

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR COM BASE EM IMAGENS DE SATÉLITE: ESTUDO DE CASO NA FRONTEIRA BRASIL-URUGUAI

ALEXANDRO GULARTE SCHAFFER¹, VIVIAN TEIXEIRA ALVES BRANCO², RODRIGO ALONSO SUÁREZ³

¹Dr. em Engenharia Civil, Prof. Adjunto, Unipampa, Bagé-RS, alexandro.schafer@unipampa.edu.br;

²Eng. de Energias, Prof. na Universidad Tecnológica del Uruguay, UTEC, Durazno-UY, vivian.teixeira@utec.edu.uy;

³Dr. em Engenharia, Prof. Universidad de la Republica, Udelar., Salto-UY, r.alonso.suarez@gmail.com.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
Palmas/TO – Brasil
17 a 19 de setembro de 2019

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo avaliar os modelos de estimativa de radiação solar JPT, JPT com adaptações (Mod1-JPT e Mod2-JPT) e BD-JPT quanto a estimativa de irradiação global em escala horária, na fronteira do Brasil com o Uruguai. Para tanto, os valores estimados pelos modelos (com base nos dados dos satélites GOES 8, 12 e 13) foram confrontados com valores registrados em estações meteorológicas do INMET localizadas nas cidades de Bagé, Jaguarão, Chuí, Dom Pedrito, Santana do Livramento e Uruguaiana. Os modelos JPT e variações foram ajustados para as cidades da área de estudo. Todos os dados passaram por etapas para garantir a integridade e qualidade dos resultados gerados. Como resultado, foram gerados dados de irradiação global em escala horária para um período de 13 anos (entre 2003 e 2016). O desvio médio quadrático foi de 20,2% para o modelo JPT, 14,6% para o JPT-Mod1, 14,5% para o modelo JPT-Mod2 e 15,00% para o modelo BD-JPT.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos de satélite, irradiação solar, imagens de satélite.

SOLAR IRRADIATION SURVEY USING GOES SATELLITE IMAGES: BRAZIL-URUGUAY CASE STUDY

ABSTRACT: This work aims to evaluate the models of solar radiation estimation JPT, JPT with adaptations (Mod1-JPT and Mod2-JPT) and BD-JPT as the estimation of global irradiation on an hourly scale, at the border of Brazil and Uruguay. In order to do so, the values estimated by the models (based on the GOES 8, 12 and 13 satellite data) were compared with values recorded in INMET meteorological stations located in the cities of Bagé, Jaguarão, Chuí, Dom Pedrito, Santana do Livramento and Uruguaiana. JPT models and variations were adjusted for the cities of the study area. All data has been phased in to ensure the integrity and quality of the results generated. As a result, global irradiation data were generated on a time scale for a period of 14 years (between 2000 and 2014). The mean square deviation was 20.2% for the JPT model, 14.6% for the JPT-Mod1 model, 14.5% for the JPT-Mod2 model and 15.00% for the BD-JPT model.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da radiação solar incidente no local do empreendimento é uma das informações fundamentais para implantação de instalações solares. Os radiômetros são umas das alternativas para a medição da radiação solar, no entanto, estes equipamentos são de alto custo e realizam medidas em um único ponto no espaço. De acordo com Perez et al. (2013) o uso de técnicas de modelagem, medidas terrestres e a interpolação de dados são utilizadas para o conhecimento da radiação solar incidente em locais específicos, entretanto, apresentam uma grande imprecisão. A detecção remota a partir de satélites geoestacionários é uma alternativa que vem sendo amplamente utilizada devido a possibilidade de espacialização dos dados. A maioria dos modelos de estimativa de irradiação desenvolvida ao longo dos últimos anos tem como base dados gerados por satélites orbitais (Vignola et al., 2012).

No Brasil a utilização de modelos de radiação solar com base em imagens de satélite teve início a partir do modelo IGMK (Pereira et al., 1996), que foi utilizado no modelo Brasil SR

(INMET/LABSOLAR, 1998). Este modelo foi aplicado para a elaboração do primeiro mapa solar do país. Além do modelo Brasil SR, outros modelos como GL e Tarpley vem sendo utilizados na América Latina. Recentemente Suárez et al. (2012), desenvolveu o modelo de estimativa de radiação solar BD-JPT, para o Uruguai, com resultados satisfatórios.

O objetivo deste estudo é avaliar os modelos de estimativa de radiação solar JPT, JPT com adaptações (JPT-Mod1 e JPT- Mod2) e BD-JPT quanto a estimativa de irradiação global em escala horária, na fronteira do Brasil com o Uruguai.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo é a região de fronteira entre Brasil e Uruguai, que se estende por aproximadamente 985 km ao longo do estado do Rio Grande do Sul. Utilizaram-se os dados de irradiação solar global das estações meteorológicas no INMET instaladas nos municípios de Chuí, Jaguarão, Bagé, Dom Pedrito, Santana do Livramento e Uruguaiana. A verificação da qualidade dos dados foi realizada: a) com base no cálculo do índice de claridade máximo em um período de 10 dias, fazendo um rastreamento em toda série temporal e; b) Análise gráfica das medidas de irradiação versus a irradiação estimada pelo modelo, possibilitando assim a identificação de discrepâncias das medidas.

As imagens usadas para os modelos de estimativa foram adquiridas pelo satélite geostacionário GOES-Leste (GOES 8, GOES 12 e GOES 13), através do canal visível, a uma frequência de 30 minutos. Os dados de satélite correspondem ao período de: a) 08/01/2000 a abril de 2003, para o GOES 8; b) Maio de 2003 a abril de 2010 para o GOES 12 e; c) Abril de 2013 até setembro de 2014 para o GOES 13. As imagens georreferenciadas no formato NetCDF foram descarregadas a partir do site CLASS/NOAA1, e consistem em uma matriz de brilho observada pelo radiômetro do satélite e digitalizadas em 10 bits. A conversão física desta informação adimensional para W/sr.m² foi realizada através de uma tabela disponibilizada pela NOAA. Para a correção da defasagem temporal criou-se um vetor minutal do fator de reflectância das imagens de satélite (Fr e Fr_0). A fim de verificar influência dos parâmetros de nebulosidade do modelo original JPT foram realizadas duas variações no modelo. A primeira considerada apenas o fator de refletância médio extraído da imagem de satélite (Fr), e é nomeada de JPT-Mod1 (Equação 1). A segunda variação do modelo, chamada de JPT-Mod2, são consideradas as informações de Fr e Fr_0 , no entanto, utilizando um índice inferior (Equação 2). irradiância global no plano horizontal (GHI)

$$GHI = G_s F_n \cos \theta_z (a + b \cos \theta_z + c \cos^2 \theta_z) + d(Fr) \quad \text{Equação 1}$$

$$GHI = G_s F_n \cos \theta_z (a + b \cos \theta_z + c \cos^2 \theta_z) + d(Fr - Fr_0) \quad \text{Equação 2}$$

Onde G_s = constante solar (1367 W/m²); F_n = distância Terra-Sol em unidades astronômica, θ_z = ângulo zênite, Os parâmetros a , b , c correspondem a parte de céu claro, e d representa a parte de condições de nebulosidade. As variáveis Fr (brilho médio) e Fr_0 (brilho médio para condição de céu claro) são extraídas das imagens de satélite a partir do canal visível.

O ajuste dos modelos JPT-Mod1, JPT-Mod2 e JPT tem como base as técnicas de regressão múltipla, similar ao método de mínimos quadrados, resultando em uma matriz X do tamanho do número de estimativas de irradiação analisados. A partir das medidas terrestres realizadas pelas estações do INMET, criou-se uma matriz chamada de Y , com tamanho do número de medidas realizadas em cada estação já filtradas durante a análise de integridade e qualidade. A partir dos valores das matrizes X e Y utilizando a técnica de regressão múltipla foram determinados os parâmetros dos modelos JPT-Mod1, JPT-Mod2 e JPT, para cada uma das cidades de estudo.

O desempenho do modelo de estimativa de irradiância global na escala horária foi avaliado utilizando a técnica de validação cruzada na etapa de ajuste e treinamento do modelo. Para tanto, 1/3 das amostras foram empregadas para estimativa do modelo e 2/3 no ajuste e treinamento dos parâmetros (a , b , c , d). Para validar os modelos foram realizadas comparações gráficas das estimativas horárias com as medidas de superfície realizadas pelo INMET em cada uma das estações analisadas neste estudo. Com o intuito de obter indicadores dos erros existentes, foram aplicados filtros para descartar estimativas em que $kT > 0,85$ e $\cos \theta_z < 0,1$ (medidas que

correspondem às primeiras e as últimas horas do dia). Os indicadores de erro utilizados neste trabalho foram o desvio médio de Biais (Equação 3) e o desvio médio quadrático RMS (Equação 4).

$$MBD = \sum X_e(i) - X_m(i) \quad \text{Equação 3}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_e(i) - X_m(i))^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: N = número dados estimados; X_e = valores de irradiação estimados e X_m = valores de irradiação medidos na Terra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores de irradiação média horária para o período analisado registrados nas estações do INMET.

Tabela 1. Irradiação global horária média registrada nas estações do INMET.

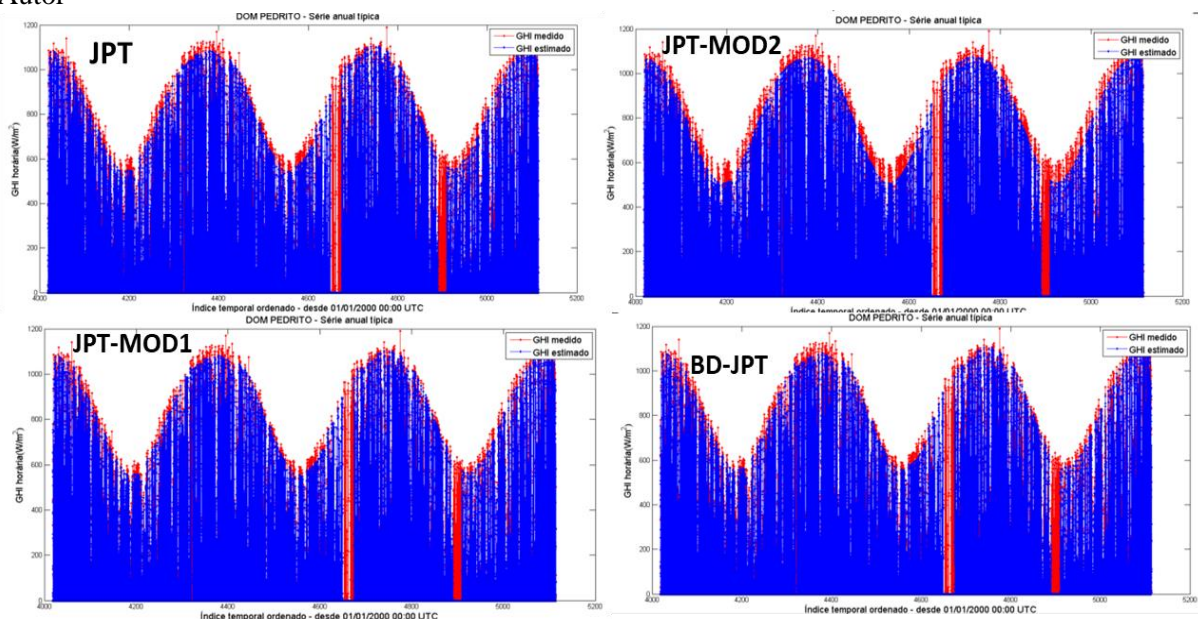
Local	GHI horário (W/m ²)
Dom Pedrito	458,23
Bagé	447,47
Chuí	442,54
Santana do Livramento	419,54
Jaguarão	404,55
Uruguiana	404,25

Fonte: Autor

As maiores irradiações solares incidentes no período analisado foram registrados nas estações do INMET instaladas nos municípios de Dom Pedrito, Bagé e Chuí.

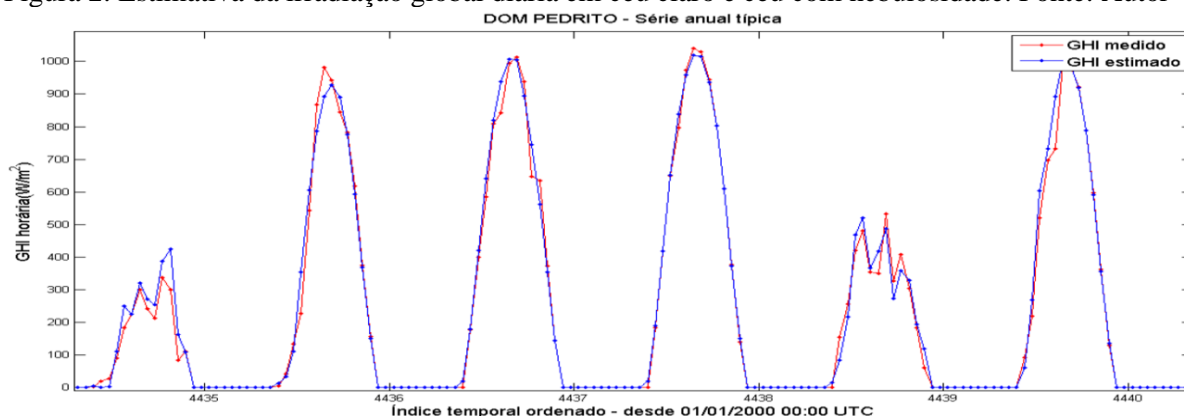
Nos gráficos da figura 1 apresentam-se as séries temporais de irradiação medida (vermelho) e estimada pelos distintos modelos (azul) para a estação do INMET instalada no município de Dom Pedrito. Todas as demais séries das cidades contempladas pela área de estudo apresentaram gráficos semelhante.

Figura 1: Série anual típica da irradiação global horária para o município de Dom Pedrito. Fonte: Autor



Na figura 2 apresenta-se um gráfico com os valores estimados para a irradiação global horária para dias de céu claro e nebuloso.

Figura 2: Estimativa da irradiação global diária em céu claro e céu com nebulosidade. Fonte: Autor



Para todas as estações analisadas é possível observar que o modelo tende a subestimar as medidas nos dias de céu claro e superestimar em dias com nebulosidade

Na tabela 2 apresentam-se os valores do desvio médio de Biais (MDB) calculados para os quatro modelos em avaliação. Para os modelos JPT, JPT-Mod1 e JPT-Mod2 calculou-se o MDB para condições de modelo ajustado e modelo ajustado com validação cruzada. Para o modelo BD-JPT não houve ajuste, pois ele já é um modelo ajustado para o Uruguai.

Tabela 2: Desvio médio de Biais nos modelos (ajustados e ajustados com validação cruzada).

Modelo	MDB (%)					
	Chuí	Jaguarão	Bagé	Dom Pedrito	Santana do Livramento	Uruguaiana
JPT ajustado	0,43	0,5	0,51	0,39	0,52	0,61
JPT ajustado validação cruzada	0,02	0,33	0	-0,01	0,06	0,07
JPT- Mod1 ajustado	0,17	0,22	0,15	0,7	0,19	0,19
JPT- Mod1 ajustado validação cruzada	-0,02	0	-0,04	-0,03	0,03	0,01
JPT- Mod2 ajustado	0,24	0,33	0,26	0,18	0,29	0,29
JPT- Mod2 ajustado validação cruzada	0,07	0,09	0,05	-0,03	0,09	0,09
BD-JPT	-6,22	1,04	-6,22	1,38	3,15	-3,52

Fonte: Autor

A partir da análise dos valores apresentados na tabela 2, verifica-se que o desvio médio da estimativa horária obtido para o modelo BD-JPT foi subestimada para o Chuí, Bagé, Dom Pedrito e Uruguaiana, e superestimada para Bagé e Santana do Livramento. O desvio médio dos valores subestimados foi maior do que o dos valores superestimados, com destaque para o Chuí, Bagé e Uruguaiana que apresentaram $-27,66 \text{ W.m}^{-2}$, $-27,82 \text{ W.m}^{-2}$ e $-15,98 \text{ W.m}^{-2}$ respectivamente.

Na tabela 3 apresentam-se os valores do Erro Médio Quadrático (RMS) calculados para os quatro modelos em avaliação.

Tabela 3: Erro médio quadrático nos modelos (ajustados e ajustados com validação cruzada).

Modelo	RMS (%)					
	Chuí	Jaguarão	Bagé	Dom Pedrito	Santana do Livramento	Uruguaiana
JPT ajustado	18,06	19,62	19,58	17,63	22,05	19,15
JPT ajustado validação cruzada	19,28	19,62	20,90	18,15	22,98	20,33
JPT- Mod1 ajustado	13,29	15	14,18	12,88	18,19	13,44
JPT- Mod1 ajustado validação cruzada	13,31	15,20	14,35	12,93	18,42	13,59
JPT- Mod2 ajustado	13,2	15,11	13,99	12,48	17,90	13,43
JPT- Mod2 ajustado validação cruzada	13,50	15,32	14,17	12,57	17,93	13,61
BD-JPT	14,97	14,90	15,72	12,73	18,11	13,79

Fonte: Autor

Para os modelos JPT, JPT-Mod1 e JPT-Mod2 calculou-se o RMS para condições de modelo ajustado e modelo ajustado com validação cruzada. Para o modelo BD-JPT não houve ajuste, pois ele já é um modelo ajustado para o Uruguai.

A partir da análise dos valores apresentados na tabela 3, verifica-se que as estimativas para a região de Santana do Livramento apresentaram os piores indicadores em todos os modelos testados, seguido por Bagé e Chuí. Os locais que apresentaram os melhores desempenhos foram Dom Pedrito, Uruguaiana e Jaguarão.

O rRMS horário médio da estimativa da irradiação global de toda área de estudo a partir do modelo Mod1-JPT ajustado foi de 14,5%, enquanto o mesmo modelo ajustado por validação cruzada apresentou desvio de 14,63%. O modelo Mod2-JPT ajustado apresentou desvio rRMS horário da estimativa da irradiação global quando comparado com as medidas terrestres de 14,35%, o mesmo modelo ajustado por validação cruzada foi de 14,51%. O desvio rRMS apresentado pelo modelo JPT ajustado para área de estudo foi de 19,36%. O modelo quando ajustado por validação cruzada dos dados apresentou desvio rRMS de 20,21%. O modelo BD-JPT sem ajuste para a localização do estudo apresentou desvio médio rRMS de 15% para área de estudo.

CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho uma avaliação de modelos de estimativa de irradiação solar com base nos resultados de irradiação global horária.

A partir dos resultados apresentados, foi possível verificar que modelo JPT foi o que apresentou piores indicadores em todas as estações climatológicas, com valores para os modelos ajustados e ajustados com validação cruzada apresentando pequena variação.

Os resultados gerados pelos modelos ajustados JPT-Mod1 e JPT-Mod2 apresentaram pouca diferença. O mesmo ocorreu para os modelos JPT-Mod1 e JPT-Mod2 ajustados com validação cruzada.

O modelo que apresentou os melhores indicadores foi o JPT- Mod1, entretanto este não considera o brilho médio em condições de céu claro (Fro). O modelo BD-JPT apresentou bons resultados, espera-se que se ajustado para área de estudo este modelo obtenha melhores resultados que os demais.

REFERÊNCIAS

- INMET/LABSOLAR (Instituto Nacional de Meteorologia / Laboratório de Energia Solar UFSC). Atlas de irradiação solar do Brasil. INMET, Brasília. 1998. 58 pp.
- Pereira, E. B., Abreu, S. L., Stuhlmann, E., Rieland, M., Colle, S., 1996. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data, *Solar Energy*, 57, pp. 125-132.
- Perez R., Cebeauer T. and Sári M.. Semi-Empirical Satellite Models in Solar Energy Forecasting and resource assessment. Editor: Jan Kleissl. Elsevier, 2013.
- Suárez, R. A, Abal, G., Siri, R. and Musé, P.. Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: Application to Uruguay. *Solar Energy*, Volume 86, 3205-3215. 2012.
- Vignola F., Grover C., Lemon N., McMahan A., Building a bankable solar radiation dataset. *Solar Energy*, Volume 86, Issue 8, August 2012, Pages 2218-2229,