

RELATÓRIO PRELIMINAR DE VALIDAÇÃO E INTERCOMPARAÇÃO DOS MODELOS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA ADOTADOS NO PROJETO SWERA

Objetivo

Este documento tem por objetivo apresentar os resultados obtidos até o momento na etapa de validação cruzada dos diversos modelos de transferência radiativa adotados no Projeto SWERA.

Data deste documento

A última modificação deste documento foi realizada em: 15/09/2003.

Descrição do documento

Neste documento são apresentados e discutidos os desvios apresentados pelos modelos de transferência radiativa BRASIL-SR (Martins, 2001; Stuhlmann et al. 1990) e SUNY-ALBANY (Perez et al., 2002) adotados no Projeto SWERA. As estimativas de irradiação solar global dos modelos NREL e DLR ainda não foram disponibilizados e, portanto não fazem parte deste documento. Um relatório mais completo sobre a etapa de validação e intercomparação dos modelos de transferência radiativa deve ser disponibilizado em breve incluindo os resultados dos dois últimos.

O modelo HELIOSAT foi incluído nesta etapa como um modelo computacional de referência com a finalidade de permitir uma comparação dos modelos empregados no Projeto SWERA com um modelo reconhecido pela comunidade científica e empregado na produção de mapas de irradiação solar para a Europa (Beyer et al., 1996; Cano et al., 1986).

No presente documento são apresentados apenas os resultados obtidos para a irradiação global. Os desvios apresentados na estimativa da irradiação difusa por cada um dos modelos serão apresentados e discutidos em um próximo relatório.

Metodologia

Os modelos foram aplicados para a obtenção de estimativas de irradiação solar global em 3 localidades onde se encontram estações de medida em superfície: Caicó, Florianópolis e Balbina. A Tabela 1 apresenta as características de cada uma das estações de medida em superfície. A localização das estações foi selecionada de modo que permitisse a avaliação dos modelos em regiões com características climáticas e ambientais distintas.

A estação em Caicó está localizada em um local que apresenta alta insolação com cerca de 120 dias de sol por ano e precipitação pluviométrica anual menor que 700mm. Essa característica é muito importante para validação e ajuste dos modelos de transferência radiativa para a condição de céu claro. A cobertura vegetal do solo é a característica da região semi-árida do nordeste brasileiro: caatinga. Esta estação entrou em operação no mês de Novembro/2002 com objetivo de produzir dados de radiação solar global e direta para validação dos modelos adotados no Projeto SWERA.

A estação de Florianópolis está localizada dentro de uma cidade litorânea de médio porte da região sul do Brasil. O clima nessa região apresenta temperaturas mais amenas do que nas demais estações de medida e o regime de chuvas é bem distribuído ao longo de todo o ano. Esta estação está em operação desde 1991 e faz parte da “Baseline Solar Radiation Network” (BSRN). A estação dispõe de equipamentos para medição da radiação global, difusa e direta.

A estação de Balbina está localizada na região Amazônica, nas proximidades do lago da Hidroelétrica de Balbina. Esta estação também está associada à BSRN e dispõe de equipamentos para realizar medidas de radiação solar global, direta e difusa. Durante o período de estudo apresentado neste relatório, a estação apresentou diversos problemas de operação em função de sua localização remota que dificulta a manutenção periódica dos equipamentos de medida. Devido a esse fato, apenas uma pequena parcela dos dados estava disponível para uso na validação dos modelos. Uma característica importante da região onde Balbina está localizada refere-se à concentração da pluviosidade no período de Novembro a Abril. Nesse período é possível a ocorrência de nebulosidade permanente, isto é, a presença de nuvens em todas as imagens de satélite obtidas em um horário específico de um mês em estudo. A ocorrência de nebulosidade permanente dificulta a determinação do coeficiente de cobertura de nuvens adotado pelos modelos de transferência radiativa adotados no Projeto SWERA e pode acarretar desvios sistemáticos significativos nas estimativas de radiação.

Tabela 1. Características físicas das estações de medida de radiação solar utilizadas na validação dos modelos de transferência radiativa.

Estação	Latitude Longitude	Altitude (m)	Mês	T média (°C)	UR média (%)	Albedo médio	Outras características
Caicó	6°28'01''S 37°05'05''W	175,85	Nov	27,98	60,5	0,134	Instalada como referência do Projeto SWERA
			Dec	28,25	64,6	0,136	
			Jan	28,06	74,6	0,138	
			Fev	28,22	82,9	0,145	
Florianópolis	27°34'18''S 48°31'42''W	12	Nov	21,53	86,2	0,164	Associada à BSRN
			Dec	23,52	87,2	0,168	
			Jan	22,99	88,6	0,167	
			Fev	24,16	89,6	0,173	
Balbina	1°55'07''S 59°25'59''W	230	Nov	28,33	94,1	0,133	Associada à BSRN
			Dec	27,83	95,1	0,134	
			Jan	26,91	95,4	0,131	
			Fev	27,03	95,1	0,133	

Os modelos BRASIL-SR e SUNY-ALBANY foram utilizados para calcular estimativas de irradiação solar global para os horários 8:45UTC, 11:45UTC, 14:45UTC, 17:45UTC, 20:45UTC que correspondem aos horários das imagens da América do Sul obtidas pelo satélite GOES-8. O intervalo de integração adotado foi de uma hora em torno do horário da aquisição da imagem. As estimativas e valores medidos de irradiação foram comparados em base horária e base diária. As estimativas para a irradiação solar global diária foram obtidas adotando a convenção de somar apenas as estimativas obtidas para cada horário da imagem de satélite sem uso de interpolação para os horários intermediários entre as imagens e para o início e fim do dia.

O modelo BRASIL-SR adotou, também, o valor limite de 80° para o ângulo zenital solar a fim de minimizar erros causados na modelagem atmosférica quando o Sol está muito baixo no horizonte. Dessa forma, o modelo SUNY-ALBANY apresenta maior quantidade de estimativas horárias do que o modelo BRASIL-SR em razão de que o primeiro determinou estimativas para os horários das 8:45UTC em Florianópolis e Caicó; e 20:45UTC em Caicó que apresentaram ângulos zenitais solares superiores à 80°.

O modelo HELIOSAT utilizou imagens do satélite METEOSAT que apresentam maior resolução espacial e temporal do que as imagens do GOES-8 utilizadas pelos outros dois modelos. A Tabela 2 permite a comparação das características das imagens de satélite utilizadas pelo três modelos utilizados nesta etapa. A Figura 1 apresenta, a título de comparação, as imagens obtidas pelos satélites GOES-8 e METEOSAT na faixa espectral do visível.

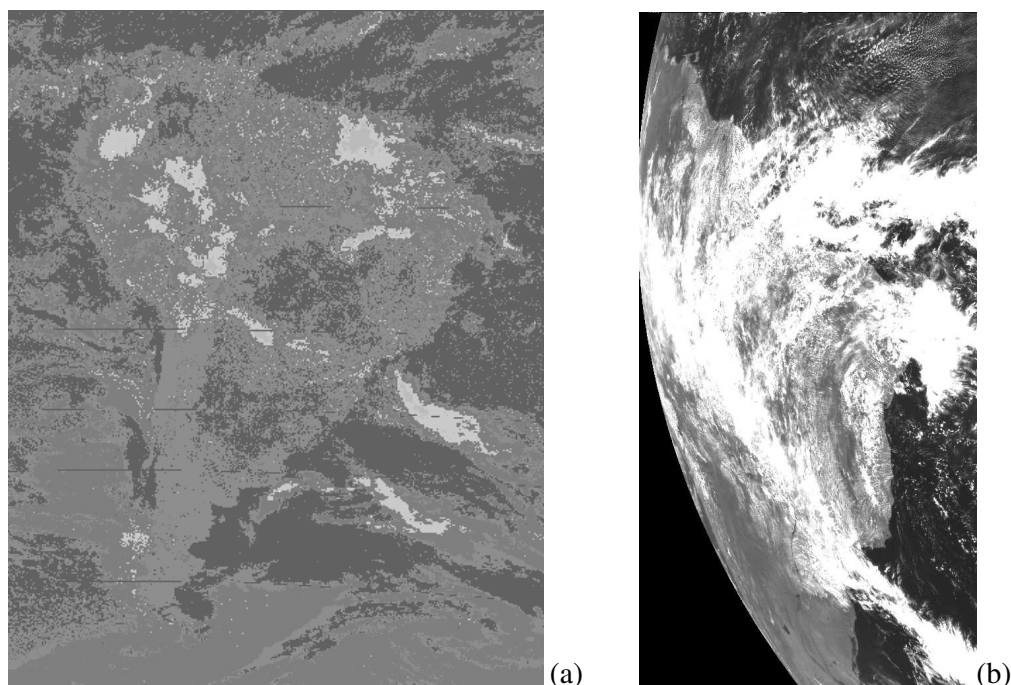


Figura 1. Imagens de satélite na faixa espectral do visível utilizadas na etapa de validação e intercomparação de modelos de transferência radiativa: (a) satélite GOES-8 e (b) satélite METEOSAT.

As Tabelas 3 e 4 apresentam o desvio sistemático médio relativo (rMBE) e o erro quadrático médio relativo (rRMSE) de cada um dos modelos de transferência radiativa nas bases horária e diária, respectivamente. O valor relativo de cada desvio foi determinado pela razão entre o desvio e o valor médio da irradiação solar média no período em estudo.

Os valores referentes ao modelo SUNY-ALBANY foram fornecidos pelo Dr. Richard Perez da State University of New York. Foi necessário um tratamento nos dados enviados do modelo SUNY-ALBANY a fim de recalculá-los os valores de rMBE e rRMSE na base diária utilizando os mesmos critérios adotados no modelo BRASIL-SR:

- soma apenas dos dados horários em que o ângulo zenital solar era superior a 80°
- no mínimo 3 horários de imagem de satélite disponível para o dia e que atenda o critério anterior.

Os valores referentes ao modelo HELIOSAT foram fornecidos pelo pesquisador Hans Georg Beyer da Universidade de Oldenburg (Alemanha). Nenhum tratamento adicional dos dados foi realizado neste caso uma vez que apenas os valores dos desvios foram fornecidos sem nenhuma informação sobre os valores das estimativas produzidas pelo modelo. Vale ressaltar que neste caso os resultados foram obtidos com a utilização de outro satélite (METEOSAT) cuja resolução temporal e espacial são superiores as do GOES.

Tabela 2. Características das imagens de satélite utilizadas pelos modelos de transferência radiativa.

Satélite	Modelo	Resolução Espacial	Resolução temporal	Nº. de imgs/dia
GOES-8	BRASIL-SR, SUNY-ALBANY	12km X 15km	3 horas	5
METEOSAT	HELIOSAT	4km X 4km	1 hora	12

Tabela 3. Valores de rMBE e rRMSE obtidos para as estimativas horárias nas 3 estações de medidas em superfície.

Mês	Modelo	Estações					
		Florianópolis		Caicó		Balbina	
		rMBE	rRMSE	rMBE	rRMSE	rMBE	rRMSE
Nov/2002	BRASIL-SR	-0,03	0,21	-0,05	0,21	dnd**	dnd**
	SUNY-ALBANY	nc*	nc*	nc*	nc*	dnd**	dnd**
	HELIOSAT	-0,01	0,23	-0,02	0,11	dnd**	dnd**
Dez/2002	BRASIL-SR	0,01	0,27	-0,01	0,17	dnd**	dnd**
	SUNY-ALBANY	nc*	nc*	-0,05	0,15	dnd**	dnd**
	HELIOSAT	nc*	nc*	0,03	0,18	dnd**	dnd**
Jan/2003	BRASIL-SR	0,02	0,26	-0,02	0,17	0,01	0,21
	SUNY-ALBANY	0,02	0,27	-0,01	0,22	nc*	nc*
	HELIOSAT	0,05	0,29	0,001	0,18	0,08	0,30
Fev/2003	BRASIL-SR	0,08	0,19	-0,04	0,18	-0,006	0,24
	SUNY-ALBANY	0,03	0,32	0,03	0,47	nc*	nc*
	HELIOSAT	0,09	0,24	0,01	0,20	-0,003	0,50

* nc - não calculado.

** dnd – dados de superfície não disponíveis.

As Figuras 2 e 3 apresentam a comparação gráfica entre valores dos desvios obtidos com os três modelos computacionais para a base horária e diária respectivamente. A partir da Figura 2 pode-se verificar que o modelo BRASIL-SR subestima os valores de irradiação solar global em Caicó em todos os meses em estudo, mas todos os três modelos apresentam valores absolutos de rMBE da mesma ordem de grandeza. O modelo BRASIL-SR apresentou os menores valores de rRMSE em Caicó em todos os meses com exceção de Novembro/2002 no qual o HELIOSAT apresentou um valor cerca de 50% menor. Em Florianópolis, pode-se verificar que todos os modelos apresentaram resultados semelhantes com uma variação do modelo que apresentou menor desvio MBE nos quatro meses em estudo. O modelo BRASIL-SR apresentou o menor rRMSE na comparação com os dados disponíveis para Florianópolis. O modelo SUNY-ALBANY não apresentou, até o momento, resultados para a estação localizada em Balbina. O modelo BRASIL-SR apresentou melhor desempenho que o modelo HELIOSAT em Balbina nos dois meses em estudo.

Tabela 4. Valores de rMBE e rRMSE obtidos para as estimativas diárias nas 3 estações de medidas em superfície.

Mês	Modelo	Estações					
		Florianópolis		Caicó		Balbina	
		rMBE	rRMSE	rMBE	rRMSE	rMBE	rRMSE
Nov/2002	BRASIL-SR	0,01	0,09	-0,04	0,13	dnd**	dnd**
	SUNY-ALBANY	nc*	nc*	nc*	nc*	dnd**	dnd**
	HELIOSAT	-0,01	0,08	-0,02	0,05	dnd**	dnd**
Dez/2002	BRASIL-SR	0,01	0,12	-0,04	0,06	dnd**	dnd**
	SUNY-ALBANY	0,04	0,14	-0,05	0,07	dnd**	dnd**
	HELIOSAT	nc*	nc*	0,03	0,06	dnd**	dnd**
Jan/2003	BRASIL-SR	0,03	0,13	-0,006	0,06	0,04	0,12

	SUNY-ALBANY	-0,004	0,11	0,02	0,09	nc*	nc*
	HELIOSAT	0,05	0,12	0,001	0,07	0,08	0,14
Fev/2003	BRASIL-SR	0,11	0,13	-0,04	0,15	0,08	0,14
	SUNY-ALBANY	nc*	nc*	-0,02	0,26	nc*	nc*
	HELIOSAT	0,09	0,12	0,01	0,06	-0,003	0,24

* nc - não calculado.

** dnd – dados de superfície não disponíveis.

A partir da análise da Figura 3, pode-se observar que os desvios das estimativas de irradiação global diária seguem o mesmo comportamento discutido anteriormente para as estimativas horárias. Deve-se assinalar um ponto a ser discutido sobre os valores de MBE apresentados para o modelo HELIOSAT. Os desvios MBE para a base horária e diária apresentam valores idênticos, de modo que se deve averiguar junto a fonte das informações sobre a possibilidade de erro nos valores fornecidos para a base diária.

As Figuras 4 e 5 apresentam a comparação gráfica entre valores horários estimados de irradiação solar global pelos modelos adotados no Projeto SWERA e os valores medidos nas estações de Florianópolis e Caicó, respectivamente. As Figuras 6 e 7 apresentam a mesma comparação para a soma diária em Florianópolis e Caicó. A comparação gráfica das estimativas produzida pelo modelo HELIOSAT não está apresentada em virtude de não se dispor ainda das informações necessárias conforme comentado.

Observando as Figuras 4 a 7 podemos verificar um comportamento bastante semelhante entre os modelos BRASIL-SR e SUNY-ALBANY, sendo que os gráficos referentes ao modelo BRASIL-SR apresentam uma dispersão ligeiramente menor do que os gráficos referentes ao modelo SUNY-ALBANY.

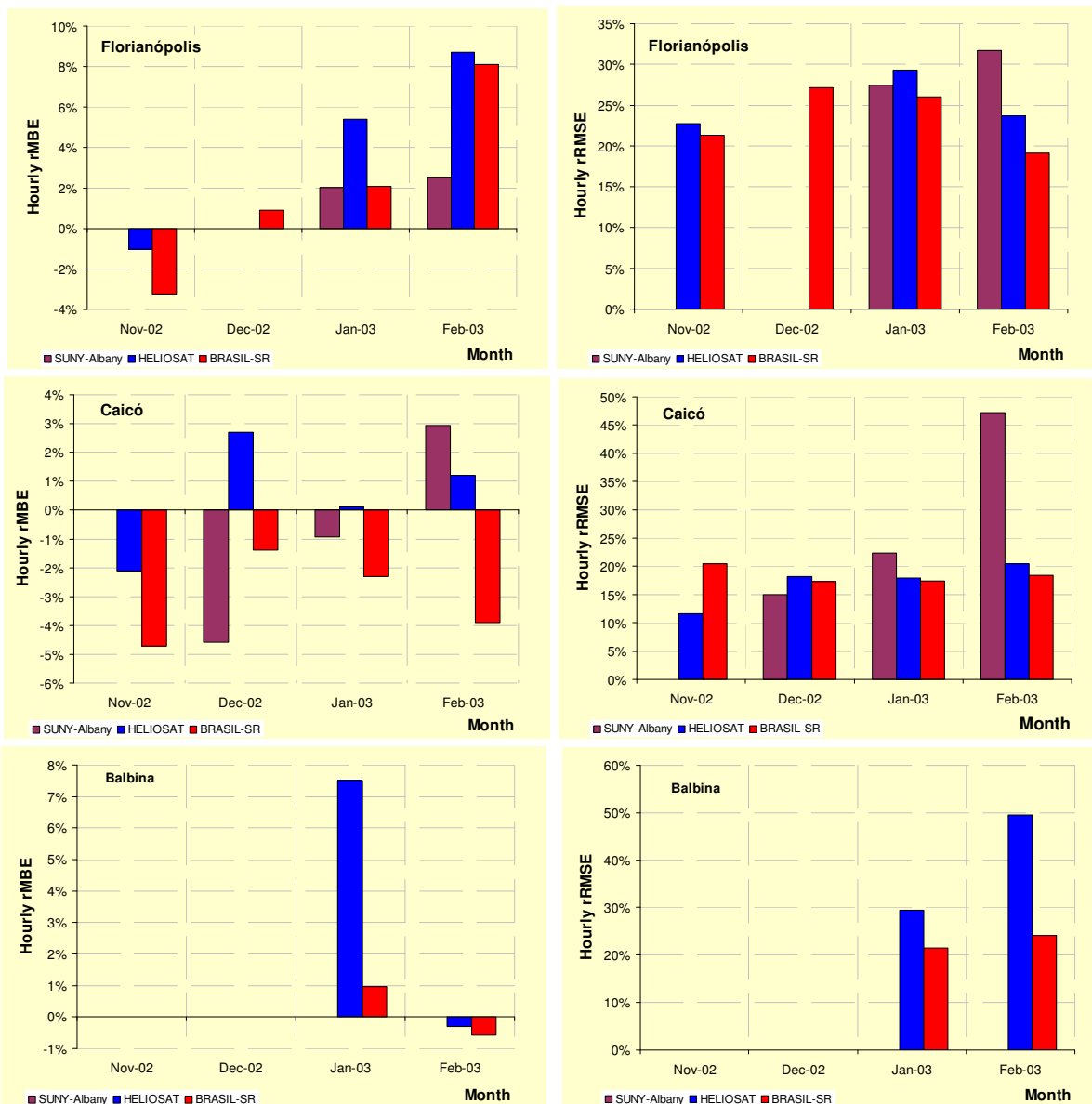


Figura 2. Comparação dos valores de rMBE e rRMSE para as estimativas horárias nos três locais de validação dos modelos de transferência radiativa.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os resultados da análise de correlação entre os valores medidos e estimados para cada um dos modelos nas bases horária e diária. Verifica-se que os coeficientes de correlação apresentam boa concordância na base horária e diária. Observa-se também que os valores de correlação são menores em Caicó que nas demais estações. A causa provável dessa ocorrência deve ser a determinação do coeficiente de nuvens. Caicó apresenta elevado número de dias sem precipitação, principalmente no período em estudo e a nebulosidade é composta principalmente por nuvens tipo “Cumulus de Bom Tempo” que é de difícil detecção nas imagens de satélite com a resolução adotada neste estudo. Tais nuvens podem ocasionar tanto o sombreamento temporário do equipamento de medida em superfície como um aumento do valor de radiação incidente no sensor em virtude do espalhamento causado pelas bordas das nuvens reduzindo dessa forma a correlação entre valores estimados e medidos.

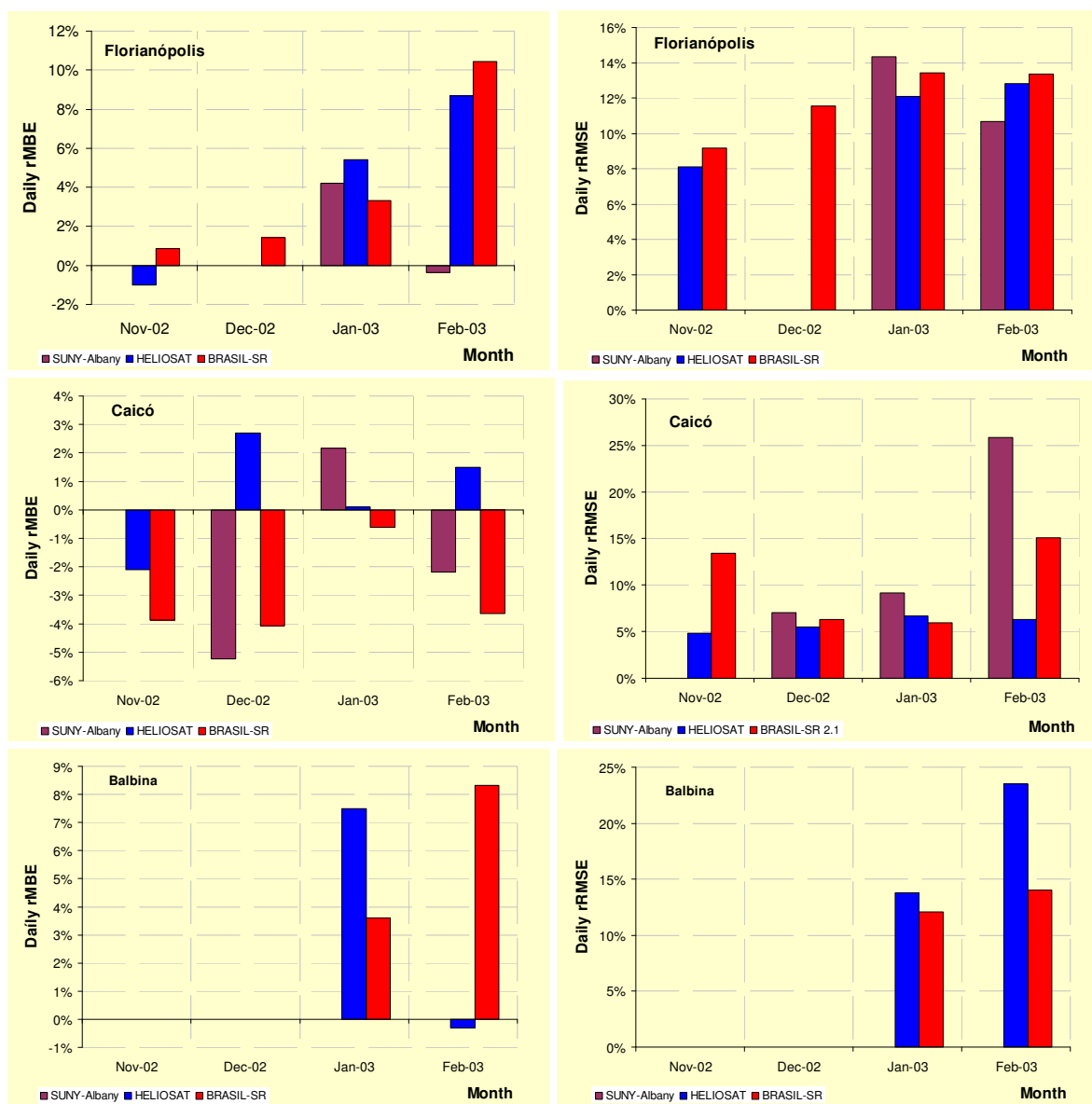


Figura 3. Comparação dos valores de rMBE e rRMSE para as estimativas diárias nos três locais de validação dos modelos de transferência radiativa.

Um aspecto que necessita melhor investigação refere-se ao fato de que para a localidade de Caicó o modelo SUNY_ALBANY apresenta estimativas horárias com melhor correlação com os dados de superfície enquanto que as somas diárias do modelo BRASIL-SR apresentam melhor correlação com as somas diárias dos dados de superfície.

Outro ponto que necessita ainda de um esclarecimento das causas são as baixas correlações obtidas para as somas diárias no mês de Novembro/2002 em Caicó e Janeiro/2003 em Balbina. Os valores de correlação para as estimativas produzidas pelo modelo HELIOSAT não foram determinadas pelo fato de que os valores das estimativas não estarem disponíveis.

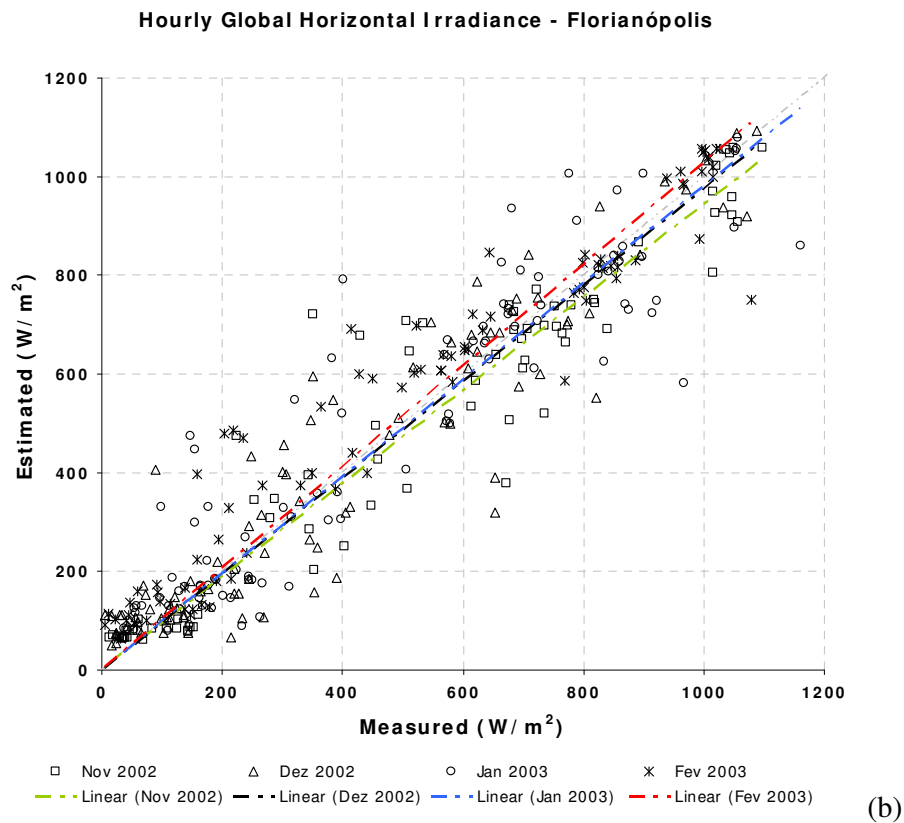
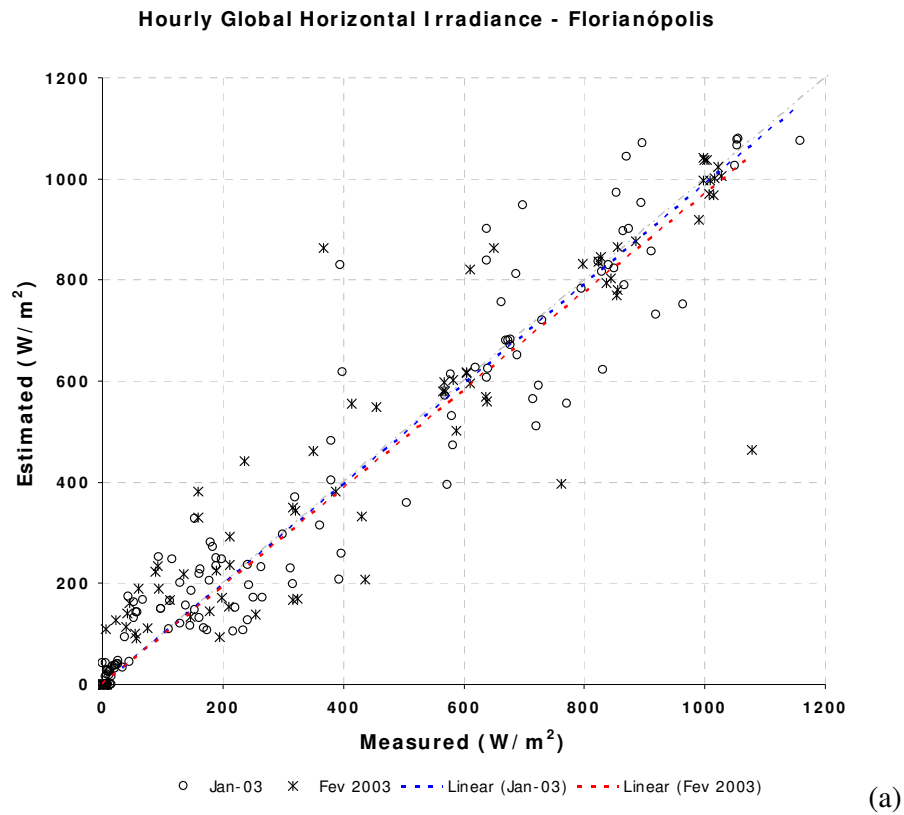


Figura 4. Comparação gráfica entre valores medidos e estimados na base horária para Florianópolis: (a) modelo SUNY-ALBANY e (b) modelo BRASIL-SR.

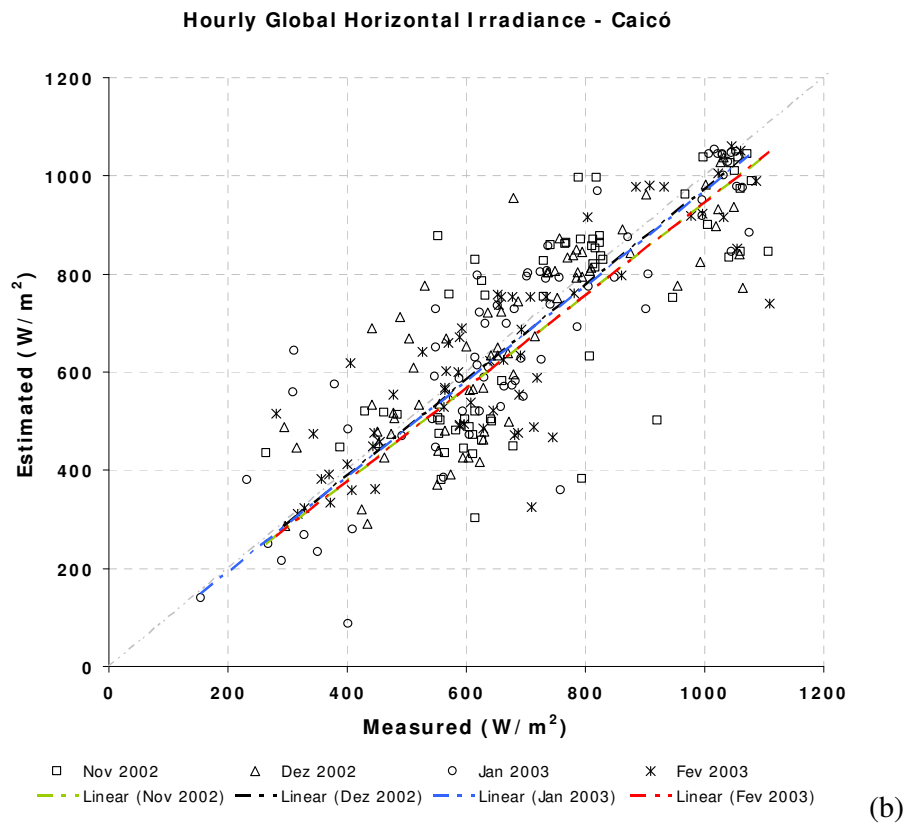
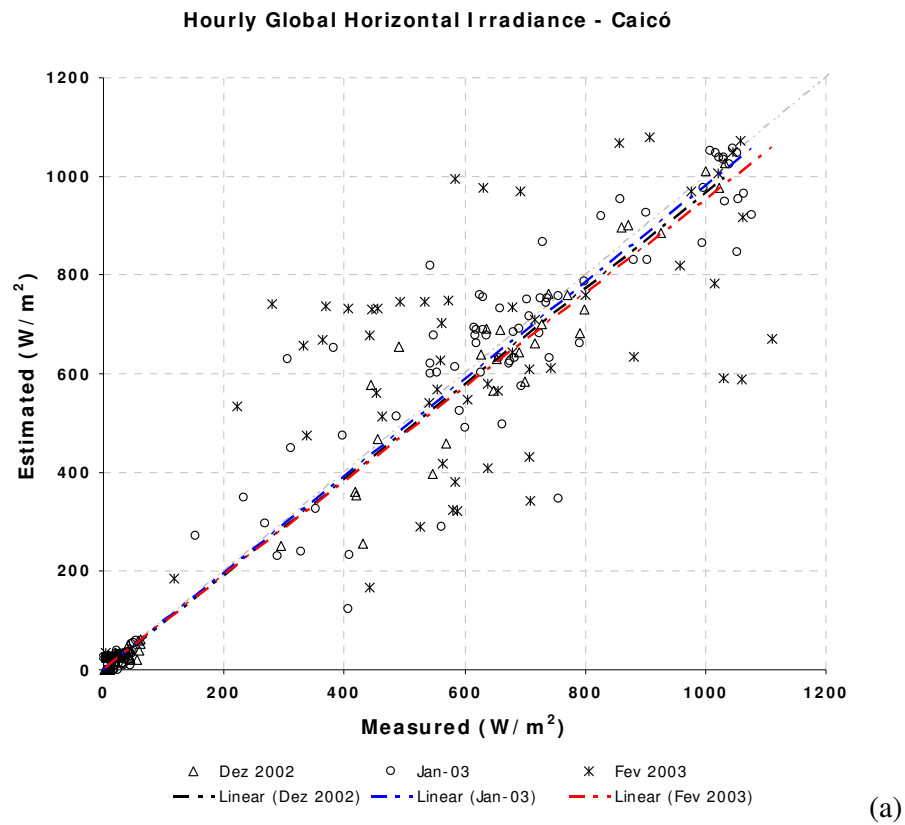
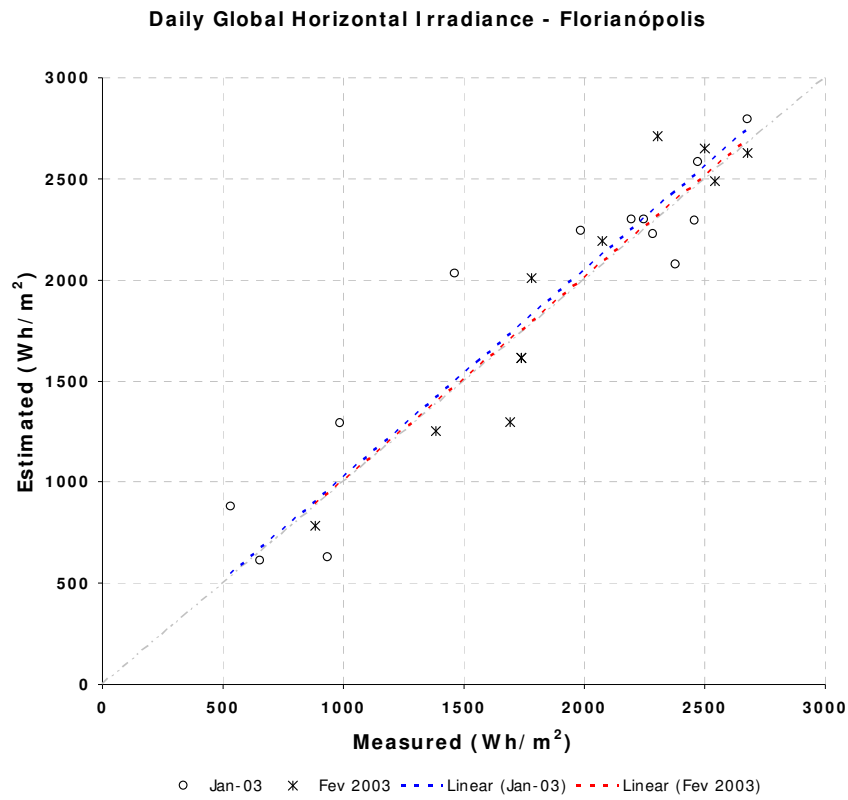
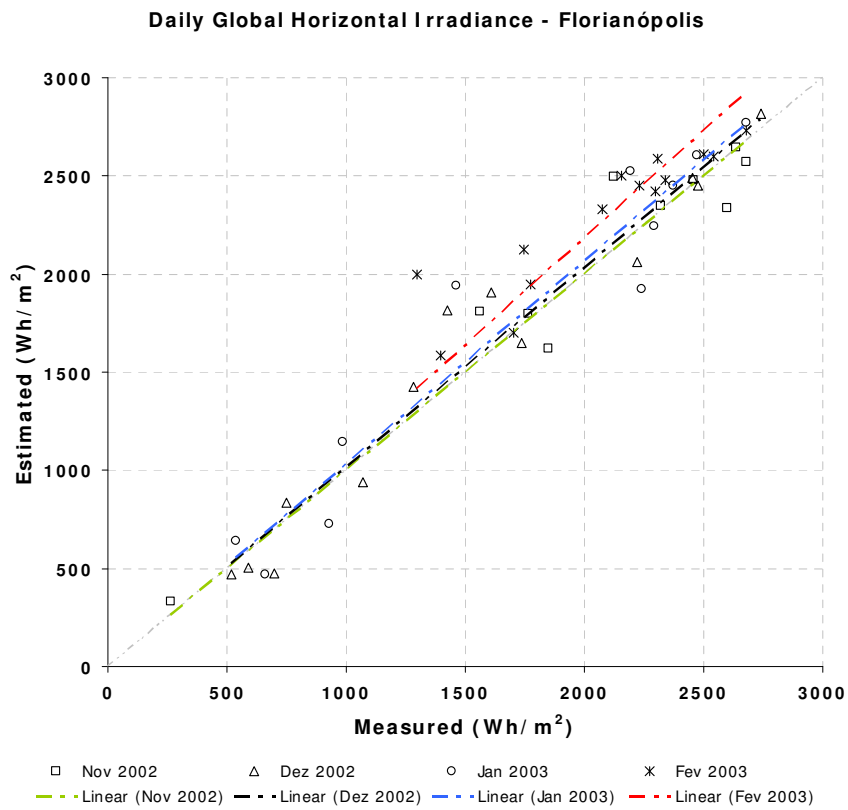


Figura 5. Comparação gráfica entre valores medidos e estimados na base horária para Caicó: (a) modelo SUNY-ALBANY e (b) modelo BRASIL-SR.

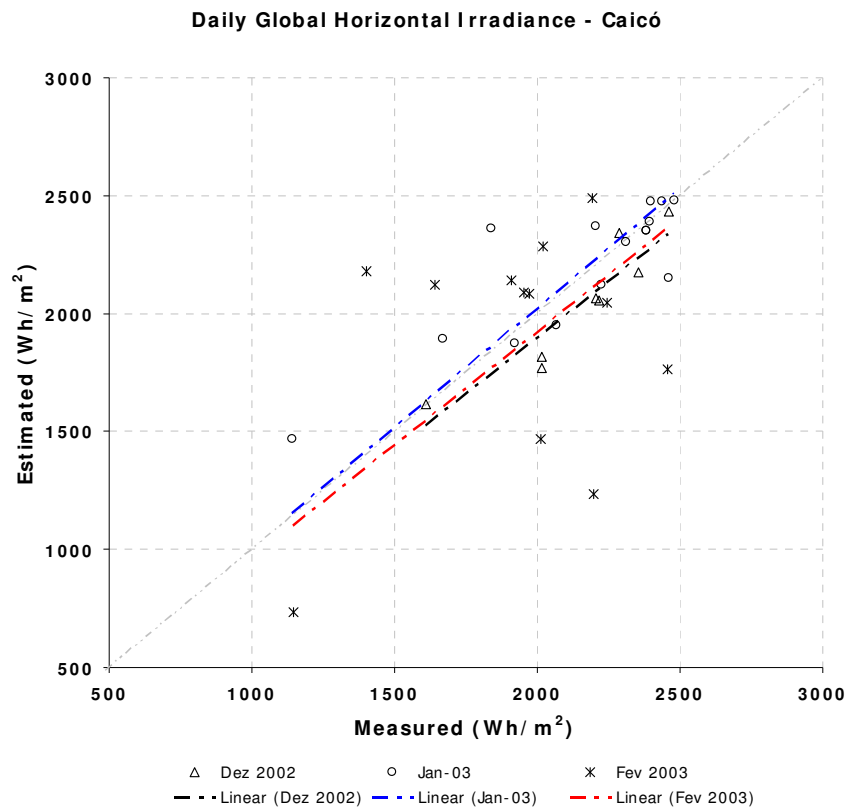


(a)

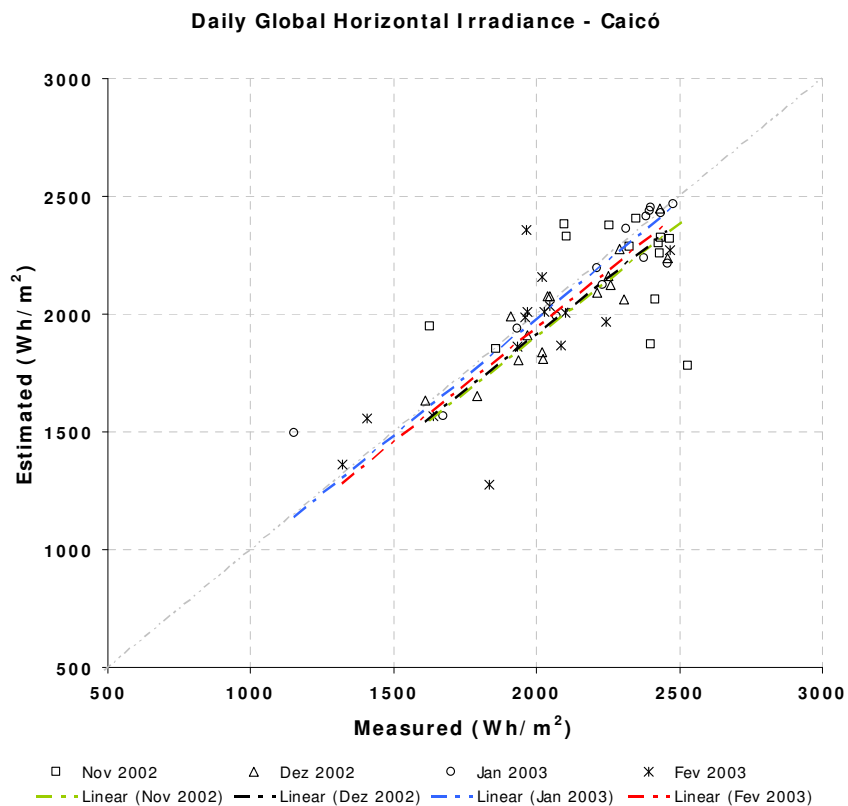


(b)

Figura 6. Comparação gráfica entre valores medidos e estimados na base diária para Florianópolis: (a) modelo SUNY-ALBANY e (b) modelo BRASIL-SR.



(a)



(b)

Figura 7. Comparação gráfica entre valores medidos e estimados na base diária para Caicó: (a) modelo SUNY-ALBANY e (b) modelo BRASIL-SR.

Tabela 5. Coeficiente de correlação entre valores horários estimados e medidos para as três estações de superfície utilizadas no processo de validação.

Estação de superfície	Meses	Modelos	
		BRASIL-SR	SUNY-ALBANY
Florianópolis	Nov 2002	0,95	nc*
	Dez 2002	0,94	nc*
	Jan 2003	0,92	0,96
	Fev 2003	0,97	0,95
	Todos	0,95	0,96
Caicó	Nov 2002	0,75	nc*
	Dez 2002	0,82	0,98
	Jan 2003	0,87	0,97
	Fev 2003	0,84	0,88
	Todos	0,83	0,94
Balbina	Jan 2003	0,93	nc*
	Fev 2003	0,92	nc*
	Todos	0,92	nc*

Tabela 6. Coeficiente de correlação entre as somas diárias dos valores estimados e medidos para as três estações de superfície utilizadas no processo de validação.

Estação de superfície	Meses	Modelos	
		BRASIL-SR	SUNY-ALBANY
Florianópolis	Nov 2002	0,96	nc*
	Dez 2002	0,98	nc*
	Jan 2003	0,96	0,94
	Fev 2003	0,91	0,95
	Todos	0,96	0,94
Caicó	Nov 2002	0,25	nc*
	Dez 2002	0,90	0,93
	Jan 2003	0,94	0,85
	Fev 2003	0,75	0,32
	Todos	0,78	0,61
Balbina	Jan 2003	0,12	nc*
	Fev 2003	0,90	nc*
	Todos	0,83	nc*

Referências

- H. G. Beyer, C. Costanzo, and D. Heinemann. Modifications of the HELIOSAT procedure for irradiance estimates from satellite data. *Solar Energy*, 56, 121– 207, 1996.
- D. Cano, J. Monget, M. Albuissou, H. Guillard, N. Regas, and L. Wald. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31– 39, 1986.
- F. R. Martins. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. PhD. Thesis. INPE (Brazilian Institute for Space Research). São José dos Campos, Brasil, 2001.
- R. Stuhlmann, M. Rieland, and E. Raschke. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data, *J. Appl. Meteor.*, 18, 586-603, 1990.
- R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George and F. Vignola, (2002): A New Operational Satellite-to-Irradiance Model. *Solar Energy* 73, 5, pp. 307-317.