da ordem 4km e a capacidade de manter a mesma posição geográfica para um dado pixel em imagens consecutivas é da ordem de 1,5km. (Menzel e Purdom. 1994). Segundo Rossow (1989), estas fontes de erros podem produzir desvios da ordem de 4% no valor de L_{clr} .

Uma importante fonte de erro na determinação dos valores de L_{clr} utilizando o algoritmo anterior é a grande variabilidade dos valores de albedo apresentados por diferentes tipos de nuvens o que dificulta a discriminação entre as condições de céu claro e céu encoberto em um pixel da imagem utilizando apenas uma região espectral das imagens de satélite (Seze e Desbois, 1987; Matthews e Rossow, 1987; Saunders, 1985). Desbois et al. (1982) discutiu a classificação de nuvens com a utilização de satélites geoestacionários e mostra de forma evidente em seu estudo a grande variabilidade de valores de radiância infravermelha e visível para cada tipo de nuvem. A Figura 3 permite constatar a dificuldade de distinguir entre a superfície (céu claro), nuvens cirrus e nuvens baixas utilizando apenas o canal visível do satélite. Existe uma larga faixa de valores de radiância no canal infravermelho para uma mesma radiância no canal visível e, dessa forma, a utilização apenas do canal visível não permite diferenciar as nuvens cirrus da condição de céu claro, ou diferenciar as nuvens baixas dos limites de massas convectivas.

Assim, para minimizar os desvios sistemáticos na determinação dos valores de L_{clr} associados a esses eventos, o segundo algoritmo proposto neste trabalho utiliza a razão entre as radiâncias medidas pelo satélite GOES-8 nos canais infravermelho (IR) e visível (VIS). Inicialmente, o algoritmo identifica os cinco maiores valores de razão IR/VIS. Um valor elevado para a razão IR/VIS significa que o pixel apresenta uma temperatura elevada e albedo reduzido, ou seja, características associadas a superfície do planeta. Por outro lado, as nuvens apresentam características inversas, baixas temperaturas e albedo elevado quando comparado com a cobertura do solo nas condições brasileiras (sem ocorrência de neve). Dessa forma, o uso da imagem infravermelha permite verificar se a temperatura do pixel é alta nos dias em que a radiância visível apresentou valores mínimos e, dessa forma, estabelecer como maior precisão a condição de céu claro (sem contaminação de nuvens cirrus que não são identificadas no canal visível do satélite).

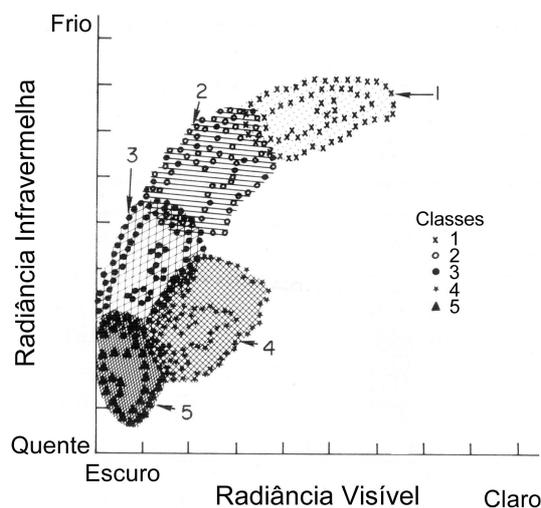


Figura 3. Histograma bi-espectral “Infravermelho x Visível” da radiação medida em satélite geostacionário e classificação de nuvens. As nuvens espessas convectivas estão representadas na Classe 1, as massas convectivas na Classe 2, as nuvens Cirrus na Classe 3 e nuvens baixas na Classe 4. A Classe 5 corresponde ao solo. Fonte: Modificado de Bunting e Hardy (1984).

Determinação dos valores de L_{cld}

A determinação dos valores de L_{cld} é um ponto bastante crítico quando se está interessado na obtenção do índice de cobertura de nuvens para a região semi-árida do nordeste brasileiro. Caicó apresenta uma insolação elevada (120 dias/ano) e baixa precipitação pluviométrica anual (aproximadamente 700mm), e, em consequência dessa climatologia, a não-ocorrência de céu totalmente encoberto pode ser superior ao intervalo de um mês utilizado para determinação do valor máximo de radiação visível a ser atribuído à L_{cld} no procedimento original de operação do modelo BRASIL-SR. Em resumo, o valor atribuído a L_{cld} pode estar associada à radiação medida em condições de céu claro ou parcialmente encoberto acarretando um desvio na determinação do índice de cobertura de nuvens que assumiria esse valor como a radiação de céu completamente nublado.

A solução apresentada neste trabalho para minimizar os desvios sistemáticos causados na determinação do índice de cobertura de nuvens baseia-se na hipótese de que o espalhamento da radiação solar de volta para o topo da atmosfera pelas nuvens ocorre de forma isotrópica e é função apenas da geometria Sol-Pixel-Satélite. Em outras palavras, a quantidade de radiação solar que irá atingir o satélite após o espalhamento por um determinado tipo de nuvem depende apenas das posições relativas entre o Sol, o satélite e o pixel em estudo. Se a geometria entre os três pontos do sistema Sol-Pixel-Satélite for mantida e o céu estiver completamente encoberto por nuvens espessas, a radiação visível medida pelo satélite será a mesma independente da localização (latitude e longitude) do pixel em estudo. Assim, o valor de L_{cld} utilizado neste estudo, poderá ser o mesmo

valor apresentado por qualquer outro pixel que apresente a mesma configuração geométrica de Caicó em relação ao Sol e ao satélite.

Dessa forma, os valores de L_{cld} foram determinados a partir de análise estatística das imagens do satélite GOES-8. O primeiro passo dessa análise foi a obtenção de histogramas de frequências da radiância visível observada pelo satélite em função dos ângulos zenitais do Sol e satélite. Para a preparação dos histogramas, os valores de radiância visível foram normalizados pelo cosseno do ângulo zenital solar (Ceballos et al., 2004). Todas as imagens dos GOES-8 disponíveis para o ano de 2001 nos horários mencionados anteriormente foram utilizadas para o desenvolvimento dos histogramas. Foram excluídos desta etapa da análise os pixels que apresentaram ângulos zenitais superiores a 80° e aqueles que pudessem apresentar o fenômeno de reflexão solar (“sunlint”) (Martins, 2001). A Figura 4(a) mostra o gráfico de frequências obtido para a geometria definida pelo ângulo zenital solar de 50° e ângulo zenital do satélite de 16° (referente à localização da estação em Caicó). A linha contínua foi obtida a partir da análise de todas as imagens disponíveis do ano de 2001 enquanto os pontos representam os valores de frequência mensal mostrados para comparação ao valor anual.

O segundo passo da análise estatística foi determinar, para cada geometria específica definida pelo par de ângulos zenitais do Sol e do satélite, o valor limite de radiância visível para o qual a probabilidade cumulativa de ocorrências de valores menores iguais a ele atingisse 95%. Esse valor limite é atribuído à L_{cld} para cálculo do índice de cobertura de nuvens. A Figura 4(b) apresenta as curvas de probabilidade cumulativa mensal e anual para a mesma geometria do sistema. O valor adotado para cálculo do índice de cobertura de nuvens está indicado na Figura. O valor máximo de radiância para cada geometria específica não foi selecionado como L_{cld} uma vez que podem ter sido causados por eventos raros como reflexão de radiação por bordas de nuvens ou outras superfícies que possam acarretar uma radiância no topo da atmosfera maior que a associada à condição de céu completamente encoberto por nuvens de elevada espessura ótica. Erros nas etapas de transmissão/recepção da imagem também produzem valores elevados que devem ser evitados.

Pode-se observar que o L_{cld} adotado para Caicó não corresponde a uma probabilidade cumulativa de 95% apenas 3 meses do ano. O valor a ser adotado como L_{cld} seria 41 para esses três meses, isto é, cerca de 10% maior ao estabelecido o que representa uma aumento da ordem de 14% no índice de cobertura de nuvens. O modelo BRASIL-SR poderá subestimar a irradiação solar global nesses três meses em consequência desse aumento do valor de CCI .

A Figura 5 apresenta os valores de L_{cld} para cada um dos valores de ângulo zenital solar observados para os pixels da imagem que apresentam o mesmo ângulo zenital do satélite (16°). Apresenta, ainda, o total de ocorrências de uma mesma geometria em todas as imagens analisadas.

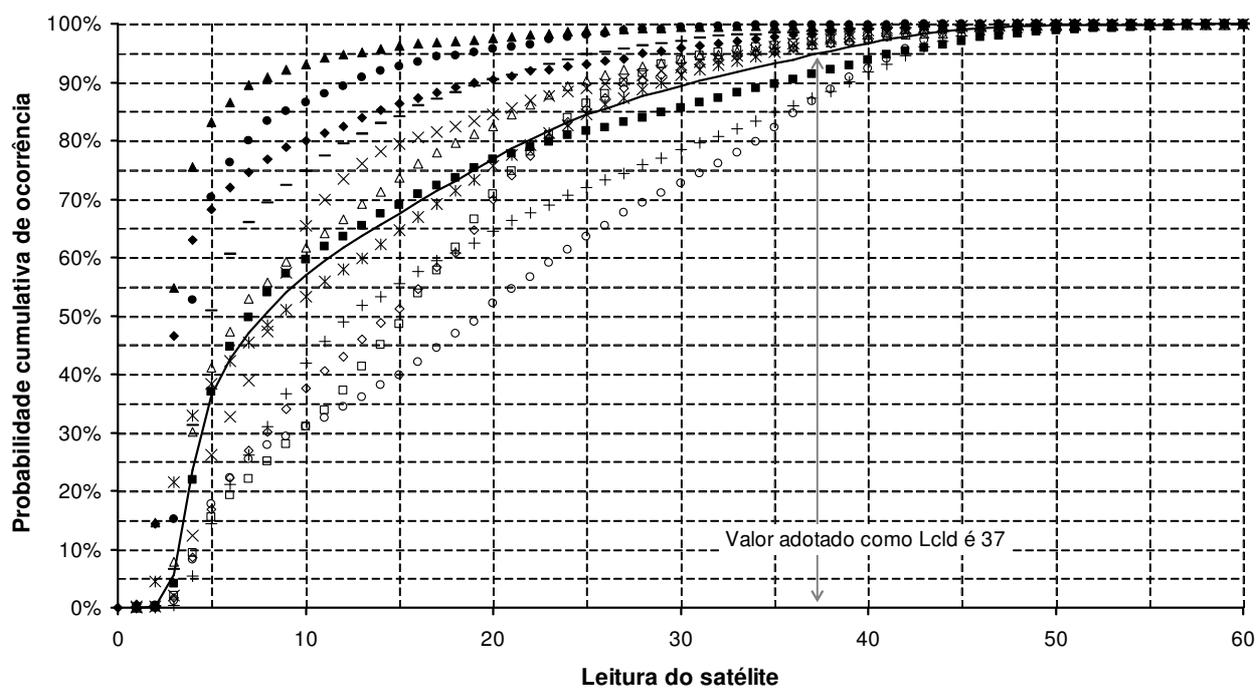
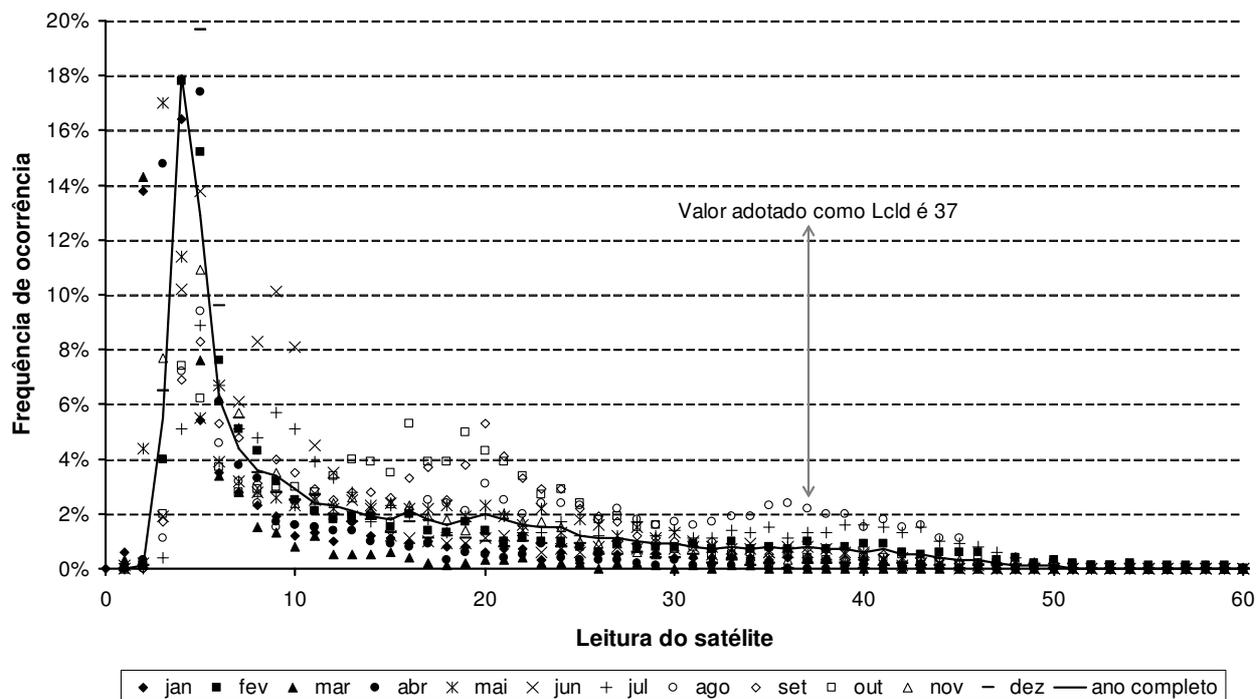


Figura 4. (A) Histograma de frequência de valores de radiância visível medidos pelo satélite GOES-8 para os píxeis que apresentam a geometria definida pelo ângulo zenital solar de 50° e ângulo zenital do satélite de 16° (referente à estação em Caicó) nas imagens obtidas em 2002. (B) Probabilidade cumulativa para ocorrência de valores de radiância visível menores igual a leitura do satélite GOES-8 para a mesma geometria definida em (A).

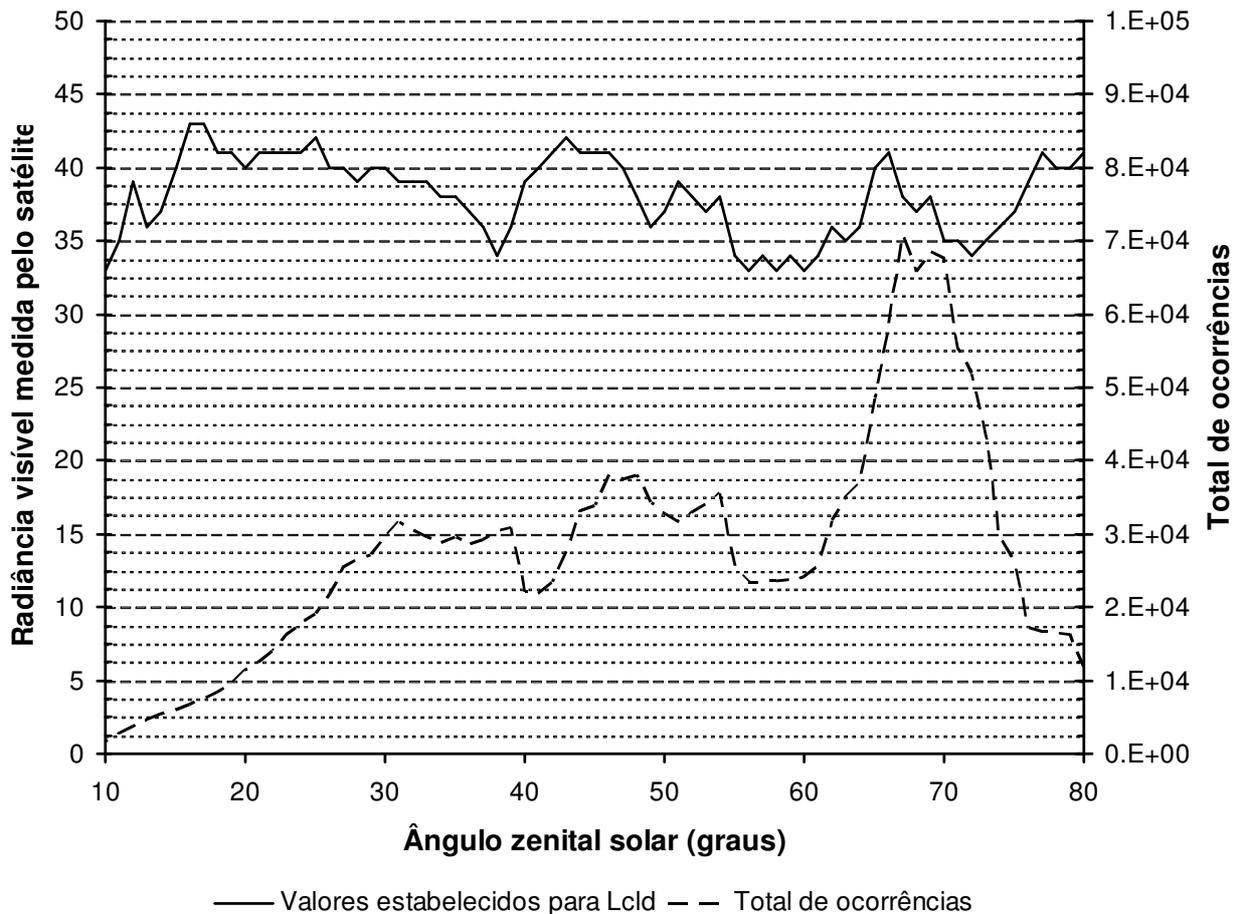


Figura 5. Variação de L_{cld} em função do ângulo zenital solar observado (linha contínua) e total de píxeis observados com a geometria definida pelo ângulo zenital do Sol e do satélite GOES-8.

Pode-se observar que existe uma boa quantidade de dados estudados para cada uma das geometrias observadas e que os valores de radiação das nuvens (L_{cld}) apresentou uma flutuação entre os valores 33 e 43, correspondendo a uma variação da ordem de 30%. A continuidade dos estudos deve fornecer indicações sobre as causas dessas variações bruscas como as ocorridas nas proximidades dos ângulos 40° e 75°.

Determinação dos valores de CCI

Três técnicas foram utilizadas para a determinação do índice de cobertura de nuvens para cada pixel:

- Técnica I: é a técnica originalmente adotada no modelo BRASIL-SR onde o valor mínimo e máximo de radiação visível no período de um mês são atribuídos a L_{clr} e L_{cld} , respectivamente;
- Técnica II: o valor mínimo de radiação visível no período de um mês é atribuído a L_{clr} e a análise do sistema Sol-Pixel-Satélite é utilizada para determinação de L_{cld} ;

- Técnica III: a análise da razão IR/VIS no período de um mês é utilizada para determinação de L_{clr} e a análise do sistema Sol-Pixel-Satélite é utilizada para determinação de L_{cld} .

O índice de cobertura de nuvens utilizado como dado de entrada do modelo BRASIL-SR foi o valor médio do valor obtido com a aplicação da equação (1) para cada um dos 16 píxeis da área do recorte após a determinação de L_{clr} e L_{cld} . Não foi adotado nenhum fator de ponderação para determinação do valor médio uma vez que estudos anteriores demonstraram que esse procedimento não resultou em nenhum benefício significativo na precisão das estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo de transferência radiativa. (Gambi, 1998)

RESULTADOS

As Figuras 6 e 7 apresentam uma comparação dos desvios encontrados para as estimativas de irradiação solar global incidente na superfície para os meses de novembro/2002 à fevereiro/2003. Pode-se observar que ocorreu uma redução significativa do desvio médio (MBE) e do erro quadrático médio (RMSE), definidos pelas eq. (3), para as estimativas horárias e diárias fornecidas pelo modelo BRASIL-SR utilizando valores de CCI obtidos com a aplicação das Técnica II e III. Isso ocorre em função do erro que ocorre na Técnica I quando esta atribuí o valor máximo de radiância visível no período de um mês a L_{cld} . No entanto, fica evidente a partir da análise das Figuras 6, 7 e 8 que o modelo continua subestimando a irradiação global na superfície em Caicó.

$$MBE = \sum_i^n \frac{(R_{estimado,i} - R_{medido,i})}{R_{medido,i}} \quad RMSE = \frac{\sqrt{\sum_i^n (R_{estimado,i} - R_{medido,i})^2}}{\sum_i^n R_{medido,i}} \quad (3)$$

As figuras permitem observar que com a adoção da Técnica III, os valores dos desvios atingiram o mesmo patamar dos desvios apresentados pelas estimativas obtidas pelo modelo HELIOSAT utilizando imagens do satélite METEOSAT com resolução temporal de 30 minutos. Com exceção dos desvios dos totais diários do mês de fevereiro (Figura 7), o uso da Técnica III produziu estimativas com menores valores de MBE. Não se conseguiu identificar a razão da diferença de comportamento no mês de fevereiro, mas um estudo mais detalhado utilizando um período de tempo mais longo e dados da estação solarimétrica localizada em Florianópolis está em andamento para uma avaliação mais detalhada do comportamento das técnicas em duas condições climatológicas e de cobertura de solo bastante distintas.

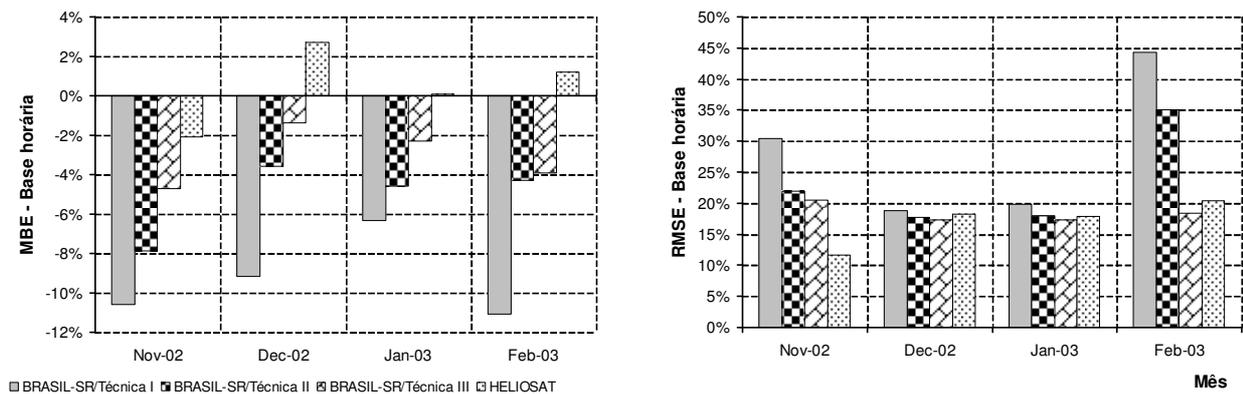


Figura 6. Desvios das estimativas de irradiação solar horária incidente na superfície em relação aos valores medidos em Caicó. Os nomes apresentados na legenda representam: BRASIL-SR/Técnica I para desvios das estimativas obtidas com *CCI* determinados pela Técnica I; BRASIL-SR/Técnica II para desvios das estimativas foram obtidas com *CCI* determinados pela Técnica II; BRASIL-SR/Técnica III para desvios das estimativas estimativas foram obtidas com *CCI* determinados pela Técnica III.

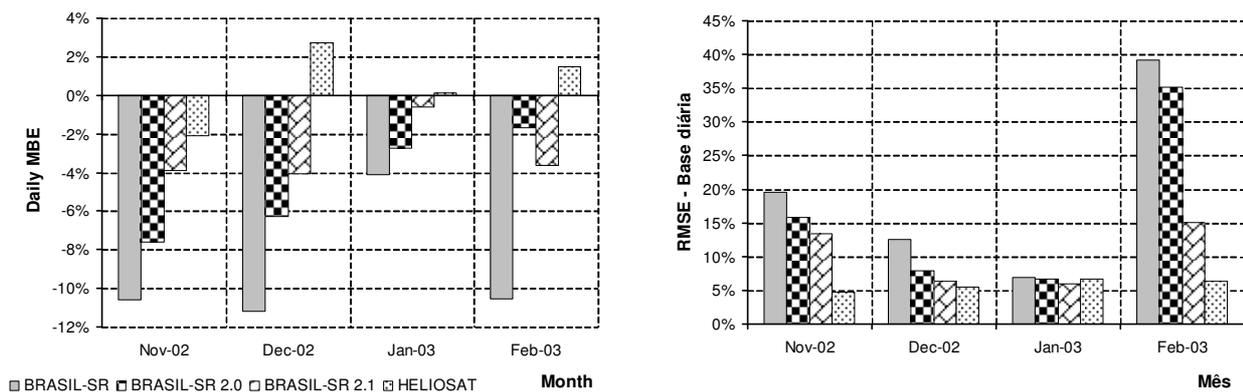


Figura 7. Desvios das estimativas de irradiação solar diária incidente na superfície em relação aos totais diários medidos em Caicó. Os nomes apresentados na legenda representam: BRASIL-SR/Técnica I para desvios das estimativas obtidas com *CCI* determinados pela Técnica I; BRASIL-SR/Técnica II para desvios das estimativas estimativas foram obtidas com *CCI* determinados pela Técnica II; BRASIL-SR/Técnica III para desvios das estimativas estimativas foram obtidas com *CCI* determinados pela Técnica III.

A Figura 8 mostra uma comparação gráfica entre os valores medidos da irradiação solar global em Caicó e valores estimados utilizando as 3 técnicas descritas para determinação dos valores de *CCI*. Pode-se observar que a Técnica III produziu as estimativas com o melhor fator de correlação e com menor subestimação da irradiação solar global na superfície.

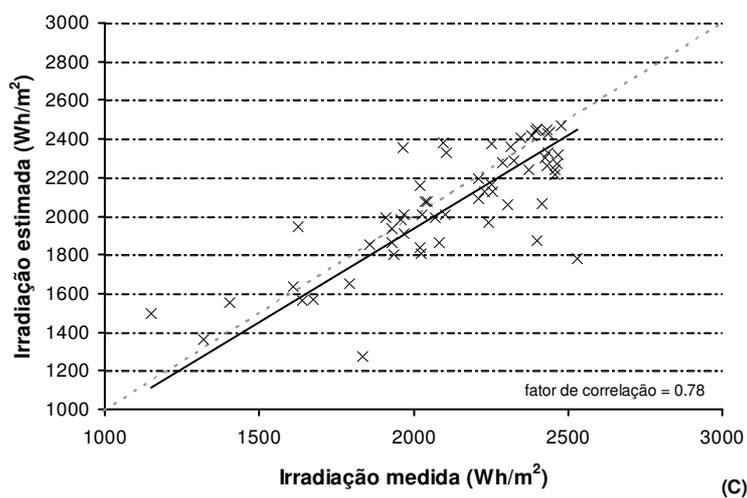
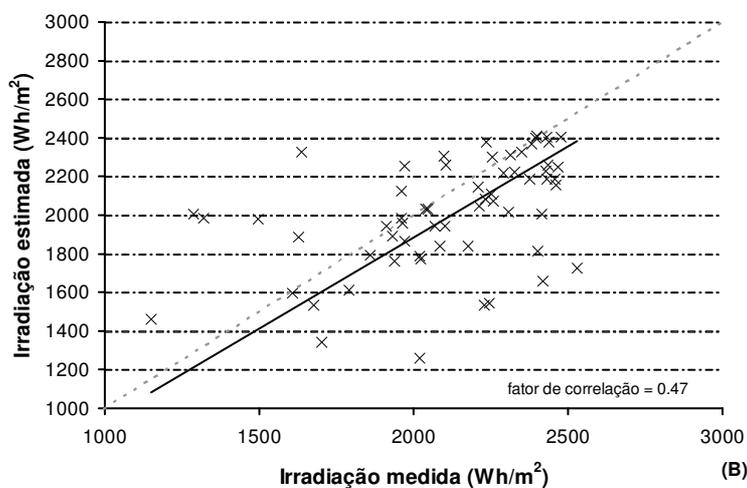
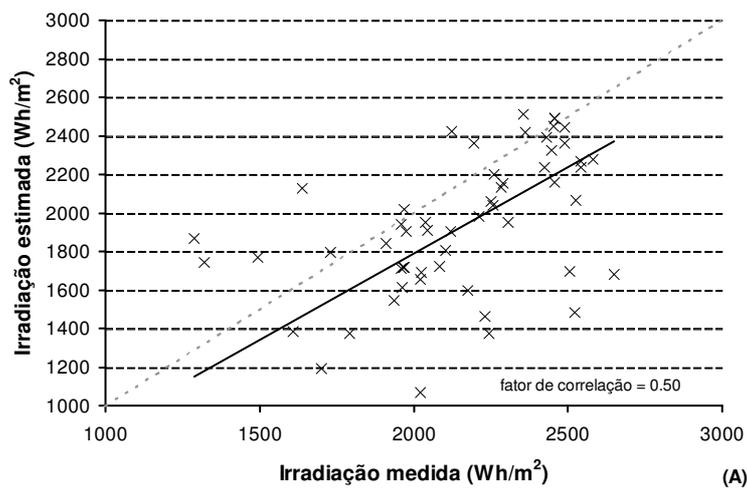


Figura 8. Comparação gráfica dos valores medidos e estimados de irradiação solar global na superfície em Caicó(PE) utilizando as 3 técnicas para determinação do *CCI*: (A) Técnica I, (B) Técnica II, (C) Técnica III. O fator de correlação também está apresentado para cada um dos casos estudados.

Os resultados obtidos durante a etapa de validação do modelo utilizando dados de superfície medidos na estação solarimétrica pertencente a BSRN (Baseline Solar Radiation Network) localizada em Florianópolis (Colle e Pereira, 1998) não indicaram erros sistemáticos de subestimativa para a irradiação solar global na superfície. Assim, pode-se inferir que a determinação dos valores de *CCI* continua sendo a causa dessa subestimativa. O regime de nebulosidade observado na região de Florianópolis não apresenta persistência de céu claro ou encoberto por períodos superiores a 30 dias, tornando o procedimento original do modelo BRASIL-SR para determinação de *CCI* (valores máximo e mínimo de radiância visível) menos sujeita a erros. Uma solução possível a ser estudada na continuidade do trabalho é a ampliação do fator de 95% de probabilidade cumulativa para seleção do valor a ser atribuído a L_{cld} . O valor 95% foi estabelecido ao acaso para retirar valores elevados de radiância visível causados por espalhamento da radiação provocados por reflexão em bordas de nuvens ou outros fatores relacionados com a cobertura de solo e erros associados ao satélite que podem ocorrer com uma frequência baixa. No entanto, o limite em 95% ainda acarreta o corte de valores de radiância causados pela reflexão da radiação solar em nuvens e, portanto, aumentando-se esse valor pode-se obter menores desvios nas estimativas de irradiação solar na superfície.

Apesar de a Técnica II ter reduzido os desvios observados quando substituiu a Técnica I na determinação dos valores de *CCI*, ela não aumentou a correlação entre valores estimados e medidos de irradiação solar global. Conforme mencionado anteriormente, a presença de cirrus e sombra de nuvens podem influenciar na identificação do valor de L_{clr} , reduzindo dessa forma a confiabilidade dos valores do índice de cobertura de nuvens.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta duas novas técnicas para determinação do índice de cobertura de nuvens a partir de imagens de satélite com a finalidade de minimizar a incerteza causada pela persistência de dias de céu claro ou encoberto nas estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. O trabalho apresenta uma comparação dos desvios das estimativas de irradiação solar global na superfície utilizando dados medidos em Caicó como parte do projeto SWERA. Para o período de quatro meses apresentados neste trabalho, a aplicação da Técnica III, que determina a L_{clr} a partir da razão entre as radiâncias infravermelha e visível medidas pelo satélite e define L_{cld} a partir da análise da radiância visível em função da geometria do sistema Sol-Pixel-Satélite, ocasionou uma redução da ordem de 50-66% no desvio médio (MBE) e da ordem de 35-50% no RMSE quando comparada com a Técnica I, que estabelece os valores mínimo e máximo da radiância visível medidos pelo satélite no período de um mês para L_{clr} e L_{cld} .

A correlação entre valores medidos e estimados foi incrementada em 50% com a aplicação da Técnica III em substituição da Técnica I na determinação dos valores de *CCI* usados para alimentação do modelo BRASIL-SR.

Apesar de a Técnica II ter reduzido a incerteza das estimativas de irradiação solar global na superfície, ela não se mostrou viável em função de não ter produzido um incremento na correlação entre valores estimados e valores medidos na estação de Caicó. O não incremento do fator de correlação deve ter como causas principais as fontes de erros mencionadas no desenvolvimento da metodologia como a presença de cirrus e sombra de nuvens.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças ao suporte e financiamento das seguintes instituições: CNPq (processo 381072/2002-9), GEF/UNEP (Global Environmental Facility/United Nation Environmental Programme). À Divisão de Satélites Ambientais (DAS/INPE) que forneceu todas as imagens de satélite utilizadas neste trabalho. Agradecimento especial é devido aos pesquisadores Juan Ceballos e Hans Georg Beyer pelas importantes discussões que muito contribuíram ao desenvolvimento e aperfeiçoamento da metodologia apresentada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bunting J. T.; Hardy, K. R. **Cloud identification and characterization from satellites.** In: Henderson-Sellers, A. (ed.). *Satellite sensing of a cloudy atmosphere: observing the third planet.* London: Taylor & Francis Ltd., 1984, Cap. 6, p. 203-240.
- Ceballos, J. C., Bottino, M. J., Souza, J. M. **A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES-8 visible imagery.** *Journal of Geophysical Research*, 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- Colle, S.; Pereira, E. B. **Atlas de irradiação solar do Brasil (primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície).** Brasília: INMET, 1998.
- Dedieu, G.; Deschamps, P. Y.; Kerr, Y. H. **Satellite estimation of Solar irradiance at the surface of the earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data.** *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 79-87, 1987.
- Diekmann, F. J.; Happ, S.; Rieland, M.; Köln, Benesch, W.; Offenbach, Czeplak, G.; Kasten F. **An operational estimate of global solar irradiance at ground level from METEOSAT data: results from 1985 to 1987.** *Meteorol. Rdsch.*, 41, 65-79, 1988.

- England, C. F.; Hunt, G. E. **A bispectral method for the automatic determination of parameters for use in imaging satellite cloud retrievals.** International Journal of Remote Sensing, 6, 9, 1545-1553, 1985.
- Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. **Clima da Amazônia.** [Online] <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/fish.htm>>. Fevereiro, 2001.
- Gambi, W. **Avaliação de um modelo físico estimador de irradiância solar baseado em satélites geoestacionários.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.
- Gautier, C.; Diak, G.; Masse, S. **A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data.** Journal of Applied Meteorology, 19, 1005-1012, 1980.
- Goldemberg, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** São Paulo: EDUSP, 1998.
- Gutman, G.; Tarpley, D.; Ohring, G. **Cloud screening for determination of land surface characteristics in a reduced resolution satellite data set.** International Journal of Remote Sensing, 8, 6, 859-870, 1987.
- IPCC, 2001. Climate Change 2001 (3 vols). **United Nations Intergovernmental Panel in Climate Change.** Cambridge University Press, UK. (available from www.ipcc.ch).
- Martins, F. R. **Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR,** Tese de doutoramento, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 330pp (2001)
- Martins, F. R.; Souza, M. P.; Pereira, E. B.. **Comparative study of satellite and ground techniques for cloud cover determination.** Advances in Space Research, 32, 11, pp.2275-2280, 2003.
- Matthews, E.; Rossow, W. B. **Regional and seasonal variations of surface reflectance from satellite observations at 0,6 μm .** Journal of Climate and Applied. Meteorology, 26(1), 170-202, 1987.
- Menzel, W. P.; Purdom, J. F. W. **Introducing GOES-I: The first of a new generation of geostationary operational environmental satellites.** Bulletin of American Meteorological Society, 75, 5, 757-781, 1994.
- Minnis, P.; Harrison, E. F. **Diurnal variability of regional cloud and clear sky radiative parameters derived from GOES data. Part I: Analysis method.** Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(7), 993-1011, 1984.

- Minnis, P.; Harrison, E. F. **Diurnal variability of regional cloud and clear sky radiative parameters derived from GOES data. Part II: November 1978 Cloud Distributions.** *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 1012-1031, 1984.
- Minnis, P.; Harrison, E. F. **Diurnal variability of regional cloud and clear sky radiative parameters derived from GOES data. Part III: November 1978 Radiative Parameters.** *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 1032-1051, 1984.
- Minnis, P.; Harrison, E. F.; Gibson, G. G. **Cloud cover over equatorial eastern Pacific derived from July 1983 International Satellite Cloud Climatology Project using a hybrid bispectral threshold method.** *Journal of Geophysical Research*, 92(D4), 4051-4074, 1987.
- Moussu, G.; Diabate, L.; Obrechot, D.; Wald, L. **A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites.** *International Journal of Remote Sensing*, 10(7), 1207-1225, 1989.
- Pereira, E. B.; Colle, S. **A energia que vem do Sol.** *Revista Ciência Hoje*, 22, 130, 25-35, 1997.
- Rossow, W. B. **Measuring cloud properties from a space: a review.** *Journal of Climate*, 2(3), 201-213, 1989.
- Rossow, W. B.; Brest, C. L.; Garder, L. C. **Global, seasonal surface variations from satellite radiance measurements.** *Journal of Climate*, 2(3), 214-247, 1989.
- Rossow, W. B.; Garder, L. C.; Lacis, A. L. **Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part I: Sensitivity of Analysis.** *Journal of Climate*, 2(5), 419-457, 1989.
- Saunders, R. W. **An automated scheme for the removal of cloud contamination from AVHRR radiances over western Europe.** *International Journal Remote Sensing*, 7, 7, 867-886, 1986.
- Sellers et al., *Journal of Climate* 9, 706-737, 1996.
- Seze, G.; Desbois, M. **Cloud cover analysis from satellite imagery using spatial and temporal characteristics of the data.** *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 287-303, 1987.
- Simpson, J. J.; Gobat, J. I. **Improved cloud detection in GOES scenes over land.** *Remote Sensing Environment*, 52, 36-54, 1995.
- Stuhlmann, R.; Rieland, M.; Raschke, E. **An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at surface from satellite data.** *Journal of Applied Meteorology*, 29, 7, 586-603, 1990.
- Tarpley, J. D. **Estimating incident solar radiation at the Earth's surface from geostationary satellite data.** *Journal Applied Meteorology*, 18, 1172-1181, 1979.

World Meteorological Organization and International Council of Scientific Unions. **International
Satellite Cloud Climatology Project - documentation of cloud data.** March, 1991