

## ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DA NEBULOSIDADE E UMIDADE RELATIVA SOBRE A IRRADIAÇÃO SOLAR EM SUPERFÍCIE

Eduardo Weide Luiz<sup>1\*</sup>; Nelson Jorge Schuch<sup>1</sup>; Fernando Ramos Martins<sup>2</sup>; Marcio Ceconi<sup>1</sup>; Alexandre Ceretta Dalla Favera<sup>1</sup>; Enio Bueno Pereira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, em parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM, Santa Maria – RS.

<sup>2</sup> Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/INPE – MCT, São José dos Campos – SP.

### 1. Introdução

Recursos energéticos solares e eólicos são cada vez mais necessários devido à necessidade da substituição da geração de energia através de combustíveis fósseis, pois estes emitem grandes quantidades de gases poluentes na atmosfera. Entretanto, a atração de investimentos e a realização de ações efetivas ao desenvolvimento tecnológico e científico destas fontes energéticas requerem a geração e o fornecimento de informações confiáveis sobre a disponibilidade e distribuição desses recursos ao longo do Território Brasileiro (Pereira et al., 2006) [1].

Atualmente no Brasil, o Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais), coordenado pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE), em conjunto com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), tem o objetivo de gerar uma base de dados solarimétricos e meteorológicos que atenda a essa demanda de informações. O Projeto SONDA conta com uma rede de estações de medidas de superfície espalhadas pelo Território Brasileiro.

As melhores estimativas de irradiação solar para locais não monitorados por sensores de superfície são produzidas com o uso de modelos numéricos baseados em informações de satélite (Guarnieri et al., 2006) [2]. As principais fontes de incertezas destas estimativas são resultados da variabilidade geográfica dos aerossóis na atmosfera, juntamente com incertezas sobre a variabilidade da cobertura de nuvens (Pinker and Laszlo, 1989) [3]. Nesse contexto, os dados de irradiação solar na superfície coletados pelo Projeto SONDA são utilizados na validação e parametrização das estimativas e previsões fornecidas pelos modelos.

Desta forma, devido à importância e a complexidade da parametrização da nebulosidade e outros componentes atmosféricos na estimativa da radiação solar, o trabalho tem como objetivo o estudo da influência da nebulosidade e da umidade relativa do ar nos valores de irradiação solar global e direta medidos no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT. Os parâmetros estudados são a razão entre a irradiância solar global na superfície e no topo da atmosfera (TOA), referenciado por Kt, e a razão entre a irradiância solar direta e a incidente no TOA, referenciado por DDB-TOA.

### 2. Material e Métodos

No trabalho, desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, foram utilizados um Piranômetro CM21 (Kipp & Zonen), que mede a irradiância solar global, um Pireliômetro NIP (Eppley Laboratory, Inc), que mede a irradiância solar direta normal ao plano de incidência, um Imageador do céu TSI-440 (Yes, Inc.), que avalia as frações de nebulosidade, e um sensor de umidade do ar modelo 41372 (R.M. Young Co.), todos instalados na estação SONDA do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra – RS.

O período de dados analisados foi de Setembro de 2005 a Dezembro de 2006, sendo somente utilizadas os dados coletados com o ângulo zenital solar (SZA) inferior a 75 graus, com o intuito de evitar as situações em que as interações entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos, como nuvens, aerossóis e gases atmosféricos, tornarem-se mais complexas com o aumento do caminho óptico percorrido pela radiação, o que acaba dificultando correlações simples entre os valores de radiação solar e cobertura de nuvens.

O Imageador TSI-440 registra imagens do céu a cada 15 minutos, processando-as e determinando as frações fina e opaca de nebulosidade. O Piranômetro CM21 e o Pireliômetro NIP coletam dados a cada segundo, armazenando a média para o minuto, o que fornece 1440 medidas diárias de irradiância solar,

expressas em  $W/m^2$  (Watts por metro quadrado). Em virtude da diferença entre as resoluções temporais dos radiômetros e do Imageador, foram utilizados valores médios de irradiância solar global e direta e umidade relativa do ar para cada intervalo de 15 minutos centrado no horário de coleta das imagens do céu. Desta forma, os parâmetros  $K_t$  e DDB-TOA são calculados pela razão do valor médio da irradiância solar global e direta, respectivamente, medido na superfície terrestre, e o valor da irradiância solar no topo da atmosfera (TOA), referenciado por  $I_0$  e calculado por métodos numéricos descritos em Iqbal (1983) [4], conforme apresentado na Equação (1).

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\sum_{i=1}^{n=15} I_i / 15}{I_{SC} E_0 \cos \theta_z} \quad (1)$$

onde  $I_{SC}$  é a constante solar ( $1368 W.m^{-2}$ ),  $E_0$  é o fator de correção da excentricidade da órbita da Terra e  $\theta_z$  é o ângulo zenital solar no instante da medida.

Foram desenvolvidos modelos empíricos por regressão polinomial relacionando os parâmetros  $K_t$  de radiação global e DDB-TOA de radiação direta com as frações de cobertura de nuvens opaca e total, apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Modelos empíricos desenvolvidos para as frações opaca e total de nebulosidade.

Frações de Nebulosidade	Modelo Polinomial para Irradiância Solar Global	Modelo Polinomial para Irradiância Solar Direta
Opaca	$K_t=0,759-0,694x+0,748x^2-0,55x^3$	$1,061-2,225x+1,829x^2-0,523x^3$
Total	$K_t=0,771-0,756x+1,506x^2-1,217x^3$	$1,164-1,762x+0,83x^2$

Adicionalmente, foram desenvolvidos um modelo por regressão linear múltipla (RLM), utilizando as frações fina e opaca de nebulosidade (Equação 2), e um modelo por regressão polinomial múltipla (RPM) utilizando a fração total de nuvens e a umidade relativa do ar (Equação 3), para a estimativa do parâmetro  $K_t$ .

$$K_t=0,76-0,458X_{op}-0,122X_{fina} \quad (2)$$

onde  $X_{op}$  representa a fração de nuvens opacas e  $X_{fina}$  representa a fração de nuvens finas.

$$K_t=0,619-0,487X_{total}+0,644X_{total}^2-0,609X_{total}^3+0,0066RH-0,000067RH^2 \quad (3)$$

onde  $X_{total}$  é a fração total de nuvens e RH é a umidade relativa do ar.

Assim como o feito para as medidas de irradiância solar global, foi desenvolvido um modelo RLM utilizando as frações fina e opaca de nebulosidade para a estimativa do parâmetro DDB-TOA (Equação 4).

$$DDB-TOA=1,093-1,045X_{op}-0,821X_{fina} \quad (4)$$

Para avaliar a confiabilidade das estimativas fornecidas pelos modelos descritos acima, foram calculados os desvios estatísticos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidos na Equação (5), utilizando dados de Janeiro a Setembro de 2007. Os valores dos desvios são divididos pelo valor médio das medidas, expressando-se o resultado em porcentagem.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

### 3. Resultados e Discussão

Os desvios estatísticos MBE e RMSE entre as estimativas fornecidas pelos modelos polinomiais desenvolvidos com os dados de 2005 a 2006 e os de 2007, reservados para validação, são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** - Desvios estatísticos entre as estimativas dos modelos polinomiais e as medidas reservadas para validação. **ESTES VALORES ESTÃO EM %???**

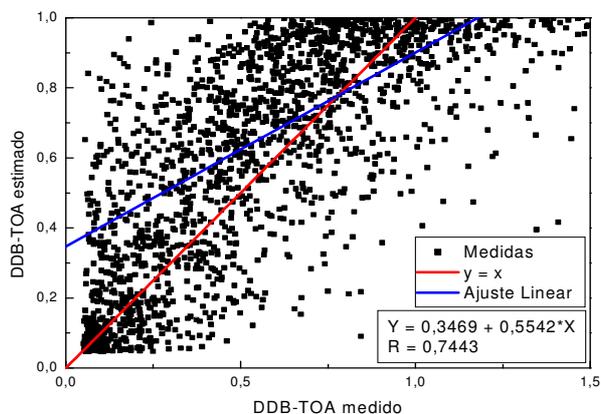
	Desvios Estatísticos	Polinomial (Global)	Polinomial (Direta)
Frações Opacas	MBE	0,078	-0,074
	RMSE	0,32	0,375
Frações Totais	MBE	0,062	0,00003
	RMSE	0,29	0,368

Os desvios estatísticos MBE e RMSE entre as estimativas do modelo RLM e as medidas coletadas no Observatório Espacial do Sul para o parâmetro  $K_t$  foram, respectivamente, de 0,078 e 0,31, e para o modelo RPM foram de 0,02 e 0,11, respectivamente.

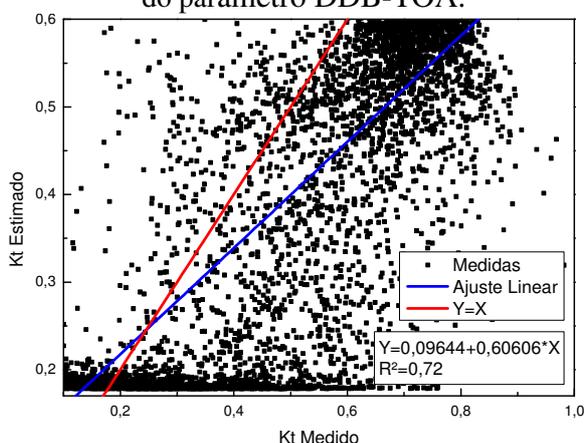
Da mesma maneira os desvios estatísticos MBE e RMSE calculados entre as estimativas do modelo RLM e as medidas reservadas para validação para o parâmetro DDB-TOA foram, respectivamente, -0,00013 e 0,378.

Ao observar os valores dos desvios estatísticos, nota-se que para a irradiância solar direta todos os modelos calculados tem um desempenho semelhante, com valores de RMSE em torno de 0,37. Já para a irradiância solar global o melhor modelo, com desvio RMSE de 0,17, foi por Regressão Polinomial Múltipla (RPM).

A dispersão das medidas de irradiância solar direta coletadas em superfície, em comparação com o modelo RLM para a estimativa do parâmetro DDB-TOA, é apresentada na Figura 1. A comparação entre o modelo RPM desenvolvido para estimativa do parâmetro  $K_t$  e as medidas de irradiância solar global é apresentada na Figura 2



**Fig.1** - Dispersão das medidas de irradiância solar direta, juntamente com o modelo RLM para a estimativa do parâmetro DDB-TOA.



**Fig. 2** – Dispersão das medidas de irradiância solar global, juntamente com o modelo RPM para a estimativa do parâmetro Kt.

#### 4. Conclusão

A análise dos desvios estatísticos MBE e RMSE permitiu concluir que tanto os modelos polinomiais quanto o modelo RLM, relacionando as frações de nebulosidade com o parâmetro Kt, apresentam desempenhos equivalentes. Para o modelo RPM pôde-se observar uma diminuição significativa nos valores dos desvios, indicando a melhora nos modelos pode ser consideravelmente alta com a adição de novos fatores atmosféricos. Já para o parâmetro DDB-TOA, observam-se correlações semelhantes em todos os modelos.

Ao analisar os gráficos das Figuras 1 e 2, percebe-se que a dispersão dos dados para o parâmetro Kt ainda é alta em comparação com a dispersão do parâmetro DDB-TOA, reforçando a necessidade de inclusão de outros fatores atmosféricos que influenciam na parametrização do mesmo. A continuidade do trabalho deverá investigar melhor essas outras variáveis que podem contribuir para a redução dos desvios apresentados pelos modelos na parametrização de Kt.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP/MCT e à Petrobras pelo financiamento do Projeto SONDA (Processo nº. 22.01.0569.00), ao Programa PCI – ITI – 1A/INPE - MCT pela aprovação do projeto de pesquisa e ao LACESM/CT – UFSM por apoios prestados.

## **Referências**

- [1] Pereira, E.B.; Martins F.R.; Abreu S.L.; Rütther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2006.
- [2] Guarnieri, R. A. Emprego de Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla no Refinamento das Previsões de Radiação Solar do Modelo Eta, Master Thesis, INPE, São José dos Campos, 2006.
- [3] Pinker, R.T., Laszlo, I., 1989. Derivation of surface solar radiation on a continental scale with the ISCCP B3 data. *IRS\_88 Current Problems*, 272–274.
- [4] Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*: Academic Press Canadá, Toronto, 390p.