

# EFEITOS DA VARIABILIDADE DA VISIBILIDADE HORIZONTAL NA QUANTIFICAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO SOLAR

**Rodrigo Santos Costa** – rodrigo.costa@cptec.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos  
Ambidados Consultoria em Meio Ambiente, à serviço da Petrobras

**Fernando Ramos Martins** – fernando.martins@cptec.inpe.br

**Enio Bueno Pereira** – enio.pereira@cptec.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre

**Resumo.** O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR é utilizado pelo Grupo de Energias Renováveis do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais na quantificação do recurso energético solar. Dentre os dados de entrada, o modelo utiliza a visibilidade horizontal climatológica, que não consegue representar de forma consistente os aerossóis atmosféricos, importante parâmetro no cálculo da radiação. Uma base de visibilidade horizontal foi criada para dois meses de condições distintas do ano de 2007 e utilizada em novas integrações do modelo, comparando os resultados. Os mapas de diferença mostram diminuição na radiação global e direta, e aumento da radiação difusa. Esses resultados foram mais pronunciados na região centro-norte do Brasil, no mês de menor visibilidade horizontal, reflexo do aumento sazonal da queima da biomassa.

**Palavras-chave:** Visibilidade Horizontal, Aerossóis, Modelo de Transferência Radiativa

## 1. INTRODUÇÃO

O SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) foi um projeto financiado pelo GEF/UNEP, tendo como objetivo prover uma base de dados ambientais consistente e de elevada confiabilidade e acessibilidade, incentivando a inserção de energia limpa na matriz energética de países em desenvolvimento, como o Brasil. A respeito da energia solar, diversos estudos mostram que seu uso pode trazer benefícios ao Brasil, levando desenvolvimento a áreas remotas, que não estão cobertas pelo sistema interligado nacional; regulando a oferta de energia durante períodos de secas; diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Dentro da necessidade da quantificação do recurso energético solar, o Grupo de Estudo de Energias Renováveis do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) utiliza o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, que tem basicamente como dados de entrada imagens de satélites geoestacionários e dados climatológicos. O modelo apresentou resultados bastante coerentes, que foram validados com as estações de referência do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e estações meteorológicas automáticas operadas pelo CPTEC/INPE para a publicação do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.* 2006). Porém, fazendo uso de parametrizações de aerossóis atmosféricos baseados em valores climatológicos de visibilidade horizontal, o BRASIL-SR desconsiderou uma importante situação que impacta na quantidade de aerossóis na atmosfera, em especial na estação seca: a queima de biomassa no centro-norte do país e a de combustíveis fósseis nas grandes cidades brasileiras.

Como a concentração de aerossóis atmosféricos influencia diretamente na quantidade de radiação solar que chega a superfície, uma das maneiras encontradas para atenuar os problemas nas parametrizações foi a geração de uma nova base climatológica de visibilidade horizontal, mais apropriada ao cenário de queima de biomassa e do crescimento das regiões metropolitanas. Neste trabalho serão apresentados resultados preliminares de estudos para o ano de 2007, nos meses de março e setembro, identificados como aqueles onde foram encontrados os maiores e menores valores de visibilidade horizontal, respectivamente.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Dados de visibilidade horizontal

Foram utilizados dados de visibilidade horizontal (mínima, máxima e média) e umidade relativa (mínima, máxima e média) entre os anos de 2006 e 2008, de 77 aeroportos na América do Sul, dispostos em médias diárias, obtidos junto a base do Weather Underground (<http://www.wunderground.com>), estando apresentadas na Figura 1 como os pontos em azul. Visando complementar esta base, também foram utilizados dados horários de visibilidade horizontal, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e informação de tempo presente, oriundos de mensagens METAR obtidas do Banco de Dados Meteorológicos do CPTEC/INPE (<http://bancodedados.cptec.inpe.br/downloadBDM/>), acrescentando

outros 28 aeroportos no Brasil, para o mesmo período; estas estações estão apresentadas como os pontos em vermelho na Figura 01. Assim, foram utilizados dados de 105 estações.

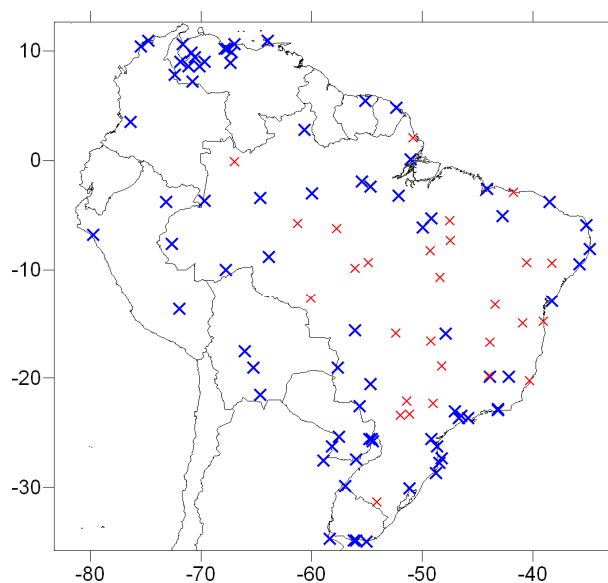


Figura 01: Estações utilizadas neste trabalho. Em azul, estações com dados diários; em vermelho, as estações com dados horários.

A metodologia para o tratamento dos dados foi baseada em alguns dos critérios sugeridos por Husar *et al* (2000). O processamento inicial buscou a exclusão de registros onde os baixos valores de visibilidade horizontal pudessem ocorrer em função da presença de hidrometeoros associados a fenômenos meteorológicos e não aos aerossóis. Além disso, também foram eliminados valores de visibilidade horizontal incoerentes com as condições de tempo.

Para o primeiro caso, foi implementada uma rotina computacional que realizou a exclusão dos registros diários onde a média da umidade relativa fosse igual ou superior a 90%. No caso dos dados horários, um critério similar foi aplicado, sendo excluídos os registros onde a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho fosse inferior que 2,2 ° C. Para a eliminação de valores espúrios de visibilidade horizontal, os menores e os maiores valores de visibilidade foram selecionados e confrontados com o campo de informação do tempo presente; após isso, foi manualmente verificado se o valor era coerente com a condição informada. Caso negativo, o dado era excluído.

Uma segunda rotina computacional transformou os dados em médias mensais, para que as interpolações pudessem ser realizadas. Por tratarem-se de dados irregularmente espaçados, optou-se pela interpolação por *Kriging*, através do software *Surfer* 8.01, da *Golden Software*. Ele utiliza uma análise geoestatística para averiguar e identificar padrões na estrutura dos dados, onde quanto mais próxima da curva encontrada estiver de um dos modelos existentes, mais precisa será a análise estrutural.

## 2.2 Modelo de transferência radiativa BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico utilizado na obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície. Foi desenvolvido pela grupo de Energias e Recursos Renováveis do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE), em conjunto com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo com base no modelo alemão IMGK (Stuhlmann *et al*, 1990). Utilizando a aproximação de “Dois-fluxos” na solução da equação de transferência radiativa, o modelo faz uso de dados climatológicos (temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica) e elevação da superfície, além de informações de cobertura de nuvens estimadas de forma estatística a partir de imagens de satélite geoestacionário. O modelo assume que a cobertura de nuvens é considerada como principal fator de modulação da transmitância atmosférica (Martins, 2001). A figura 02 ilustra este processo.

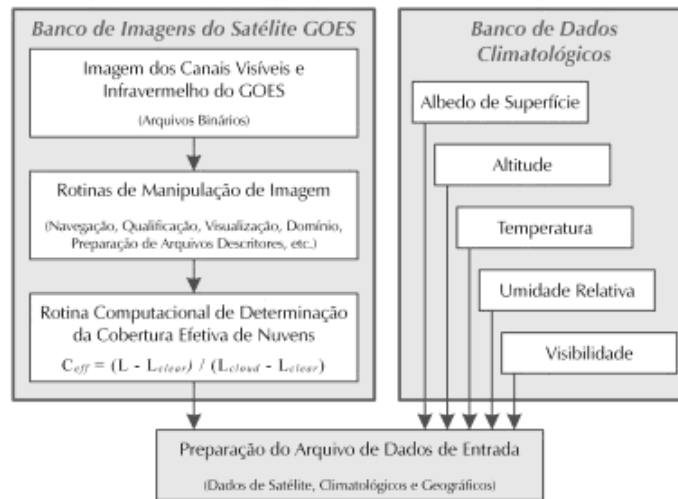


Figura 02 – Geração dos dados de entrada do modelo BRASIL-SR.

O coeficiente de cobertura efetiva de nuvens,  $n_{\text{eff}}$ , é determinado por meio de uma relação linear entre condições de céu claro e encoberto. Este coeficiente descreve a distribuição espacial e espessura óptica das nuvens, sendo obtido pela Eq. 01:

$$n_{\text{eff}} = \frac{[L - L_{\text{clr}}]}{[L_{\text{cld}} - L_{\text{clr}}]} \quad (01)$$

onde  $L$  é a radiância visível medida pelo canal 1 (0.52–0.75  $\mu\text{m}$ ) do GOES-8,  $L_{\text{clr}}$  e  $L_{\text{cld}}$  são as radiâncias medidas no mesmo canal em condições de céu claro e encoberto. Os valores de  $L_{\text{clr}}$  e  $L_{\text{cld}}$  são produzidos através de análises estatísticas de imagens do satélite GOES. O processo de identificação de situações de céu claro e céu encoberto utiliza um algoritmo que avalia a relação entre as radiâncias dos canais infravermelho (4–10.2–11.2  $\mu\text{m}$ ) e visível (1–0.52–0.75  $\mu\text{m}$ ) medidas para cada pixel (Martins *et al*, 2003). Martins e Pereira (2006) mencionam que a confiabilidade de  $n_{\text{eff}}$  é um fator importante para a acurácia das estimativas solares.

Após o tratamento dos dados climatológicos e das imagens de satélite, o modelo resolve a equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de Dois-Fluxos assumindo que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera  $F_0$  está linearmente distribuído entre aquelas que são as duas condições atmosféricas extremas, céu claro e céu encoberto. 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 a irradiação solar à superfície  $F_1$  é obtida através da Eq. (02).

$$F_1 = F_0 \{ \tau_{\text{clear}}(1 - n_{\text{eff}}) + \tau_{\text{cloud}}n_{\text{eff}} \} \quad (02)$$

O modelo BRASIL-SR divide o espectro de radiação solar em 135 intervalos e a atmosfera em 30 camadas. São considerados processos radiativos como interação com nuvens, espalhamento Rayleigh devido aos gases atmosféricos, absorção por gases atmosféricos ( $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$  e vapor d'água), espalhamento Mie devido aos aerossóis. A concentração de cada constituinte, bem como a temperatura e a espessura de cada camada atmosférica, são estabelecidos com base no tipo de atmosfera, selecionado com base no valor climatológico da temperatura do ar na superfície. A Eq. (02) é utilizada depois que as transmitâncias são obtidas, para cálculo da radiação incidente. Foi demonstrado por Colle e Pereira (1998) que essa aproximação, bastante simples, apresenta bons resultados. O fluxograma exposto na Figura 03 mostra a sequência de execução do modelo.

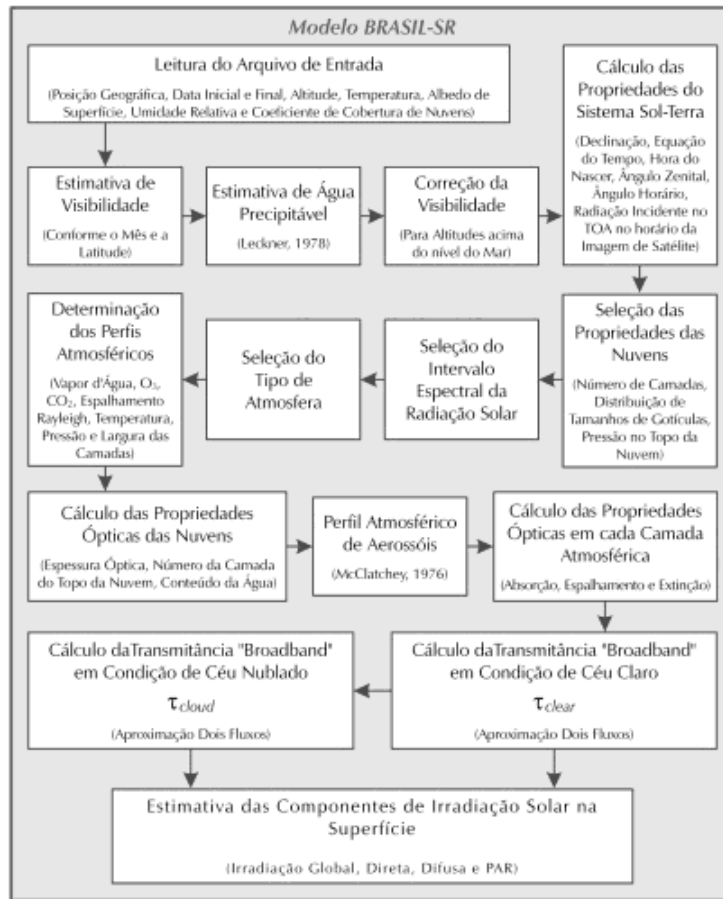


Figura 03 – Fluxograma do modelo computacional BRASIL-SR. Fonte: Martins *et al*, 2001.

**Parametrização de aerossóis no BRASIL-SR.** A concentração de aerossóis é determinada nas camadas atmosféricas a partir de perfis continentais desenvolvidos por McClatchey *et al* (1972), sofrendo modificações em seus primeiros 5 km acima da superfície em função de valores climatológicos de visibilidade ao nível médio do mar (Leckner, 1978; Selby e McClatchey, 1975). Os valores de visibilidade são distribuídos com uma variação de 2,5° de latitude e do mês do ano, estando de acordo com outros estudos realizados (Stuhlmann, 2000) sendo corrigidos de forma empírica para a elevação do solo. A transmitância para a radiação solar direta dos aerossóis é baseada em Angström (1964):

$$\tau_{a\lambda} = e^{(-\beta\lambda^{-\alpha}m)} \quad (03)$$

onde  $\beta$  é o coeficiente de turbidez de Angström,  $\alpha$  é o expoente de comprimento de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação solar e  $m$  é a massa óptica dos aerossóis. Este produto é modelado em três intervalos de altitude: menor que 2 km, entre 2 km e 10 km e maior que 10 km.

Tratam-se parametrizações bastante simplificadas, que se não fizerem uso de valores próximos das condições de visibilidade horizontal observadas podem induzir a erros significativos nos estimativas produzidas de irradiação solar na superfície. Deve-se ter em mente que os estudos anteriores indicaram que as estimativas de radiação foram satisfatórias em condições de céu claro, ou onde não existiam fontes antrópicas significativas de aerossóis. Estimativas em grandes regiões urbanas, ou em regiões de ocorrência de queimadas possuem condições fora das médias climatológicas de visibilidade apresentam desvios elevados, podendo atingir valores de até 60% em alguns dias do ano (Martins, 2001).

### 3. RESULTADOS

A Figura 04 apresenta os mapas de visibilidade horizontal (em km) gerados para os meses de março (a) e setembro (b) de 2007. Observa-se valores de visibilidade entre 9,9 km e 10,6 km no mês de março. Para o mês de setembro, os valores de visibilidade horizontal observados estão entre 6,6 km e 10,4 km. Pode-se atentar para a redução significativa da visibilidade na região centro-norte do país em setembro (6,4 km e 8 km) quando comparado com o mês de março (superior a 10 km).

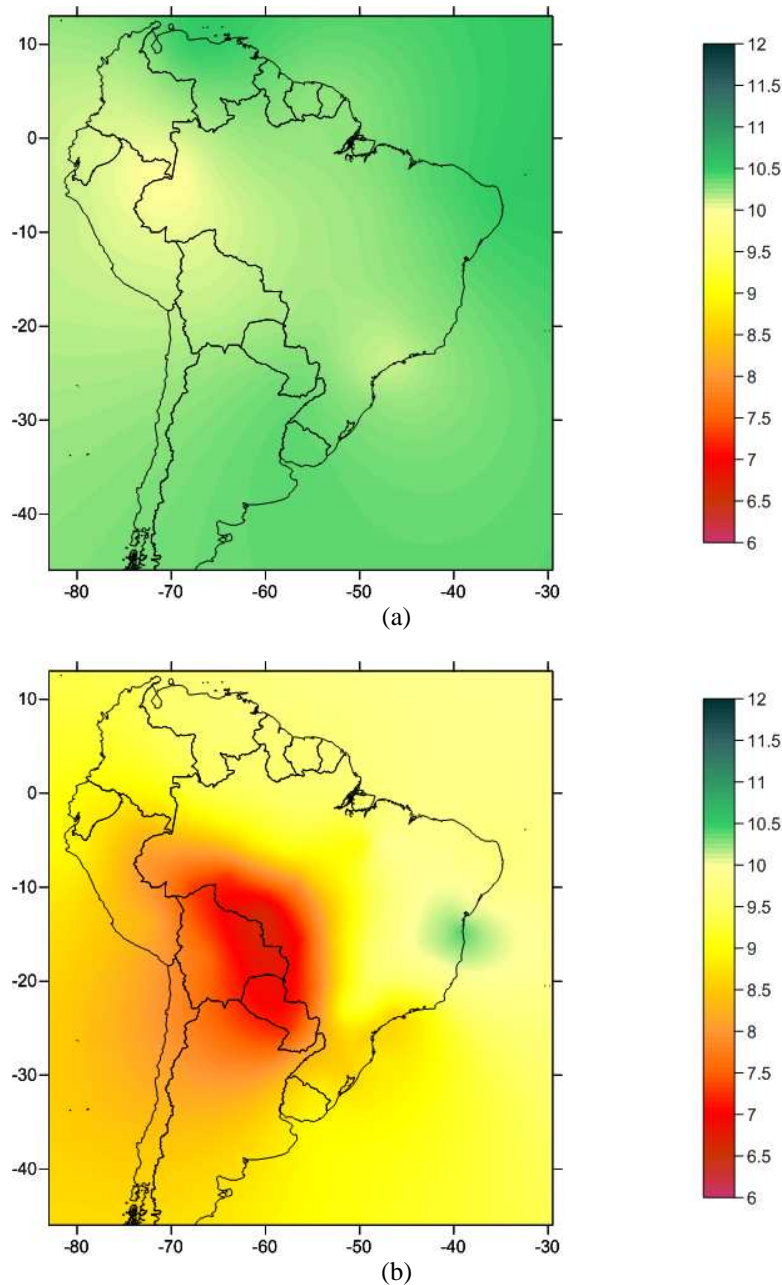


Figura 04 – Mapas de visibilidade horizontal (km) dos meses de março (a) e setembro (b) de 2007.

Definimos como mapas de diferença aqueles gerados a partir da diferença entre as rodadas do modelo BRASIL-SR utilizando a visibilidade horizontal climatológica e as rodadas com a visibilidade horizontal atualizada. Assim, as Figuras 05 e 06 apresentam os mapas de diferença de radiação global, direta e difusa (em  $W/m^2$ ) para os meses de março e setembro de 2007, respectivamente. Conforme já mencionado, a visibilidade horizontal climatológica varia apenas latitudinalmente, a cada  $2,5^\circ$ , para cada mês do ano. Quando os mapas de diferença foram gerados isso pode ser visualizado de maneira bastante evidente, pela acentuação dos valores obtidos, principalmente a partir de  $15^\circ S$ .

O mês de Março de 2007 (Figura 5), mesmo sendo aquele onde foram registrados os maiores valores de visibilidade horizontal, as diferenças ainda são bastante significativas em relação às estimativas obtidas utilizando os valores climatológicos anteriores. Os reflexos podem ser observados no mapa de diferença de radiação global (Figura 5a), que apresenta valores positivos sobre o território brasileiro, variando entre 50 e  $150 w / m^2$ .

Os mapas de radiação direta (Figura 5b) para Março apresentaram diferenças mais significativas após  $15^\circ S$ , faixa onde as diferenças entre os valores de visibilidade aumentam significativamente. Foram observados valores entre -150 e  $250 w / m^2$  no território brasileiro. No caso da radiação difusa (Figura 5c), a variação da diferença observada no território brasileiro esteve entre -85 e  $90 W/m^2$ .

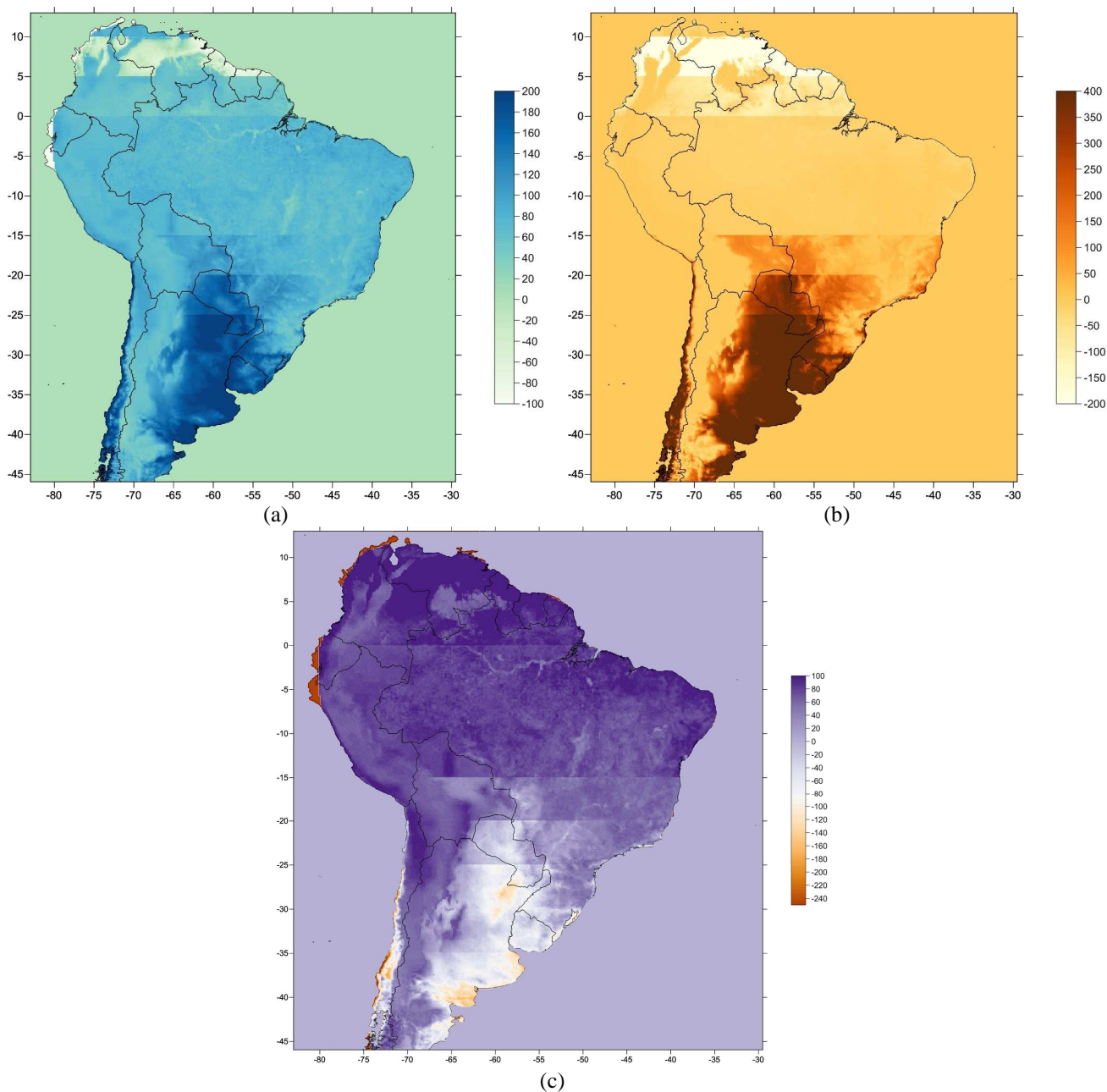


Figura 05 – Mapas de diferença de radiação global (a), direta (b) e difusa (c), em  $W/m^2$ , para o mês de Março de 2007.

As diferenças encontradas nas simulações ficaram bem mais evidentes no mês de Setembro, quando a visibilidade horizontal apresenta valores menores (Figura 6). As diferenças no mapa de irradiação global (Figura 6a), assim como o mapa do mês de Março, apresenta valores positivos sobre o território brasileiro, que variam entre 60 e 200  $W/m^2$ . As diferenças na irradiação direta (Figura 6b) observadas dentro do território brasileiro estavam entre 30 e 380  $W/m^2$  e para a irradiação difusa (Figura 6c), valores entre valores entre -250 e 60  $W/m^2$ . Importante salientar que essas diferenças foram obtidas apenas pela substituição dos arquivos de visibilidade horizontal, visando caracterizar a variabilidade das condições atmosféricas reais.

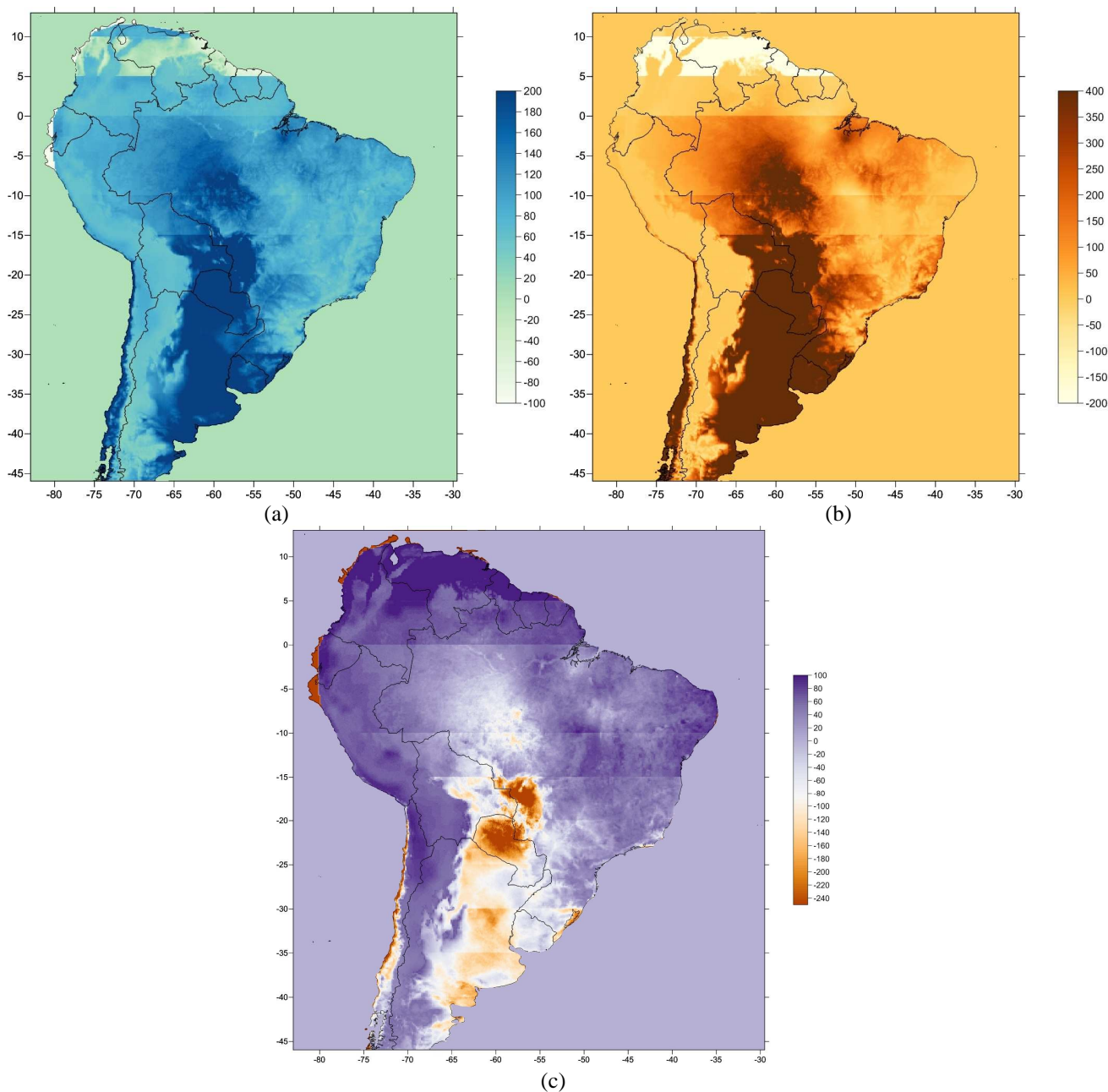


Figura 06 – Mapas de diferença de radiação global (a), direta (b) e difusa (c), em  $W/m^2$ , do mês de Setembro de 2007.

#### 4. CONCLUSÕES

Com o uso de valores de visibilidade horizontal mais próximos da realidade, o modelo BRASIL-SR apresentou diferenças significativas em seus resultados. De um modo geral, houve redução da irradiação global e irradiação direta, além do aumento da irradiação difusa na superfície. Esses resultados foram mais pronunciados na região Centro-Norte do Brasil, onde são observados os menores valores de visibilidade horizontal, em especial no mês de setembro de 2007. Esta redução está associada com o aumento da carga de aerossóis na atmosfera, reflexo do aumento de queimadas durante a estação seca.

#### REFERÊNCIAS

- Angstrom, A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16, 64-75, 1964.
- Colle, S.; Pereira, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil – 1ª. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
- Husar, R. B., Husar, J. D., Martin, L., Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. *Atmospheric Environment* 34, 5067-5078, 2000.

- Leckner, B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface elements of model, *Sol. Energy* 20, pp. 143–150, 1978.
- 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 Doutorado - INPE, São José dos Campos, 2001.
- Martins, F.R., Pereira, E.B. Parameterization of aerosols from burning biomass in the Brazil-SR radiative transfer model. *Solar Energy* 80, 231–239, 2006.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Abreu, S. L., Beyer, H. G., Colle, S., Perez, R., Heinemann, D.. Cross validation of satellite radiation transfer models during SWERA project in Brazil. *Proceedings of ISES Solar World Congress 2003-Solar Energy for Sustainable Future in Goteborg, Sweden*, June 2003.
- McClatchey, R. A., W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and J. S. Garin,.: *Optical properties of the atmosphere*. AFGL-71-0279, Air Force Cambridge Research Laboratories, 85pp, 1972.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Rüther, R. *Atlas brasileiro de energia solar*. INPE, São José dos Campos, 2006.
- Selby I. E. A., McClatchey R. E. *Atmospheric transmittance from 0.25–28.5  $\mu$ m*, computer code LOWTRAN 3, AFCLR-TR- 75–0255, 1975.
- Stuhlmann, R., Rieland, M., E. Raschke. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *J. Appl. Meteor.* 29, 1990.