ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÉDIA MENSAL EM FUNÇÃO DA AMPLITUDE TÉRMICA DO AR PARA A CIDADE DE MACAPÁ – AP

Helyelson Paredes Moura– helypmoura@gmail.com
Universidade Federal do Amapá – Curso de Engenharia Elétrica
Ana Paula Nunes da Silva
Universidade do Estado do Amapá – Curso de Engenharia Ambiental
Alaan Ubaiara Brito
Universidade Federal do Amapá – Curso de Engenharia Elétrica
José Reinaldo Cardoso Nery
Universidade Federal do Amapá – Curso de Engenharia Elétrica

Resumo. *Com o crescimento do interesse no aproveitamento da energia solar no estado do Amapá, através de sistemas fotovoltaicos, a estimativa de radiação solar global diária média mensal, através de modelos matemáticos, é de grande utilidade na prospecção de regiões com potencial para exploração dessa energia. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar três modelos de estimativa de radiação solar para Macapá com base na amplitude térmica do ar, utilizando os modelos de Bristow e Campbell (B-C), Hargreaves (HG) e Hunt (HU), estendidos para medidas de média mensal. Os modelos foram calibrados e validados tomando como base seis anos de dados meteorológicos. O desempenho de cada modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação, raiz do erro médio quadrático, índice de concordância de Willmott, coeficiente de correlação de Pearson e o índice de desempenho (c). Os resultados mostraram que os modelos B-C e HU apresentaram melhores desempenhos, com boas acurácias encontradas no índice de Wilmott (0,93 e 0,92), erros médios quadráticos (1,37 MJm^{-2}d^{-1} e 1,41 MJm^{-2}d^{-1}), medianas precisões R^2 (0,78 e 0,76), sendo classificados como desempenho muito bom na estimativa da radiação solar global diária média mensal para Macapá. É de se destacar que a pequena diferença entre os desempenhos dos modelos avaliados e a proximidade dos resultados com os encontrados na literatura cientifica, indica que o modelo de Hargreaves, calibrado com um coeficiente, é também atrativo e robusto para Macapá.*

Palavras-chave: *Energia solar, Temperaturas do ar, Regressão.*

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é a principal fonte de energia de muitos processos físicos e biológicos que acontecem na Terra como variabilidade climática, ciclo hidrológico e crescimento de culturas agrícolas. Além disso, a radiação solar medida na superfície ou radiação solar global (*Rg*) é uma variável de entrada importante nos modelos biofísicos no estudo de riscos de incêndios florestais, gerenciamento de recursos hídricos, balanço de energia em superfícies vegetadas, como também para estimativa do potencial solar à sociedade, na geração de energia fotovoltaica e energia térmica (Kalogirou, 2016; Mejia *et al*., 2022; Sunnu *et al*., 2023).

Para análise da variabilidade mensal ou sazonal do potencial solar no aproveitamento da energia solar, que se dá pelos coletores solares e painéis fotovoltaicos, é necessário o registro da radiação solar global observada ou medida. Contudo esses registros ainda são escassos ou inexistentes em diversas áreas geográficas, como exemplo, na região amazônica, especificamente no estado do Amapá, e isso se dá em decorrência do elevado custos de aquisição e/ou manutenção de equipamentos de registros e estações meteorológicas. Quando existentes, devido a problemas de manutenção ou calibração, os dados de *Rg* são incompletos ou inconsistentes. Para contornar essas dificuldades são empregados métodos, como de sensoriamento remoto e aprendizado de máquina para estimar a radiação solar global, assim como, modelos matemáticos que estimam *Rg* em função de elementos meteorológicos, registrados nas estações e de fácil aquisição, como horas de brilho solar (insolação), precipitação, umidade, temperatura do ar, entre outros (Meza e Varas, 2000; Silva, 2012).

Nesse contexto, tendo a extrema importância de se averiguar a disponibilidade de recurso solar na área de interesse, a saber de um sistema fotovoltaico, pois a quantidade de energia produzida por um sistema depende da radiação solar global no local onde é instalado, este estudo teve como objetivo avaliar os desempenhos dos modelos de estimativas de radiação solar global de Bristow-Campbell (Bristow e Campbell, 1984), Hargreaves (Hargreaves *et al*., 1985) e Hunt (Hunt *et al*., 1998) com base nas temperaturas máximas e mínimas do ar da cidade de Macapá (AP).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Macapá, no Estado do Amapá, situado sob as coordenadas geográficas 0,039°N, 51,066°W, com altitude média de 16 metros, compreendendo uma área aproximada de 6.563.849 km^2 (IBGE, 2022).

O clima da cidade de Macapá-AP é predominantemente tropical com elevada pluviosidade, apresentando duas estações: chuvosa nos meses de janeiro a junho, e menos chuvosa de julho a dezembro (Belúcio *et al.,* 2014). As temperaturas do ar variam em média, aproximadamente, 23˚C (mínima) a 32˚C (máxima). Em média no ano, a precipitação pluvial é aproximadamente de 2561 mm, sendo o maior volume na estação chuvosa, correspondendo a 91% do total anual e a média anual da umidade relativa do ar é de 83% (INMET, 2009 *apud* Belúcio, 2016).

Neste trabalho, utilizaram-se dados das estações meteorológicas automática e convencional, respectivamente, pertencentes ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), coletados diariamente nos períodos de janeiro de 2006 a dezembro de 2011. Os dados diários de irradiação solar global foram registrados por um radiômetro, com piranômetro tipo Kipp e Zonen CMP22 de funcionamento na Plataforma de Coleta de Dados (PCD), pertencente ao INPE, localizado na cidade de Macapá. Os dados diários de temperaturas do ar foram registrados por termômetros, destinados a medir temperaturas máxima e mínima do ar, instalados na estação meteorológica convencional do INMET, situada no distrito de Fazendinha, em Macapá.

No controle de qualidade dos dados, verificou-se a integridade e coerência, utilizando o critério realizado por Belúcio *et al.* (2014) e Silva *et al.* (2012), sendo removidos os dados: (i) ausentes para qualquer um dos elementos temperatura máxima do ar ($T_{máx}$), temperatura mínima do ar ($T_{mín}$) ou radiação solar global (R_g); (ii) $T_{máx} < T_{mín}$; (iii) transmissividade atmosférica ($K_t = R_g/R_o$) > 1, onde R_o é a radiação solar incidente no topo da atmosfera do local; e (iv) $R_g > 0{,}85.R_o$, pois supõe-se que K_t de céu sem nebulosidade é, no máximo, 85%.

Na Tab. 1, apresentam-se os modelos adaptados de Hargreaves (HG), Bristow-Campbel (B-C) e Hunt (HU), originalmente derivados de dados de radiação solar diária e amplitude térmica diária do ar, utilizados nas estimativas de radiação solar global diária média mensal ($\overline{H}_g$).

Tabela 1 - Resumo dos modelos de estimativas da radiação solar global diária média mensal.

Modelo	Equação	Coeficientes	Fonte
HG	$\overline{H}_g = a.\sqrt{\overline{\Delta T}}.\overline{H}_o$	*a*	Hargreaves e Samani (1982)
B-C	$\overline{H}_g = a.\left(1 - e^{(-b.\overline{\Delta T}^c)}\right).\overline{H}_o$	*a, b, c*	Bristow e Campbel (1984)
HU	$\overline{H}_g = a.\sqrt{\overline{\Delta T}}.\overline{H}_o + b$	*a, b*	Hunt *et al.* (1998)

Sendo: $\overline{H}_g$, radiação solar diária média mensal incidente na superfície (MJ.m^{-2}.d^{-1}); $\overline{H}_o$, radiação solar diária média mensal incidente no topo da atmosfera (MJ.m^{-2}.d^{-1}); $\overline{\Delta T}$, variação de temperatura diária média mensal (˚C); *a, b* e *c* são os parâmetros de calibração dos modelos (adimensionais).

Os modelos assumem a premissa de que a amplitude térmica diária do ar em uma superfície está diretamente relacionada à quantidade da radiação solar incidente sobre ela. É importante ressaltar, que a extensão dos três modelos, originalmente derivados de dados de radiação solar diária e amplitude térmica diária do ar, para aplicá-los às médias mensais é possível, em razão dos modelos de Hargreaves e Hunt serem funções lineares nos coeficientes sendo, portanto, facilmente aplicados a dados de médias mensais, uma vez que o valor esperado de uma soma é igual à soma dos valores esperados (Meza e Varas, 2000). O modelo Bristow-Campbell, originalmente definido para dados diários, é possível aplicá-lo para valores médios mensais, pois os coeficientes são calibrados considerando as condições climatológicas do local de estudo. Por esta razão, geralmente, encontra-se um novo conjunto de coeficientes (*a*, *b* e *c*), diferentes dos propostos por Bristow e Campbell (1984), quando o mesmo modelo é aplicado aos dados diários médias mensais

Para a determinação dos coeficientes empíricos *a*, *b* e *c* dos três modelos, inicialmente calculou-se para cada mês do ano a variação de temperatura diária média mensal $\overline{\Delta T}$ (Eq. (1)) e a radiação solar extraterrestre incidente diária média mensal ($\overline{H}_o$) sobre uma superfície horizontal durante o dia (período do nascer ao pôr do Sol), dada pela Eq. (2), segundo Sunnu *et al*., 2023:

$$\overline{\Delta T} = \overline{T}_{máx} - \overline{T}_{mín} \tag{1}$$

$$\overline{H}_o = \frac{24x3600G_{sc}}{\pi}\left[1 + 0{,}033\cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right].\left[\cos(\varphi)\cos\left(\bar{\delta}\right)\sin(\bar{\omega}_s) + \left(\frac{\pi.\bar{\omega}_s}{180}\right)\sin(\varphi)\sin\left(\bar{\delta}\right)\right] \tag{2}$$

onde: $\overline{T}_{máx}$ e $\overline{T}_{mín}$ são as médias mensais das temperaturas máxima e mínima diária do ar (˚C), G_{sc} a constante solar (W.m^{-2}), φ é a latitude local em grau, $\bar{\delta}$ é a declinação solar diária média mensal em graus para o dia médio do mês *n*, Tab.2 (Kalogirou, 2016), e $\bar{\omega}_s$ é o ângulo horário diário médio mensal ao pôr do sol em graus, obtido pela Eq. (3) (Buriol *et al*., 2012; Kalogirou, 2016).

$$\bar{\omega}_s = \cos^{-1}\left(-\tan(\varphi).\tan\left(\bar{\delta}\right)\right) + 0{,}83^{\circ} \quad (3)$$

Tabela 2 – Determinação de n.

Mês	n
Janeiro	17
Fevereiro	31+16
Março	59+16
Abril	90+15
Maio	120+15
Junho	151+11
Julho	181+17
Agosto	212+16
Setembro	243+15
Outubro	273+15
Novembro	304+14
Dezembro	334+10

Fonte: Kalogirou (2016).

A declinação solar diária média mensal ($\bar{\delta}$) para qualquer dia médio do mês (Tab.2), pode ser calculada aproximadamente pela Eq. (4) (Kalogirou, 2016):

$$\bar{\delta} = 23{,}45.\sin\left[\frac{360}{365}(284+n)\right] \quad (4)$$

A seguir, com os dados coletados nas estações meteorológicas nos anos 2007, 2009 e 2011 e tratados como acima descrito, os coeficientes dos modelos da Tab. 1 foram calibrados a partir do método dos mínimos quadrados da diferença entre os valores observados e os estimados (Otaviano, 2006), utilizando o programa livre R (R *Core Team*, 2022). Os dados tratados dos anos de 2006, 2008 e 2010 foram usados na avaliação ou validação do desempenho dos modelos. Em seguida, traçou-se a regressão linear entre a radiação solar global diária média mensal estimada e a radiação solar global diária média mensal observada.

Para avaliar o desempenho de cada modelo na estimativa de $\bar{H}_g$ foram utilizados os indicadores estatísticos, conforme recomendado por Ramos *et al.* (2018) e Willmott *et al*. (1985): coeficiente de determinação R^2 das regressões entre os valores observados e estimados (Eq. (5)), raiz quadrada do quadrado médio do erro (*RQME*) (Eq. (6)), erro médio (*EM*) (Eq. (7)), índice de concordância de Willmott (*d*), Eq. (8), e índice de confiança ou desempenho *c*, proposto por Camargo e Sentelhas (1997) para avaliar estatisticamente o desempenho dos modelos de estimativa (Tab.3), definido através do produto da precisão pela exatidão (Eq. (9)), respectivamente, coeficiente de correlação de Pearson (*r*) entre os valores estimados e observados (Tab.4) e o índice de Willmott *d*.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\right] \quad (5)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i)^2} \quad (6)$$

$$EM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i) \quad (7)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}\right] \quad (8)$$

$$c = r.d \quad (9)$$

em que: E_i é o valor estimado da irradiação solar global diária média mensal, O_i o valor medido na estação meteorológica da radiação solar global diária média mensal, $\bar{O}$ é a média dos valores medidos da radiação solar global diária média mensal, *n* é o número de observações, *d* é o índice de concordância de Willmott e *r* é o coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 3 – Critério de classificação do desempenho dos modelos de estimativa de $\overline{H}_g$ pelo índice *c*.

Valor de *c*	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Ruim
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 4 – Coeficiente de correlação de Pearson.

r	Definição
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Devore (2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Calibração dos modelos

Os valores dos coeficientes determinados para os modelos Hargreaves, Hunt e Bristow-Campbell, utilizando dados diários médias mensais dos anos 2007, 2009 e 2011, são os constantes na Tab. 5.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes empíricos dos modelos Hargreaves (HG), Hunt (HU) e Bristow-Campbell (B-C), calibrados para Macapá.

Modelos	**HG**	**HU**		**B-C**		
Coeficientes	**a**	**a**	**b**	**a**	**b**	**c**
Macapá	0,179	0,338	-16,507	0,695	0,008	2,451

Fonte: Autores.

O valor do coeficiente *a* do modelo B-C para Macapá, que representa a máxima irradiação solar global que pode ser esperada em dia de céu claro, é aproximadamente igual aos encontrados, na mesma escala de trabalho (médias mensais), por Santos (2012) para região de Pão de Açúcar-AL, sendo igual ao valor de 0,684, e o encontrado por Meza e Varas (2000) de 0,7 para várias localidades no Chile. Os coeficientes *b* e *c*, que controlam a taxa na qual *a* varia com a amplitude térmica, *b* variou no estudo de Meza e Varas entre 0,002 a 0,019 e para Santos *et al.* (2021) o valor foi de 0,038, o valor de *c* foi de 2,4 e 1,77, respectivamente. De acordo com Bristow e Campbell (1984), os valores sugeridos para os coeficientes são 0,7 para *a*, 0,004 a 0,010 para *b* e 2,4 para *c*, sendo os valores mais frequentes encontrados na literatura científica.

O valor do coeficiente *a* do modelo de Hargreaves (HG) calibrado para Macapá é de 0,18 $°C^{-0,5}$, próximo ao encontrado por Oliveira, Cavazzana e Souza (2019) na estimativa da irradiação solar global diária média mensal para o Estado de Mato Grosso do Sul, sendo em média de 0,21. Ressalta-se que Hargreaves e Samani (1982) sugere que para locais sem dados de irradiação solar global diária e de amplitude térmica diária do ar, localizados em regiões costeiras, o valor seja 0,19 $°C^{-0,5}$ e em locais de regiões situadas no interior do continente, o valor seja 0,16 $°C^{-0,5}$. Assim, o valor encontrado para Macapá, aproximadamente 0,18 $°C^{-0,5}$, situado entre os dois valores sugeridos por Hargreaves, evidência a universalidade deste modelo.

Os coeficientes do modelo de Hunt (HU) da Tab. 5, também pela primeira vez estimados nas condições ambientais de Macapá, quando comparados com o trabalho de Bender e Sentelhas (2018), utilizando dados diários de irradiação solar global de várias município do Brasil, pertencentes aos estados do Pará, Tocantins, Maranhão, Piauí, Mato Grosso e Góias, além das regiões Sudeste e Sul, apresentam valores próximos, onde o valor de *a* variou de 0,04 a 0,22 e o valor de *b* variou de -7,70 a 9,98.

Assim, as diferenças entre os coeficientes dos modelos avaliados e os encontrados na literatura, indicam a necessidade de calibração desses modelos com dados locais. Os modelos empíricos calibrados com os coeficientes específicos da Tab. 5, levam em consideração as condições ambientais de Macapá.

3.2 ***Validação dos modelos***. Na Tab. 6, mostram-se os índices estatísticos usados na avaliação do desempenho dos modelos empíricos, isto é, estatísticas obtidas pela comparação dos valores observados, utilizando dados diários médios mensais dos anos de 2006, 2008 e 2010, e estimados pelos modelos calibrados.

Tabela 6 – Estatísticas usadas para avaliações dos desempenhos dos modelos.

Modelos	RQME	EM	R^2	r	d	c	Classificação
Bristow-Campbell (B-C)	1,37	-0,37	0,78	0,88	0,93	0,82	Muito bom
Hunt *et al*. (HU)	1,41	-0,35	0,76	0,87	0,92	0,80	Muito bom
Hargreaves (HG)	1,80	-0,21	0,76	0,87	0,79	0,69	Bom

Fonte: Autores.

Os modelos de Bristow-Campbell e Hunt foram os que tiveram melhores desempenhos nas estimativas de $\overline{H}_g$ quando comparados com o desempenho de Hargreaves, em que os modelos apresentaram erros quadráticos médios RQME de 1,37 MJ.m^{-2}.dia^{-1} e 1,80 MJ.m^{-2}.dia^{-1}, respectivamente. Quanto mais próximos de zero estiver RQME, melhor será o desempenho do modelo ou melhor estimativa de $\overline{H}_g$. O índice erro médio EM nos três modelos apresentaram valores negativos, próximos de zero, indicando a quantidade média de subestimativa dos modelos.

Os coeficientes de determinação R^2 dos modelos (Tab.6) ficaram acima de 0,76 e os índices de concordância de Willmott *d* ficaram acima de 0,79, sendo os valores para os modelos B-C e HU mais elevados, acima de 0,92, quando comparados com o valor obtido para o modelo HG. Esses índices variam de 0 a 1 e ambos indicam o quanto os valores estimados se ajustam aos valores observados, isto é, são medidas de ajuste de modelos de regressão aos valores observados. Quanto maior o R^2, mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra, enquanto, o índice *d* para o valor 0, significa nenhuma concordância, sendo 1, concordância perfeita.

Os coeficientes de correlação linear de Pearson *r,* que medem as relações entre os dados estimados e observados, encontrados nos modelos B-C e HU foram acima de 0,87. Tais resultados revelam uma forte correlação entre os dados estimados e observados, de acordo com a classificação de Devore (Tab. 4), sendo o modelo de B-C o que apresentou maior correlação entre os dados, seguido do modelo HU.

Pela Fig.1 é possível verificar a dispersão entre os valores estimados e os observados da irradiação solar global, utilizando dados diários médios mensais dos anos de 2006, 2008 e 2010. A figura mostra que as regressões lineares encontradas (retas de cores vermelhas) podem estimar $\overline{H}_g$ com um coeficiente de determinação R^2 acima de 0,76, sendo, relativamente, o melhor valor de 0,78, encontrado para os modelos de B-C. Meza e Varas (2000) encontraram para os modelos de HG e B-C valores acima de 0,90, ressaltando que a irradiação solar global diária média mensal pode ser adequadamente estimada, utilizando os modelos Hargreaves e Bristow-Campbell. Os modelos utilizados pelos autores foram calibrados com dados de 20 estações meteorológicas do Chile, sendo os modelos validados para dados diários médios mensais de um ano.

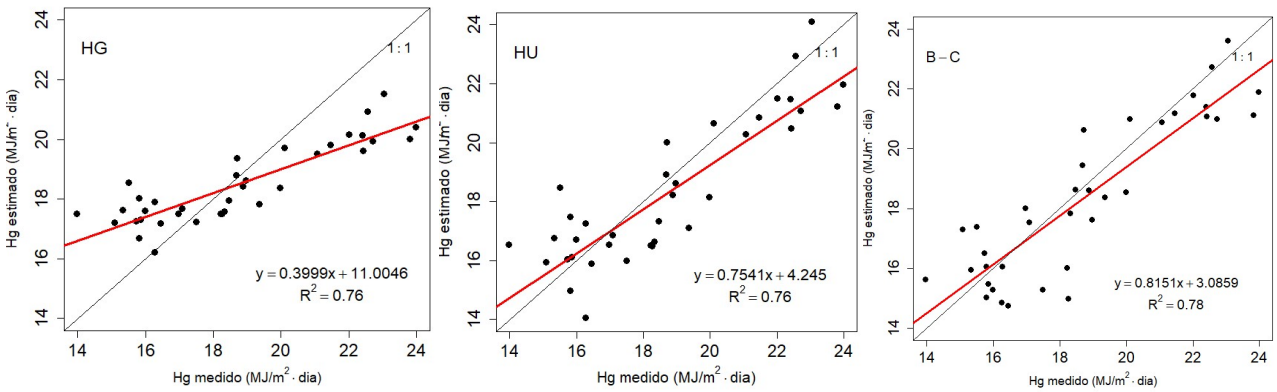

Figura 1 – Comparação entre os valores observados e medidos da irradiação solar global diária média mensal para Macapá, relativos aos modelos Hargreaves (HG), Hunt *et al.* (HU) e Bristow – Campbell (B-C).

Assim, os resultados mostram que os modelos Bristow–Campbell e Hunt (Tab. 6) apresentam uma classificação, conforme Camargo e Sentelhas (1997), muito bom, e melhores desempenhos, apresentando baixos erros EM e RQME inferiores a 1,41 MJ.m^{-2}.dia^{-1}. Contudo, dada a pequena diferença entre os desempenhos dos modelos de Hunt e Bristow–Campbell quando comparados com o desempenho de Hargreaves, os três modelos avaliados são passiveis de utilização para estimativa de radiação solar global diária média mensal.

4 CONCLUSÃO

Na ausência de dados observados de radiação solar global, estimativas podem ser feitas a partir dos dados de amplitude térmica do ar, usando modelos empíricos.

A radiação solar global diária média mensal estimada com os modelos Bristow-Campbell e Hunt mostraram-se fortemente correlacionada com a radiação solar global diária média mensal medida para os anos estudados. Os resultados mostraram que os modelos B-C e HU apresentaram melhores performances, com boas acurácias encontradas no índice de Willmott (0,93 e 0,92), erros médios quadráticos (1,37 $MJm^{-2}d^{-1}$ e 1,41 $MJm^{-2}d^{-1}$), medianas precisões R^2 (0,78 e 0,76), sendo classificados de desempenhos muito bom na estimativa da radiação solar global diária média mensal para Macapá.

A pequena diferença entre os desempenhos dos modelos avaliados e a proximidade dos resultados com os encontrados na literatura cientifica, indica que o modelo de Hargreaves, calibrado com um coeficiente, é também atrativo e robusto para Macapá.

Agradecimentos

Os atores agradecem à Universidade Federal do Amapá e à Universidade Estadual do Amapá pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Belúcio, L. P., 2016. Detectação de ilha de calor urbana na região metropolitana de Macapá, Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental, UEAP.

Belúcio, L. P.; Silva, A. P. N.; Souza, L. R.; Moura, G. B., 2014. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP), Revista Brasileira de Metereologia, v. 29, n.4, pp. 494-504.

Bender, F.; Sentelhas, P. C., 2018. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and project climate change in Brasil, Advances in Meteorology, v. 2, n. 4, pp. 1-15.

Bristow, K. L.; Campbell, G. S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily minimum and maximum temperature, Agricultural and Forest Metereology, v. 31, n. 2, pp. 159-166.

Buriol, G. A; Estefanel, V.; Heldwein, A. B.; Prestes, S. D.; Horn, J. F. C., 2012. Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS, Ciência Rural, v. 42, n. 3, pp.1563-1567.

Camargo, A. P., sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil, 1997. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 5, n. 1, pp. 89-97.

Devore, J. L., 2018. Probabilidade e estatística para Engenharia e Ciência, Thomson Pioneira.

Hargreaves, G. H.; Asce, F.; Riley, J. P.; Asce, M., 1985. Irrigation water requirement for Senegal River Basin, Journal of Irrigtion and Drainage Engineering. v. 111, n. 3, pp. 265-275.

Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A., 1982. Estimating potencial evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.108, pp.225-230.

Hunt, L. A.; Kuchar, L.; Swanton, C. J., 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modelling, Agricultural and Forest Meteorology, n. 91, pp. 293-300.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística., 2022. Cidade e estados. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ap/macapa.html. Acesso em: maio de 2022.

Kalogirou, S. A., 2016. Engenharia de energia solar: processos e sistemas, Elsevier.

Mejia, J. R. R. Prieto, A. W.; Chávez, A. V.; Varela, R. V.; Monteagudo, F. E. L.; Rivas, C. R., 2022. Estimation of solar radiation in Northwest Mexico based on the Angstrom model and polynomial regression, Ingenieria Energética, vol. 43, n.1, pp. 1-13.

Meza, F.; Varas, E., 2000. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature, Agricultural and Forest Metereology, v. 100, pp. 231 – 241.

Oliveira, S. S. DE; Cavazzana, G. H.; Souza, A. DE., 2009. Estimativa da radiação solar global em função da temperatura do ar e isolinhas para o Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 6, n. 12, pp.93-108.

Otaviano, H., 2006. Método dos mínimos quadrados com formalismo matricial, Editora Livraria da Física.

Ramos, J. P. A.; Vianna, M. S.; Marin, F. R., 2018. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil, Agrometeoros, v. 26, n. 1, pp. 37-51.

R Development Core Team., 2022. R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Disponivel em: https://www.r-project.org/. Acesso em: junho de 2022.

Santos, C. M., 2012. Irradiância solar global com diferentes modelos para Alagoas, Dissertação de Mestrado, ICA, UFAL, Maceió.

Silva, V. J., 2012. Desempenho de modelos de estimativa da radiação solar na região do triângulo mineiro. Dissertação de Mestrado, PPGAG, UFU.

Silva, C. R.; Silva, V. J.; Júnior, J. A.; Carvalho, H. P., 2012. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n.3, pp. 281-288.

Sunnu, A. K.; Bawa, A; Yunus, A.; Sarsah, E. A.; Akanbasiam, J. A.; Mensah, P. K., 2023. Empirical Model for Estimating Measured Monthly Average Global Solar Radiation in Lawra using TMY Data, European Journal of Engineering and Tecnology Research, vol. 8, n.1, pp.75-80.

Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, J. J.; Feddema, K.; Klink, D. R., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, v. 90, n. 5, 1985, p. 8995-9005.

ESTIMATION OF MONTHLY AVERAGE GLOBAL SOLAR RADIATION AS A FUNCTION OF THERMAL AIR AMPLITUDE FOR THE CITY OF MACAPÁ – AP

Abstract. *With the growing interest in the use of solar energy in the State of Amapá, through photovoltaic systems, the estimate of daily average monthly global solar radiation, through mathematical models, is of great use in prospecting regions with potential for exploration this energy. Thus, the objective of this study was to evaluate three models for estimating solar radiation for Macapá based on the thermal amplitude of the air, using the Bristow and Campbell (B-C), Hargreaves (HG) and Hunt (HU) models, extended to monthly average measurements. . The models were calibrated and validated based on six years of meteorological data. The performance of each model was evaluated by the coefficient of determination, root mean square error, Willmott's agreement index, Pearson's correlation coefficient and the index performance. The results showed that the B-C and HU models presented better performances, with good accuracies found in the Wilmott index (0.93 and 0.92), mean squared errors (1.37 $MJm^{-2}d^{-1}$ and 1.41 $MJm^{-2}d^{-1}$), median R^2 accuracies (0.78 and 0.76), being classified as very good performance in estimating the monthly average daily global solar radiation for Macapá. It is highlight that the small difference between the performances of the models evaluated and the proximity of the results to those found in the scientific literature, indicates that the Hargreaves model, calibrated with a coefficient, is also attractive and robust for Macapá.*

Keywords: *Solar energy, Air temperatures, Regression.*