

## **Modelos de estimativas de Radiação Solar Global e análise estatística em cidades do estado do Pará – Brasil utilizando dados meteorológicos**

### **Estimation Models of Global Solar Radiation and Statistical Analysis in cities in the State of Pará - Brazil using meteorological data**

Alexandre Miguel da Cruz Valente<sup>1</sup>, Maílson Batista de Vilhena<sup>2</sup>, Diego Cardoso Estumano<sup>3\*</sup>

---

#### **RESUMO**

Estimar a radiação solar é importante para vários segmentos da sociedade como agricultura, meteorologia e geração de energia elétrica (sistemas fotovoltaicos). Este artigo tem como objetivo estimar a Radiação Solar Global em quatro cidades do estado do Pará - Brasil, por meio de modelos de estimativas, Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell, usando dados meteorológicos fornecidos pelas Estações Meteorológicas Automáticas, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, comparar os valores observados e estimados e analisar qual modelo melhor se adequa à região, através dos parâmetros Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de correlação de Person (r), Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>) e Índice de Willmott (d). Os resultados mostraram que os modelos são satisfatórios e podem ser utilizados para estimar a Radiação Solar Global, no entanto para o período menos chuvoso houve uma superestimativa, a estação de Castanhão foi a que possuiu menor desempenho em relação as demais estações e Tucuruí o melhor.

**Palavras Chave:** Modelos de estimativas; Radiação Solar Global; Análise estatística; Dados meteorológicos.

#### **ABSTRACT**

Estimating solar radiation is important for various segments of society such as agriculture, meteorology and electricity generation (photovoltaic systems). This article aims to estimate the Global Solar Radiation in four cities in the state of Pará - Brazil, using estimation models, Hargreaves-Samani and Bristow-Campbell, using meteorological data provided by Automatic Meteorological Stations, belonging to the National Institute of Meteorology – INMET, compare the observed and estimated values and analyze which model best fits the region, through the parameters Square Root of the Mean Squared Error

---

<sup>1</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos - Universidade Federal do Pará

<sup>2</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - Universidade Federal do Pará

<sup>3</sup> Faculdade de Biotecnologia - Universidade Federal do Pará. \*dcestumano@ufpa.br

(RMSE), Person's correlation coefficient ( $r$ ), Determination Coefficient ( $R^2$ ) and Index of Willmott ( $d$ ). The results showed that the models are satisfactory and can be used to estimate the Global Solar Radiation, however for the less rainy period there was an overestimation, the Castanhal station had the lowest performance in relation to the other stations and Tucuruí the best.

**Keywords:** Estimation Models; Solar Global Radiation; Statistical Analysis; Meteorological Data.

---

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a geração de energia elétrica por meio da energia solar tem chamado atenção do meio científico, pois se trata de uma fonte de energia limpa, renovável e sustentável, segundo Albenuor et al (2018). O estudo da radiação solar é importante para vários segmentos da sociedade, podendo ser explorado para fins da agricultura, sistemas fotovoltaicos e estudos climatológicos em geral. Para o estudo de tecnologias baseadas em energia solar como energia térmica e sistemas fotovoltaicos, informações da radiação solar em determinadas localidades é de fundamental importância, conforme Jamil et al (2016). Além das condições climáticas da região, outros fatores importantes para determinação da radiação solar global por meio de modelos de estimativas são a localização (latitude e longitude) e o dia do ano da estimativa, segundo Iqbal (1983).

Em 2017, O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017) publicou a 2ª edição do Atlas Brasileiro da Energia Solar, que destaca o grande potencial solar do país, em todas as regiões do país, o que propicia ao meio científico uma vasta área de estudo de sistemas de energia renovável em prol de desenvolvimento científico, econômico e ambiental no país. O aproveitamento da energia solar no Brasil, em diferentes segmentos, tem sido massivamente estudado por diversos autores (Fernandes et. al., 2018; Martins et al., 2004; Santos, et al., 2021; Moreira Júnior, O. & Souza, C., 2018).

A predição da radiação solar é uma tarefa difícil, visto que em localidades remotas dificilmente há estação meteorológica com informações completas de parâmetros climatológicos devido ao grande custo de implantação e manutenção dessas estações. Dentre os principais desafios para obtenção de dados da radiação solar nas regiões do Brasil é o alto custo de manutenção de estações meteorológicas, a correta instalação dos equipamentos e também a interpretação dos valores obtidos (Andrade Júnior et al., 2012).

Segundo Mohanty & Patra (2021), a radiação solar global é medida em vários locais, onde há instrumentos instalados e depois pode ser estimada em regiões próximas onde não há esses equipamentos de medição. Os autores afirmam que conhecendo as técnicas de estimativas e adaptando-as às particularidades das áreas a serem estudadas, com suas condições climatológicas, é possível simular as radiações direta, difusa ou global. Ao redor do mundo, há diversos estudos da estimativa da radiação solar global (Lurwan, S., et al., 2014; Budiyanto, M. & Lubis, M., 2020; Hai, T et al., 2020; Ikotoni, B et al., 2019; Eddine, A. & Chehade, I., 2016). Já no Brasil, alguns autores também desenvolveram diferentes pesquisas e tipos de modelagens e parâmetros climatológicos para estimar a radiação solar (Belúcio, L., et al., 2014; Ramos, J., et al., 2018; Lopes Júnior, J., et al., 2021; Fernandes, D. et al. 2018; Dos Santos, P. et al., 2018; Beruski, G. et al., 2015).

De acordo com Castilho Paes *et al* (2018), existem muitos modelos estatísticos para estimar Radiação Solar Global (RSG), um deles é o modelo de Angstrom-Prescott (A-P), que estima a RSG a partir da medida do brilho do sol. Esse modelo é obtido por regressão linear, porém é necessário o instrumento chamado heliógrafo que além de ter alto custo, possui limitações experimentais, tais como a falta de precisão por elevada umidade relativa do ar em regiões tropicais, fator pelo qual esse modelo é descartado neste trabalho, já que o estado do Pará possui altas temperaturas e umidade relativa do ar elevada.

O trabalho de Al-Hajj *et al* (2016), no Reino Unido, utilizou dados climatológicos para implementar um modelo de regressão não-linear e posteriormente otimizar o modelo com a técnica computacional de algoritmo genético. O objetivo dos autores foi estimar a radiação solar global e validar o modelo que mais se adequou com os dados observáveis e otimizar parâmetros de outros modelos para que suas estimativas ficassem mais próximos dos valores observados. Já o estudo de Hai *et al* (2020) estimou a radiação solar global com métodos puramente estatísticos, utilizando dados climáticos no país Algeria, região norte do continente africano. O desempenho do modelo de linguagem de programação utilizada pelos autores consiste na avaliação de regressões lineares múltiplas, modelo auto-regressivo integrado de médias móveis, por meio dos quais detalhou e analisou os parâmetros estatísticos encontrados, tais como Raiz do Erro Médio Quadrático e Erro Médio Absoluto.

No Brasil, Fernandes *et al* (2018) avaliou o desempenho de modelos de estimativa de radiação solar baseados em dados de temperatura em cidades do estado de Goiás. O desempenho dos modelos na calibração e validação foi avaliado por meio do coeficiente de determinação, erro quadrático médio, erro relativo quadrático médio, erro médio absoluto e pela eficiência do modelo por meio do método de Nash-Stucliff. Já o trabalho de Ramos *et al* (2018), avaliou os modelos de Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell estudados em diferentes regiões do Brasil, foram estudados parâmetros estatísticos para análises dos modelos, tais como índice estatístico de precisão ( $r^2$ ), acurácia ( $d$ ) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE). Para a região Norte do Brasil, pelo modelo de Hargreaves-Samani, foi recomendado por Ramos *et al.* (2018) o valor médio do coeficiente  $K_t$  igual a 0,152, enquanto que, no modelo de Bristow-Campbell, foi recomendado o valor do parâmetro  $B$  igual a 0,026.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o estado do Pará possui área de 1.245.000 km<sup>2</sup>, situado na região Norte do Brasil – localizado próximo à linha do Equador, o que eleva as temperaturas no estado. Por esse motivo, é importante estimar valores de radiação para futuras análises de potencial da geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos em diferentes cidades do estado. Para tanto, se faz necessário uso de modelos de estimativas, utilizando dados climatológicos do estado do Pará, utilizando como base dados exportados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os avanços tecnológicos no mundo impulsionam a busca por fontes de energia renovável e uma das formas mais atrativas hoje é aproveitar a energia do sol, fonte limpa, inesgotável e gratuita.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é estimar a Radiação Solar Global (RSG) no estado do Pará, por meio dos modelos Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell, referentes ao ano de 2020, com dados de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET e avaliar qual o melhor modelo para a região através de parâmetros estatísticos.

## **METODOLOGIA**

As Estações Meteorológicas Automáticas (EMA), operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) são empregadas para fins de estudos meteorológicos e monitoramento ambiental (INPE, 2017). Esse tipo de estação de monitoramento é

composta por uma Unidade Central de Memória, chamada *datallogger*, que é conectada aos sensores de parâmetros meteorológicos, tais como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do vento, radiação, entre outros. Os dados coletados são disponibilizados a cada hora. A rede nacional de EMA, operadas pelo INMET, compreende cerca de 900 estações meteorológicas típicas distribuídas pelo território nacional.

Utiliza-se neste trabalho o banco de dados meteorológicos do INMET, com informações climatológicas de quatro cidades do estado do Pará, referente ao ano 2020. Esses dados foram tratados e separados por estação/cidade, sendo utilizado alguns critérios de seleção para eliminar leituras inconsistentes de temperatura, dentre os quais foram descartados informações com temperatura acima de 50°C, temperatura abaixo de 2°C, radiação solar global menor que 0 MJ/m<sup>2</sup>.d ou maior de 45 MJ/m<sup>2</sup>.d. Para validação e análise dos modelos, os registros foram separados, por estação/cidade, em faixas horárias do fotoperíodo (7h – 19h), desconsiderando a faixa horária em que as medidas eram nulas ou desprezíveis (20h – 6h). Na etapa seguinte, calculou-se o valor da radiação de todos os dias do ano 2020 de cada estação, este é o valor observado, e separado os valores de temperatura máxima e mínima de cada dia para implementação dos modelos que utilizam a variação de temperatura. As cidades contempladas neste trabalho são Castanhal, Tomé Açu, Tucuruí e Óbidos. A cidade Castanhal fica localizada na mesorregião Metropolitana de Belém, a cidade Tomé Açu pertence à mesorregião Nordeste paraense, Tucuruí fica na mesorregião Sudeste paraense e Óbidos pertence à mesorregião do Baixo Amazonas, a localização das estações é mostrada na Figura 01.

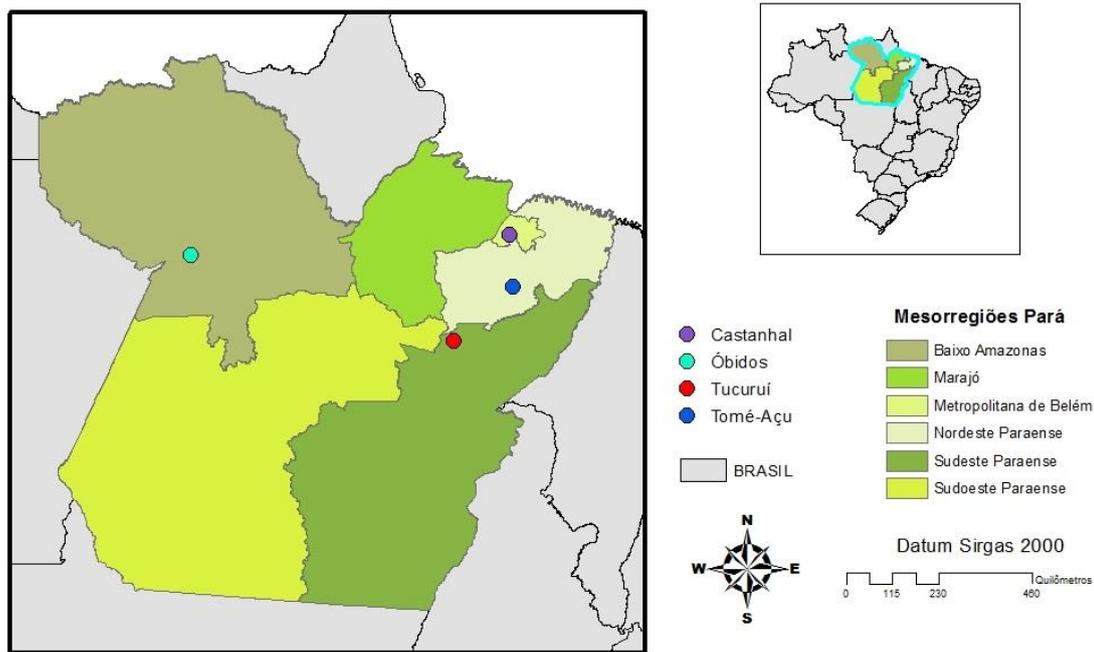


Figura 01 – Localização das cidades contempladas neste estudo

Os modelos de estimativas de Radiação Solar Global analisados neste trabalho são o Modelo de Hargreaves & Samani (1982) e o Modelo de Bristow & Campbell (1984), posteriormente são comparados os dados estimados e observados, e analisados estatisticamente.

- **Modelo Hargreaves-Samani**

Este modelo foi proposto por Hargreaves & Samani (Hargreaves & Samani, 1982), para estimar a radiação solar global utilizando a diferença de temperatura diária e a radiação solar no topo da atmosfera. O presente modelo estima a radiação por meio da equação:

$$R_g = R_0 \cdot K_t \cdot \sqrt{\Delta T} \quad [MJ/m^2 \cdot d^1] \quad (1)$$

Onde:

- $R_g$  é a radiação global diária na superfície  $[MJ/m^2 \cdot d^1]$ ;
- $R_0$  é a radiação solar extraterrestre diária  $[MJ/m^2 \cdot d^1]$ , que é definida com precisão em função da constante solar e latitude do local;

-  $\Delta T$  é a amplitude térmica diária, definida pela diferença entre a temperatura máxima e mínima diária;

-  $K_t$  é o coeficiente de ajuste regional do método de Hargreaves & Samani.

Segundo os autores do modelo (Hargreaves & Samani, 1982), o coeficiente empírico  $K_t$  é ajustado em função das condições climáticas do local, recomendado pelo autor para regiões litorâneas o valor igual a 0,19 e para regiões interiores o valor igual a 0,162. O presente trabalho utiliza o coeficiente igual a 0,162, pois as cidades ficam em regiões interiores. O estudo de Rivero *et al.* (2017) fez a estimativa da radiação solar global utilizando o modelo Hargreaves-Samani em regiões do México e, no tratamento dos dados climatológicos trabalhados, filtrou as condições dos dados para evitar inconsistências, observando temperatura com valores condizentes com a região: Temperaturas não podem ser superiores a 70°C nem inferiores a -50°C, radiação Solar não pode exceder a constante solar nem apresentar valores negativos, radiação Solar Global não pode exceder a Radiação Solar Extraterrestre (também chamada de Radiação no Topo da Atmosfera).

O modelo de Hargreaves-Samani (1982) é amplamente estudado ao redor do mundo, por diversos autores que trabalham com estimativa da radiação solar global (Ihaddadene, R., *et al.*, 2018; Osornio, R., *et al.*, 2016; Rivero, *et al.*, 2017; Ramos, *et al.*, 2018).

- **Modelo de Bristow & Campbell (1984)**

O modelo proposto pelos autores Bristow & Campbell (1984) relaciona a amplitude térmica e a Radiação Solar Global por meio de três parâmetros de ajuste regionais (A, B e C) e a radiação solar extraterrestre.

$$R_g = R_0 \cdot A \cdot \left[ 1 - e^{(-B \cdot \Delta T^C)} \right] \quad [MJ/m^2 \cdot d^1] \quad (2)$$

Os valores recomendados por Bristow & Campbell (1984) das variáveis são  $A=0,7$ ,  $B$  entre 0,004 e 0,010, dependendo do período de verão ou inverno, e  $C=2,4$ .

O modelo de Bristow e Campbell (1984) também amplamente estudado no mundo, para estimativa de radiação solar global (Pan *et al.*, 2013; Gollo *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2018; Meenal, *et al.*, 2016).

Pan *et al* (2013) estimaram radiação solar global no Planalto do Tibete – Ásia, por meio da modelagem de Bristow & Campbell, relacionando a transmitância atmosférica, que é a relação entre a radiação solar global e a radiação solar no topo da atmosfera com as variáveis climáticas da região. No estudo de Gollo *et al* (2019) no Rio Grande do Sul, os autores constataram pelo modelo Bristow-Campbell que os coeficientes de calibráveis climáticos A, B e C não sofreram muita variação devido ao fato de os três municípios estudados terem latitudes próximas. No estudo de Santos *et al* (2018), realizado na cidade de Humaitá, estado do Amazonas, foi estimada RSG pelo modelo de Bristow-Campbell, e utilizou os parâmetros A e C como recomendados, 0,7 e 2,4, respectivamente, e o parâmetro B foi a média dos valores recomendados por Bristow e Campbell, 0,007.

- **Cálculo da radiação extraterrestre**

A variação da radiação solar no topo da atmosfera ( $R_0$ ) é atribuída a diversos fatores, tais como presença de partículas de gases na atmosfera ( $H_2O$ ,  $O_3$ , aerossóis, etc), nebulosidade, e posição aparente do sol, conforme Duffie *et al.* (1994). Para determinar o valor de  $R_0$  (equação abaixo), Iqbal (1983) utilizou raio vetor da órbita terrestre ( $E_0$ ), latitude local ( $\varphi$ ), declinação solar ( $\sigma$ ) e o ângulo horário ( $H$ ):

$$R_0 = 37,6 \cdot E_0 \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot H \cdot \sin \varphi \cdot \sin \sigma + \cos \varphi \cdot \cos \sigma \cdot \sin H \quad [MJ/m^2 \cdot d^1] \quad (3)$$

Sendo:

$$E_0 = 1 + 0,0033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot dn}{365}\right) \quad [UA] \quad (4)$$

Onde:

-  $\varphi$  é latitude do local (dado em graus);

-  $dn$  o dia Juliano;

-  $\sigma$  é a declinação solar (dado em graus), considerada a latitude (celeste) em que se encontra o Sol, variando entre  $0^\circ$  a  $\pm 23^\circ C$  ao longo do ano, calculado por:

$$\sigma = 23,45 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (284 + dn)\right] \quad [Graus] \quad (5)$$

De acordo com Fattori e Ceballos (1997), o ângulo horário ( $H$ ) é uma medida da posição de um astro no sistema equatorial horário de coordenadas e assume valores entre  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ , sendo o valor 0 ao meio dia. O ângulo horário ( $H$ ) é dado, em graus, por:

$$H = \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\sigma)) \quad [\text{Graus}] \quad (6)$$

- **Parâmetros de desempenho dos modelos**

Para verificar a correlação e medir o desempenho entre os resultados da Radiação Solar Global observada e estimada pelos modelos, foram realizadas análises de regressão linear através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e correlação das variáveis através do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ). Para avaliar o grau de concordância entre as variáveis foi utilizado o índice de Willmott ( $d$ ) (WILLMOTT *et al.*, 1985), dada pela equação (7). Quanto mais próximo de 1 o  $r$ ,  $R^2$  e  $d$ , maior o ajuste da previsão. Para avaliar o desempenho dos modelos utilizou-se a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) dado pela equação (8), sendo que igual a 0 indica uma estimativa perfeita do modelo :

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (R_O - R_E)^2}{\sum_{i=1}^n (|R_O - \bar{R}_E| + |R_O - \bar{R}_E|)^2} \right] \quad (7)$$

sendo  $d$  – índice de concordância de Willmott,  $R_O$  – radiação solar global observada ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $R_E$  – radiação solar global estimada ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) e  $\bar{R}_E$  – média da radiação solar global estimada ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_O - R_E)^2}{n}} \quad (8)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento diário dos valores de radiação observada, medida pelas estações do INMET, em relação aos valores estimados pelos modelos Hargreaves & Samani (H-S) e Bristow & Campbell (B-C) são mostrados nos gráficos da Figura 02 para cada estação, distribuídas no estado do Pará.

A radiação solar global média no ano de 2020 foi de 15,09  $\text{MJ/m}^2.\text{d}$  para Castanhal, em Tomé Açu é de 16,70  $\text{MJ/m}^2.\text{d}$ , para Tucuruí é 16,70  $\text{MJ/m}^2.\text{d}$  e a média em Óbidos é de 16,31  $\text{MJ/m}^2.\text{d}$ . Os valores das médias são próximos e demonstram que há pouca variabilidade na distribuição da radiação no Estado do Pará, apesar de sua extensão, o que demonstra a influência da Linha do Equador em todas as localidades.

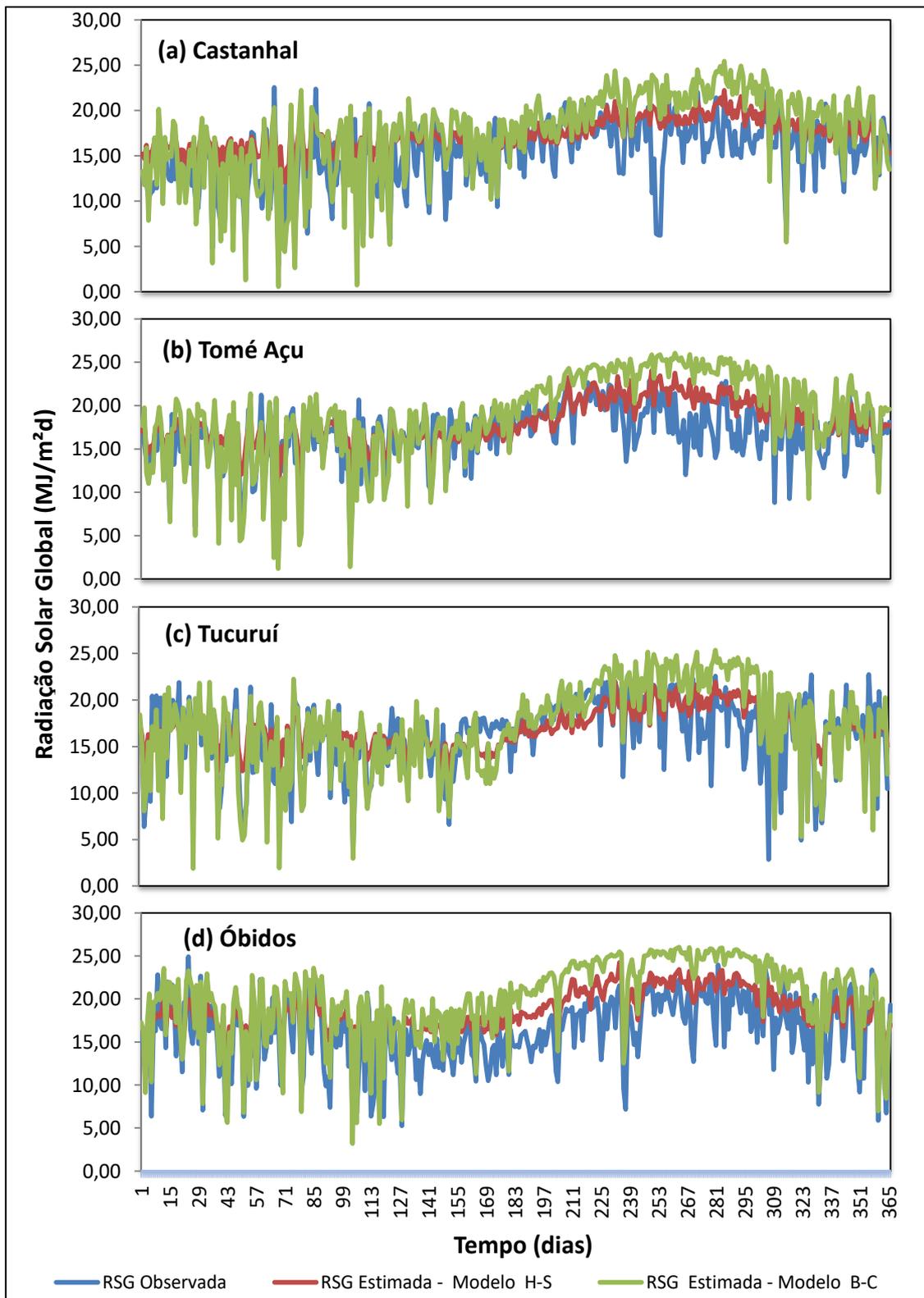


Figura 02 – Radiação Solar Global observada e estimada pelos modelos H-S e B-C.

Outro ponto importante, que contribui para valores próximos da radiação entre as estações, é a classificação climática Koppen da região do tipo “A”, designado a climas tropicais com altos índices pluviométricos e temperatura média maior que 18°C. No Pará,

a partir de dezembro inicia o período chuvoso com fim em maio, e de junho a novembro tem-se o período menos chuvoso ( MENEZES, 2013; LIRA *et al.*, 2020). Os quatro municípios possuem a mesma marcha sazonal, e isto influencia na incidência da radiação no Estado e também a distribuição do período chuvoso e menos chuvoso tem pouca variação entre as mesorregiões.

Castanhal possui menor média de radiação, esta cidade esta localizada na Mesorregião Metropolitana que possui um dos maiores índices pluviométricos, de acordo com Albuquerque *et al.* (2010), superior a 2000 mm por ano. A alta pluviosidade é um fator que contribuí para essa menor média em relação as outras cidades.

Ao analisar a Figura 02, entre os dias 170 a 330 há uma sutil superestimativa dos modelos em relação à radiação observada, principalmente o modelo de Bristow & Campbell, ao aplicar este modelo em Humaitá no Amazonas, Dos Santos *et al.* (2018) obteve valores superestimados no mesmo período. Esse período corresponde aproximadamente ao período menos chuvoso (junho a novembro), o que demonstra que os parâmetros dos modelos podem ser otimizados para esse período e assim diminuir os erros. Dentre os municípios, apenas Tucuruí, apresenta melhor equiparação entre o modelado e o observado, apenas com a análise visual da Figura 02.

A relação entre os dados diários da Radiação Solar Global observada e estimada pelos modelos é apresentado na Figura 03 (Modelo H-S) e Figura 04 ( Modelo B-C) para cada estação com seus respectivos coeficiente de determinação  $R^2$  e ajuste linear.

Com a observação da dispersão dos pontos e do ajuste linear através do coeficiente de determinação  $R^2$  nas Figuras 03 e 04, o modelo B-C apresentou melhor ajuste com maiores valores de  $R^2$  em relação ao modelo H-S, resultado semelhante ao obtido por Ramos *et al.* (2018) ao aplicar os modelos para diversas estações no Brasil. No entanto, a distribuição dos pontos nos dois modelos em relação a radiação observada é bem parecida ao analisar os gráficos, demonstrando que há pouca variação entre os modelos.

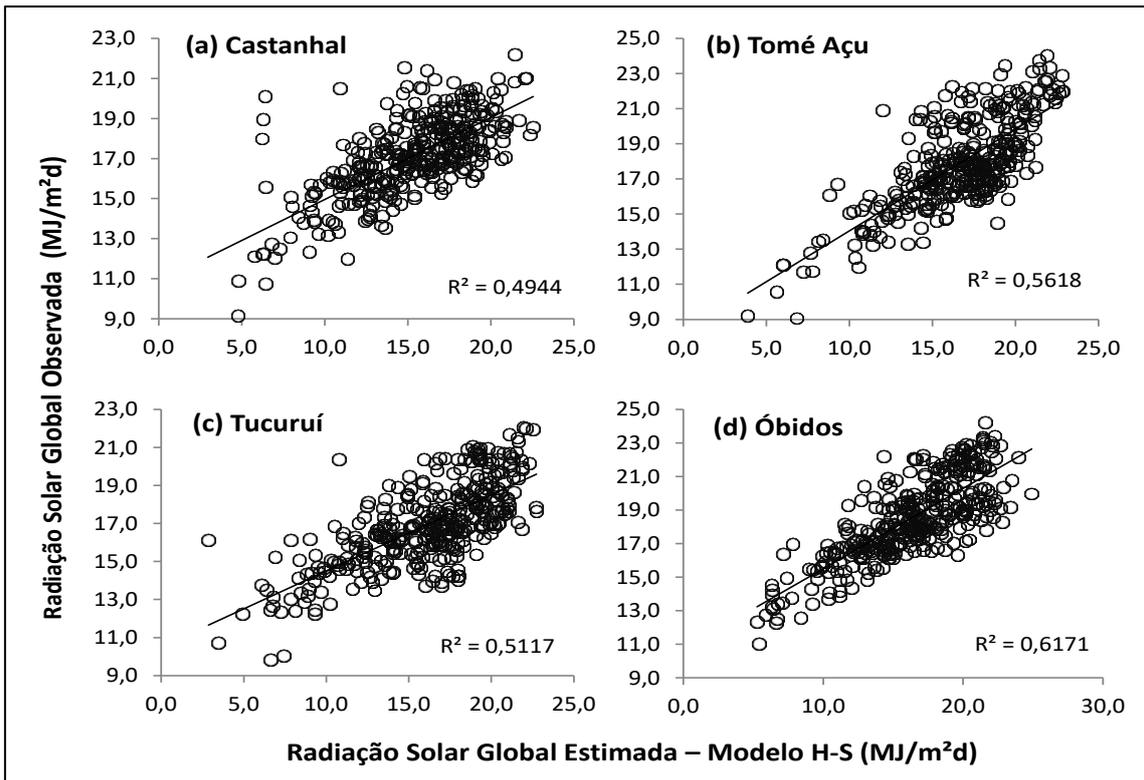


Figura 03 – Relação entre Radiação Solar Observada e Estimada pelo Modelo H-S.

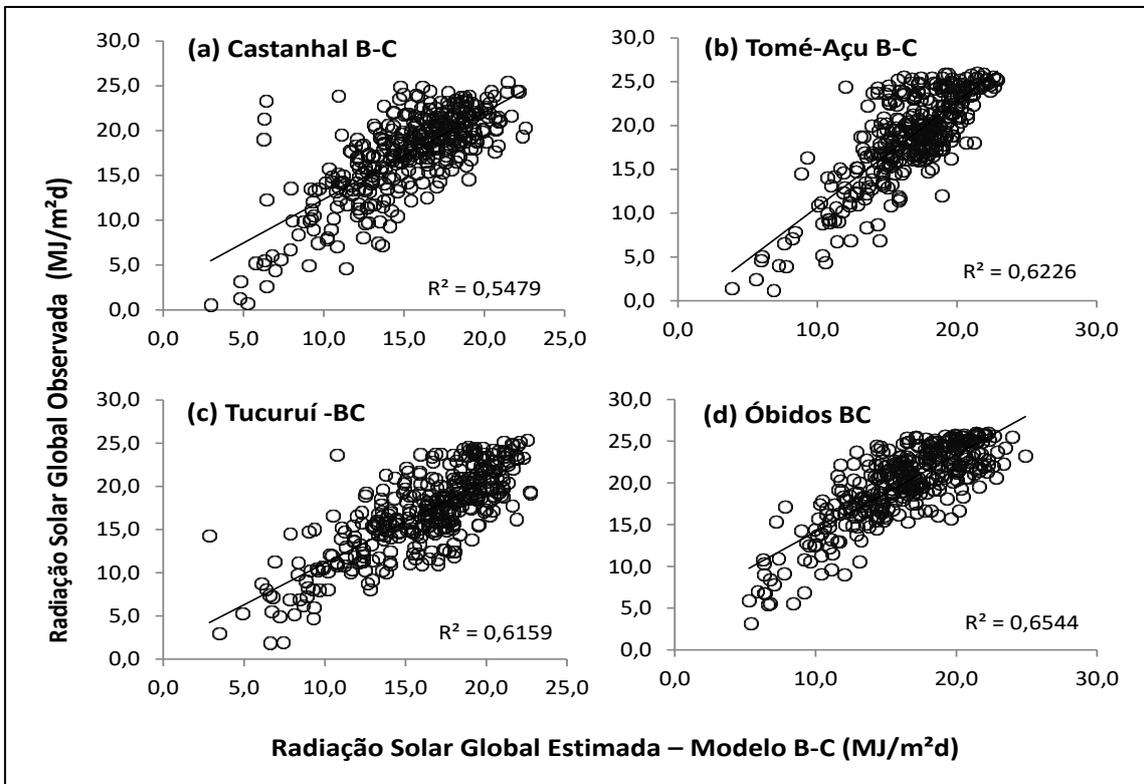


Figura 04 – Relação entre Radiação Solar Observada e Estimada pelo Modelo B-C

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar os modelos são apresentados na Tabela 01. O modelo H-S apresenta menores valores de RMSE em relação ao modelo B-C, o RMSE é um parâmetro que avalia o desempenho do modelo. Os demais parâmetros (r, R<sup>2</sup> e d) medem o desempenho do modelo, nestes os valores são relativamente superiores para o modelo B-C, que indica melhor performance quanto mais próximo de 1. Sendo que os coeficientes de Pearson (r) e índice de Wilmott (d) são superiores ao coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) com valores entre 0,74 e 0,87.

Tabela 01 – Parâmetros estatísticos de validação dos modelos

Estações	Modelo H-S				Modelo B-C			
	RMSE	r	R <sup>2</sup>	d	RMSE	r	R <sup>2</sup>	d
Castanhal	3,21	0,70	0,49	0,70	3,88	0,74	0,55	0,79
Óbidos	3,38	0,79	0,62	0,74	4,55	0,81	0,65	0,77
Tomé Açu	2,51	0,75	0,56	0,82	3,82	0,79	0,62	0,81
Tucuruí	2,90	0,72	0,51	0,75	3,08	0,78	0,62	0,87

RSM- Raiz Quadrada do Erro quadrático médio; r – coeficiente de correlação de Pearson; R<sup>2</sup>- coeficiente de determinação; d – índice de Wilmott.

Castanhal apresentou o menor desempenho em relação as demais estações, com R<sup>2</sup> inferior a 0,50, que pode estar relacionado com a precipitação, como já discutido, ou os dados observados possuem falhas, que compromete o desempenho dos modelos. A estação de Tucuruí apresenta os melhores parâmetros com coeficiente de Wilmott próximo de 0,9 sem otimização, conforme é observado na Figura 02 apenas com a distribuição dos dados.

Considerando os valores de r e d, pode-se inferir que existe uma grande associação entre o observado e estimado pelos dois modelos, indicando que há precisão nos modelos aplicados. Mesmo sem a otimização dos parâmetros, os modelos H-S e B-C se mostraram satisfatórios para estimar a Radiação Solar Global, que é de extrema importância para manutenção da série de dados e redução de falhas.

## CONCLUSÕES

Tanto o modelo Hargreaves & Samani quanto o modelo de Bristow & Campbell podem ser considerados viáveis para estimativa de radiação solar global nas cidades estudadas e suprir a deficiência de dados de radiação, com valores baixos de RMSE e

coeficientes  $r$  e  $d$  próximos de 1. No entanto, os valores apresentaram valores medianos de  $R^2$ . Como discutido, há uma superestimativa no período menos chuvoso, para trabalhos futuros pode-se aplicar os modelos para cada período (menos chuvoso e chuvoso) e verificar se há melhora no desempenho. A otimização dos parâmetros através das técnicas computacionais como Monte Carlo via Cadeia de Markov, Algoritmo Genético, ou Lógica Fuzzy também são alternativas interessantes para obter estimativas mais precisas dos modelos. A aplicação dos modelos em mais estações, se houver disponibilidade de dados, para conhecer melhor a distribuição da radiação no Pará é uma análise importante para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

Abuelnuor, A., Omara, A., Saqr, K., Elhag, I. "Improving indoor thermal comfort by using phase change materials: A review," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, pp. 2084-2103, 2018.

Andrade Júnior, A.; Noleto, H.; Silva, E.; Braga, L.; Bastos, A. Coeficientes da equação de Angstrom-Prescott para Parnaíba, Piauí. *Comunicata Scientiae*, v.3 (1): 50-54, 2012.

Al-Hajj, R.; Assi, A.; Batch, F. An evolutionary computing approach for estimating global solar radiation, 2016. 2016 IEEE – 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA).

Albuquerque, M. F., De Souza, E. B., De Oliveira, M. C. F., Souza Júnior, J. A. Precipitação nas Mesorregiões do Estado do Pará: Climatologia, Variabilidade e Tendências nas últimas décadas (1978-2008). *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 6 (6), 2010.

Belucio, L., da Silva, A., Moura, G. Radiação Solar Global Estimada a partir da insolação para Macapá – AP, 2014. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.4, 494 – 504, 2014.

Beruski, G., Pereira, A., Sentelhas, P. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, Paraná. 2015. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.30, n.2, 205-213, 2015.

Bristow, K.L. and Campbell, G.S., 1984. On the Relationship between incoming Solar Radiation and Daily Maximum and Minimum Temperature. 31:159-166.

Budiyanto, M., Lubis, M. Comparison Result of Hourly Solar Radiation Under The Clear Sky Condition Based on of Solar Radiation Model and Measured Data Experiment. 2020. First International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering, 2020.

Dos Santos, P., Querino, C., Araujo, V. Radiação Solar Global Diária para o município de Humaitá-AM estimada pelo modelo de Bristow e Campbell. Revista Educamazônia, ano 10, Vol XX Número 1, Jan-Jun, 2018, pág. 173-185.

Duffie, W. Beckman and W.M. Worek (fourth ed.), Solar Engineering of Thermal Processes, vol. 116, Wiley (2013), 10.1115/1.2930068. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2930068>.

Eddine, A., Chehade, I. Estimation Model for global solar radiation in Lebanon, 2016. Third International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, 2016.

Fattori, P.A., Ceballos, J.C., Glossário de termos técnicos em radiação atmosférica, 1997. Disponível em <<http://tucupi.cptec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/gloss/capa.htm>>.

Fernandes, D.S; Heinemann, A.B; Amorim,A.O; Feitosa da Paz,R.L: Estimativa da Radiação Solar Global com Base em Observações de Temperatura para o Estado de Goiás, 2018. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 33, n. 3, 558-566, 2018.

Gollo, E.A, Peiter, M; Robaina, A; Chaiben Neto, M: Estimativa da radiação solar global para a região fronteira oeste do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 2019. DOI: 10.7127/RBAI.V12N7001027

Hai, T.; Sharafati, A.; Mohammed, A.; Salih, S.; Deo, R.; Al-Ansari, N., Yaseen, Z. Global Solar Radiation Estimation and Climatic Variability Analysis Using Extreme Learning Machine Based Predictive Model, 2020. IEEE Access ( Volume: 8).

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature, Appl. Eng. Agric. 1 (2) (1985) 96e99. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>.

IBGE [Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística] – Área territorial de estados e municípios, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa.html>;

Ihaddadene, R., Ihaddadene, N., Salemi, M., Beghidja, A. New model to estimate monthly global solar radiation from air temperature in Algeria. 2018. The 9th International Renewable Energy Congress.

Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Includes index. 1. Solar radiation. I. Title. QC911.I63, 1983.

Ikotoni, B.; Ibrahim, H., Jatto, I.; Olutade, I. Solar Radiation Potential Using Surface Meteorological Data (A case study of Lokoja City, Kogi State). 2019 IEEE PES/IAS Power Africa (Postgraduate Forum).

Jamil, B., Siddiqui, A., Akhtar, N. “Engineering Science and Technology , an International Journal Estimation of solar radiation and optimum tilt angles for south-facing surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India,” Eng. Sci. Technol. an Int. J., vol. 19, no. 4, pp. 1826–1835, 2016.

Lira, B. R. P., Crispim, D. L., Ferreira Filho, D. F., Fernandes, L. L., Pessoa, F. C. L. Agrupamento de precipitação no estado do Pará, Brasil. Revista Gestão da Água na América Latina, v. 17, e19, 2020.

Lopes Júnior, J., Moura, M., Da Costa, N., Ferreira Júnior, R., Carvalho, A., Querino, C. Frequência e probabilidade de ocorrência de transmitância atmosférica global para a região de Maceió-Alagoas. 2021. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.2, p. 14685-14700 feb. 2021.

Lurwan, S., Mariun, N., Hizam, H., Radzi, M., Zakaria, A. Prediction Power Output of Photovoltaic Systems with Solar Radiation Model. 2014. IEEE International Conference Power & Energy (PECON), 2014.

Martins, F.; Pereira, E.; Echer, M. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário – o projeto Swera, 2004. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, p. 145 – 159, (2004).

Meenal, R., Selvakumar, I., Brighta, K., Joice, S., Richerd, C. Solar Radiation Resource Assessment using WEKA. Second International Conference on Inventive Systems and Control. 2018.

Menezes, F. P. Avaliação espacial e sazonal da Precipitação no Estado do Pará. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2013

Moreira Júnior, O. & Souza, C. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha, 2018.

Mohanty, S., Patra, P. K.. “Prediction of Global Solar Radiation using Nonlinear auto Regressive Network with Exogenous inputs (narx), 2021.

Osornio, R., Ramírez, R., Peña, M., Bustamante, W. 2016. Revista Mexicana de Ciências Agrícolas Vol. 7, n. 5, 2016, p. 1029-1042.

Paes, A.C; da Silva, M.B.P; Gomes, E.N; Escobedo, J.F; dos Santos, C.M: Estimativa da Irradiação Solar Global pelos modelos de Hargreaves-Samani e Aprendizado de Máquina SVM e ANN em Botucatu-São Paulo – Brasil, 2018. Revista de Meteorologia, 2018.

Pan, T; Wu, S; Dai, E; Liu, Y: Estimating the daily global solar radiation spatial distribution from diurnal temperature ranges over the Tibetan Plateau in China. Revista: Elsevier: Energy applied, 2013.

Pereira, E.; Gonçalves, A.; Martins, F.; Costa, R.; Lima F.;Ruther, R.; Abreu, S.; Tiepolo, G.; Pereira, S.; Souza, J. Atlas Brasileiro da Energia Solar, 2ª edição; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

Ramos, J., Vianna, M., Marin, F. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. Revista da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2018.

Rivero, M; Orozco,S.; Sellschopp, F.S., Loera-Palomo, R.: A new methodology to extend the validity of the Hargreaves-Samani model to estimate global solar radiation in diferent climates: Case study Mexico. 2017. Revista: Elsevier, 2017. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/renene>, 2017.

Santos, A.; Souza, J.; Rosa, S. Evapotranspiração de referência horária e diária pelo modelo ASCE-PM para o estado do Paraná, Brasil, 2021. Revista Brasileira de Meteorologia, 2021.

WILLMOTT, C.J. et al. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. International Journal of Climatology, v.5, p.589- 606, 1985.

*Recebido em: 10/12/2021*

*Aprovado em: 10/01/2022*

*Publicado em: 14/01/2022*