

ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL POR DIFERENTES MÉTODOS DE REGRESSÃO BASEADOS EM HORAS DE BRILHO SOLAR

Matheus Rodrigues Raniero - matheus.raniero@unesp.br

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp), Câmpus de Botucatu

Marcus Vinícius Contes Calça

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp), Câmpus de Botucatu

José Rafael Franco

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp), Câmpus de Botucatu

Daniele Cristina Lopes Mariano

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp), Câmpus de Botucatu

Enzo Dal Pai

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp), Câmpus de Botucatu

Alexandre Dal Pai

Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp), Câmpus de Botucatu

Resumo. O objetivo deste estudo consistiu em avaliar diferentes métodos de estimativa para a irradiação solar global, em superfície horizontal e em escala diária (MJ/m²/dia), para a cidade de Botucatu, São Paulo, Brasil. Além do método linear tradicional de Angstrom-PreScott, foram consideradas funções polinomiais de grau 2 a grau 4, bem como abordagens logarítmicas e exponenciais. Os dados de brilho solar utilizados para desenvolver o modelos empíricos foram coletados por um software, utilizando técnicas de processamento digital de imagens. O período de 01/01/2015 a 31/12/2015 foi selecionado para o desenvolvimento dos modelos empíricos. O desempenho dos modelos empíricos foi avaliado por meio dos indicadores MBE, rMBE, RMSE, rRMSE e r. Para classificar os modelos com melhor desempenho utilizou-se o Índice de Desempenho Global (IDG). A utilização do IDG simplificou a análise de desempenho dos modelos empíricos, permitindo integrar os resultados individuais dos indicadores em um único valor. O modelo de polinômio de grau 3 apresentou maior acurácia para estimar a irradiação solar global na cidade de Botucatu.

Palavras-chave: Modelagem de Radiação solar. Métodos de Regressão.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento de dados climáticos (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) e, principalmente, das componentes da radiação solar (global, difusa e direta), é um requisito essencial para projetar e avaliar qualquer sistema de energia solar (Alam, Kaushik, Garg, 2009). Sendo, do mesmo modo, parâmetros importantes para sistemas de simulação ou previsão climatológicas e agrícolas. Considerando sua grande importância, a demanda por dados precisos de radiação solar tem crescido significativamente (Das, Park, Park, 2015; Paulescu *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2011).

Em geral, a forma mais precisa de determinar a quantidade de radiação solar em um local específico, envolve a instalação de instrumentos de medição de alta precisão, como piranômetros e pireliômetros (Khorasanizadeh e Mohammadi, 2016). No entanto, devido a uma série de obstáculos, como a escassez de instrumentos necessários e questões financeiras, os dados de radiação solar não estão facilmente acessíveis, especialmente para estações em países em desenvolvimento e regiões isoladas (Tahir *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, torna-se indispensável o desenvolvimento de modelos empíricos que possam estimar as componentes da radiação solar com base em outros parâmetros meteorológicos prontamente disponíveis (Liu *et al.*, 2012; Varejão-Silva, 2006; Zhao, Zeng, Han, 2013). Diversas estações ao redor do mundo registram as horas de brilho solar, e os modelos empíricos baseados nesse parâmetro são amplamente aceitos, pois oferecem resultados precisos ao estimar a radiação solar global (El-Metwally, 2004; Iqbal, 1983; Liu *et al.*, 2012; Paulescu *et al.*, 2016).

O modelo empírico de Angstrom-PreScott é amplamente utilizado, correlacionando a razão da radiação solar global para a radiação solar extraterrestre com a razão das horas de brilho solar para o fotoperíodo. Esse princípio de correlação foi aplicado em diversos estudos ao longo das décadas, onde, além das correlações lineares, foram exploradas também as relações quadráticas, cúbicas, logarítmicas e exponenciais (Anis *et al.*, 2019; Despotovic *et al.*, 2015).

O objetivo deste estudo consistiu em avaliar diferentes métodos de estimativa para a irradiação solar global, em superfície horizontal e em escala diária (MJ/m²/dia), para a cidade de Botucatu, São Paulo, Brasil. Além do método linear tradicional de Angstrom-PreScott, foram consideradas funções polinomiais de grau 2 a grau 4, bem como abordagens logarítmicas e exponenciais. Além disso, os dados de brilho solar utilizados para desenvolver os modelos empíricos foram coletados por um software, utilizando técnicas de processamento digital de imagens.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localidade e clima

O estudo foi conduzido no Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (Agromet), localizado no departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp) de Botucatu. O município de Botucatu encontra-se na região centro-sul do estado, a 235 km da capital estadual, São Paulo. Ocupando uma área de 1.482,64 km², com uma população estimada de 145.155 habitantes em 2022 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2023). Suas coordenadas geográficas são 22° 53' 09" de latitude sul e 48° 26' 42" de longitude oeste (Prefeitura de Botucatu, 2023). Com base nos critérios climáticos de Köppen, é possível classificar o clima de Botucatu como Aw, caracterizado como savana tropical, com um inverno seco e um verão quente e chuvoso (Franco *et al.*, 2023).

2.2 Medidas e instrumentação

O período de 01/01/2015 a 31/12/2015 foi selecionado para o desenvolvimento dos modelos empíricos deste estudo. Os cartões de papel contendo medidas de brilho solar, também conhecidos como heliogramas, foram cedidos pela Estação Meteorológica Lageado (EML), localizada nas coordenadas geográficas 22° 50' 48,124" de latitude sul e 48° 25' 53,821" de longitude oeste, a 786 metros de altitude. As medidas de irradiância solar global foram cedidas pela Estação Solarimétrica Lageado (ESL), localizada nas coordenadas geográficas 22° 50' 49,661" de latitude sul e 48° 25' 54,221" de longitude oeste, a 786 metros de altitude.

A Fig. 1a apresenta o Heliógrafo de Campbell-Stokes, responsável por registrar as horas de brilho solar em heliogramas. A irradiância solar global em superfície horizontal foi registrada a partir de um piranômetro *Eppley*, modelo *Precision Spectral Pyranometer* (Fig. 1b). Utilizou-se um datalogger CR3000 da Campbell Scientific para monitorar e armazenar as medidas de irradiância solar global. O sistema foi programado para realizar leituras a cada 5 segundos e armazenar médias a cada intervalo de 5 minutos, expressas em W/m², resultando em 288 médias diárias. Posteriormente, esses valores médios em W/m² foram integrados para a partição de tempo diária, em MJ/m²/dia.

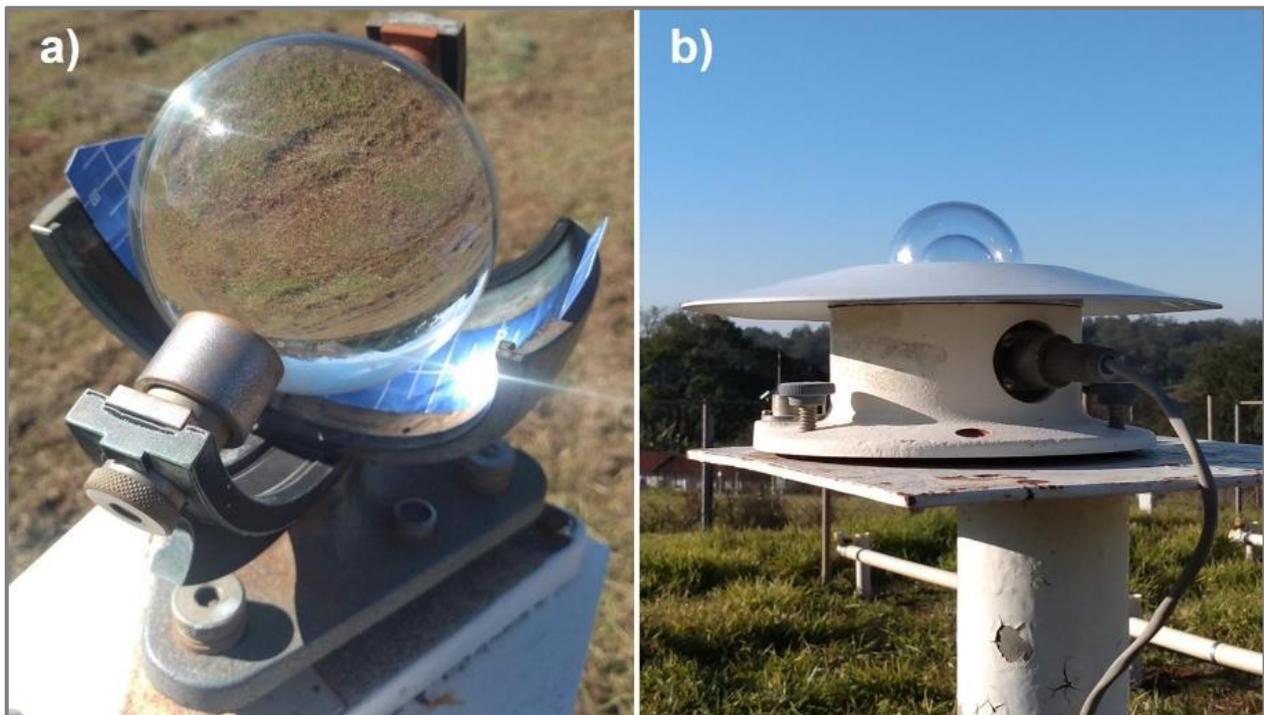


Figura 1 - Instrumentação: a) horas de brilho solar; b) irradiância solar global

Todos os instrumentos estão instalados em uma área rural com grama verde e curta, a uma altura de 1,5 metros do solo. Esses instrumentos foram cuidadosamente mantidos e verificados diariamente pelos observadores responsáveis, aderindo às diretrizes de instrumentação e métodos de observação estabelecidos pela Organização Mundial de Meteorologia (World Meteorological Organization - WMO, 2012).

2.3 Coleta automatizada de horas de brilho solar

O *software* intitulado de SunCounter foi desenvolvido para coletar e gerenciar dados de brilho solar registrados pelo heliógrafo da estação convencional da fazenda Lageado. Por meio da aplicação de técnicas avançadas de Processamento Digital de Imagens (PDI), o *software* é capaz de extrair os dados de brilho solar contidos em imagens digitalizadas de heliogramas, armazenando essas informações e as imagens correspondentes em um banco de dados eletrônico. O uso desse *software* possibilitou a padronização, automatização e agilizou a rotina operacional de coleta de dados de brilho solar (Raniero, 2020).

Sendo assim, os heliogramas contendo medidas de brilho solar foram digitalizados e suas imagens digitais foram processadas pelo *software* SunCounter. O método automatizado do *software* compreende duas etapas principais: o pré-processamento das imagens digitalizadas e a contabilização. Na etapa de pré-processamento, é realizada a extração dos objetos de interesse da imagem, sendo a queima do papel presente nos heliogramas. Já na etapa de contabilização, a imagem resultante do pré-processamento é dividida em regiões que representam as horas do dia, permitindo contabilizar o brilho solar ao longo das horas. Ao final dessa etapa, é realizada a somatória de cada hora, o que fornece o brilho solar diário (Raniero, 2020).

2.4 Modelos empíricos do estudo

Com base na literatura, simplicidade de aplicação e desempenho elevado, optou-se por utilizar a relação entre o índice de transmissividade atmosférica (K_t) e a razão de insolação (S), representada pela Eq. (1), para desenvolver os modelos empíricos de irradiação solar global (H_g), conforme a clássica equação de Angstrom-PreScott. Além do método linear convencional, foram considerados mais cinco métodos de estimativa, abrangendo funções polinomiais de grau 2 a grau 4, bem como abordagens logarítmicas e exponenciais.

$$\left(K_t = \frac{H_g}{H_e} \right) \approx f\left(S = \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

sendo que H_g representa a irradiação solar global em superfície horizontal e em MJ/m²/dia, H_e é a irradiação solar extraterrestre em superfície horizontal e em MJ/m²/dia (calculada conforme Varejão-Silva, 2006), n as horas de brilho solar e N o fotoperíodo (calculado conforme Varejão-Silva, 2006).

A Fig. 2 mostra a relação e dispersão de K_t e S para o período considerado em Botucatu. Os pontos apresentam alta correlação, mas para cada valor de S , há uma ampla variação de valores de K_t . Esse efeito decorre da considerável variabilidade nas concentrações de nuvens, envolvendo diferentes tipos de camadas, números e espessuras, além da presença de vapor d'água e aerossóis na atmosfera. Esses elementos absorvem e dispersam a irradiação solar global de maneiras diversas. Em resumo, embora muitas combinações de cobertura de céu possam gerar o mesmo valor de S , não se pode esperar o mesmo para K_t , especialmente em situações que S se aproxima de zero (Da Silva *et al.*, 2017).

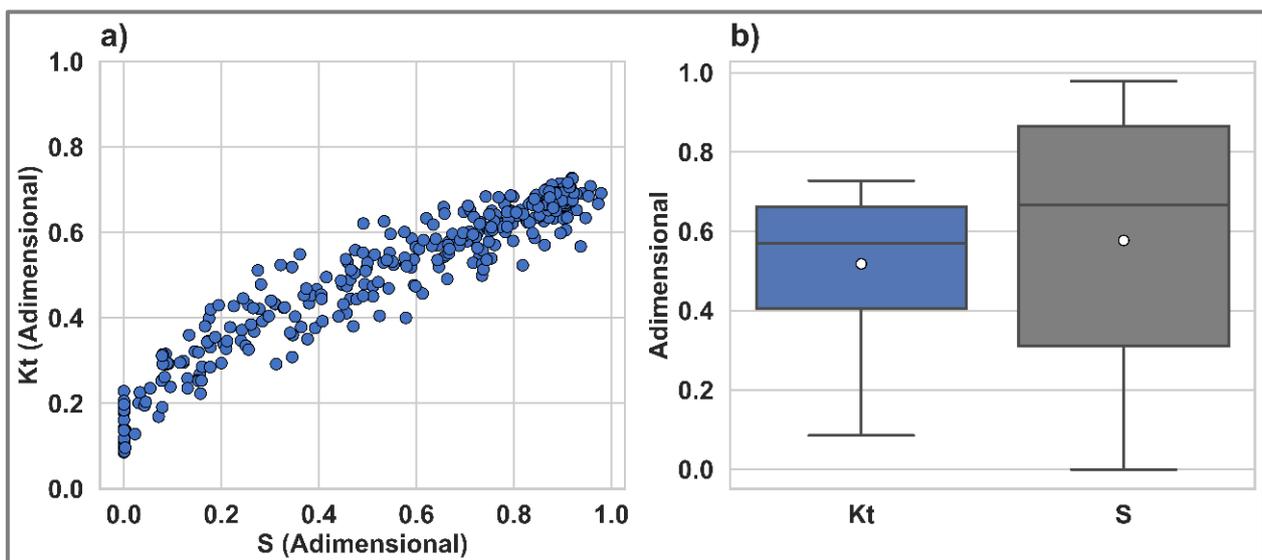


Figura 2 - Relação e dispersão das variáveis

Para cada modelo empírico proposto no estudo, os dados foram reamostrados aleatoriamente e divididos em dois conjuntos. O primeiro conjunto, composto por 75% dos dados reamostrados, foi usado para treinar o modelo empírico e gerar os coeficientes dos modelos, bem como o coeficiente de determinação ajustado (R^{2A} , Eq. 2). O segundo subconjunto, que consistia em 25% dos dados reamostrados, foi empregado para testar o desempenho do modelo

treinado. O teste de desempenho foi realizado por meio de indicadores estatísticos aplicados nas comparações entre as estimativas geradas pelos modelos e as medidas coletadas pelos instrumentos de medição.

$$R^{2AJ} = R^2 - \left(\frac{K - 1}{p - K} \right) (1 - R^2) \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^p (Y_i - Y'_i)^2}{\sum_{i=1}^p (Y_i - \bar{Y})^2} \right) \quad (3)$$

sendo que R^2 denota o coeficiente de determinação, K representa a quantidade de parâmetros utilizados no modelo empírico, p é o número de amostras, Y corresponde aos dados de referência (as medidas de Hg), Y' representa os dados para comparação (os valores gerados pelos modelos empíricos) e \bar{Y} é a média de Y (Millán-Ocampo *et al.*, 2021; Sólis-Pérez *et al.*, 2022).

2.5 Indicadores estatísticos de desempenho

O desempenho dos modelos empíricos em gerar estimativas foi julgado utilizando os seguintes indicadores estatísticos: *Mean Bias Error* (MBE), *Relative Mean Bias Error* (rMBE), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Relative Root Mean Square Error* (rRMSE) e Coeficiente de correlação (r). Valores próximos de 0 são desejáveis para os indicadores MBE, rMBE, RMSE e rRMSE, enquanto valores próximos de 1 são desejáveis para o indicador r . Além disso, a precisão de cada modelo pode ser classificada como excelente quando o rRMSE é inferior a 10%, boa entre 10% e 20%, baixa entre 20% e 30%, e ruim quando superior a 30% (Li *et al.*, 2013). As equações para cada um dos indicadores de desempenho são apresentadas abaixo:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (4)$$

$$rMBE (\%) = \frac{MBE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (5)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$rRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (7)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^p (Y'_i - \bar{Y}') (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (Y'_i - \bar{Y}')^2 \sum_{i=1}^p (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

tal que Y representa os dados de referência (as medidas de Hg), Y' representa os dados para comparação (os valores gerados pelos modelos empíricos), \bar{Y} é a média de Y , \bar{Y}' é a média de Y' e p representa o número de dados do teste de desempenho (Anis *et al.*, 2019; Rincón *et al.*, 2018; Da Silva *et al.*, 2017).

2.6 Indicativo de desempenho global

Para determinar os modelos empíricos com melhor desempenho, empregou-se o Indicativo de Desempenho Global (IDG), conforme definido na Eq. (9). O IDG é uma ferramenta robusta que integra os resultados individuais dos indicadores considerados (MBE, rMBE, RMSE, rRMSE e r), permitindo classificar o desempenho dos modelos por meio de um único valor. Ou seja, um modelo é classificado em primeiro lugar quando alcança o IDG mais elevado, e os modelos subsequentes são organizados e classificados de acordo com valores decrescentes de IDG (Despotovic *et al.*, 2015; Jamil e Siddiqui, 2018).

$$IDG_i = \sum_{j=1}^5 a_j (\tilde{y}_j - \tilde{y}_{ij}) \quad (9)$$

$$a_j = \begin{cases} -1, & \text{para o indicador } r \\ +1, & \text{para os outros indicadores} \end{cases} \quad (10)$$

tal que a_j é o fator de peso igual a -1 para o indicador r e 1 para todos os outros indicadores, \bar{y}_j representa a média do indicador escalonado j, \tilde{y}_{ij} é o valor escalonado do indicador j para o modelo i (Eq. 11).

$$\tilde{y}_{ij} = \frac{(|y_{ij}| - |y_{\min_j}|)}{(|y_{\max_j}| - |y_{\min_j}|)} \quad (11)$$

em que y_{ij} é o valor do indicador j para o modelo i, y_{\min_j} representa o valor mínimo do indicador j e y_{\max_j} é o valor máximo do indicador j. Os indicadores estatísticos foram escalonados apenas para gerar o IDG, evitando a influência predominante de qualquer indicador específico, de modo que o valor mínimo do indicador escalonado seja 0 e o valor máximo seja 1 (Behar *et al.*, 2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os modelos empíricos foram apresentados e avaliados, e os resultados foram comparados com estudos semelhantes na literatura. Os modelos propostos para estimar Hg são descritos na Tab. 1, com Eqs. numeradas de 12 a 17 (Modelos G4:KtxS a EX:KtxS). Além disso, os valores de R^{2AJ} são apresentados, variando de 0,8704 (modelo baseado na função exponencial) a 0,9292 (modelo de polinômio de grau 4). Esses valores estão em conformidade com as observações de Da Silva *et al.* (2017) em Botucatu, São Paulo, que relataram valores R^2 variando de 0,88 a 0,89.

Similarmente, são próximos aos encontrados em outras regiões do Brasil. Da Silva *et al.* (2021) em Goiânia, Goiás, revelaram um R^2 de 0,86. Bexaira *et al.* (2018) em 13 cidades do Rio Grande do Sul apresentaram R^2 variando de 0,81 a 0,98. Medeiros, Silva e Bezerra (2017), em 4 cidades do Rio Grande do Norte, alcançaram valores de R^2 de 0,80 a 0,90. De Souza *et al.* (2016) em 3 cidades de Alagoas registraram R^2 de 0,46 a 0,85. Em Ponta Grossa, Paraná, Beruski, Pereira e Sentelhas (2015) obtiveram elevados valores de R^2 na faixa de 0,98 a 0,99.

Tabela 1 - Modelos propostos para estimar Hg (dados de treinamento)

Modelo	R^{2AJ}	Equação
G4:KtxS	0,9292 ⁺⁺	$Kt = -1,717(S)^{4++} + 3,913(S)^{3++} - 3,163(S)^{2++} + 1,511(S)^{++} + 0,151^{++}$ (12)
G3:KtxS	0,9275 ⁺⁺	$Kt = 0,632(S)^{3++} - 1,193(S)^{2++} + 1,133(S)^{++} + 0,161^{++}$ (13)
G2:KtxS	0,9234 ⁺⁺	$Kt = -0,282(S)^{2++} + 0,798(S)^{++} + 0,179^{++}$ (14)
G1:KtxS	0,9087 ⁺⁺	$Kt = 0,523(S)^{++} + 0,215^{++}$ (15)
LG:KtxS	0,9230 ⁺⁺	$Kt = 0,762\ln(S)^{++} + 0,187^{++}$ (16)
EX:KtxS	0,8704 ⁺⁺	$Kt = 0,304\exp(S)^{++} - 0,050^{++}$ (17)
Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial; ⁺⁺ Significativo a 99%.		

A Fig. 3 apresenta a dispersão entre as medidas de Hg e a irradiação solar global estimada (Hg') pelas Eqs. 12 a 17 (Modelos G4:KtxS a EX:KtxS). Nota-se que os valores estimados pelos modelos empíricos estão próximos aos valores medidos de Hg, indicando forte correlação positiva. No entanto, em comparação aos demais modelos, o modelo baseado na função exponencial (EX:KtxS) apresenta maior tendência em superestimar as medidas de Hg em valores menores que 10 MJ/m²/dia e maior tendência em subestimar as medidas de Hg em valores acima de 15 MJ/m²/dia, conforme aponta a reta ideal pontilhada (1:1).

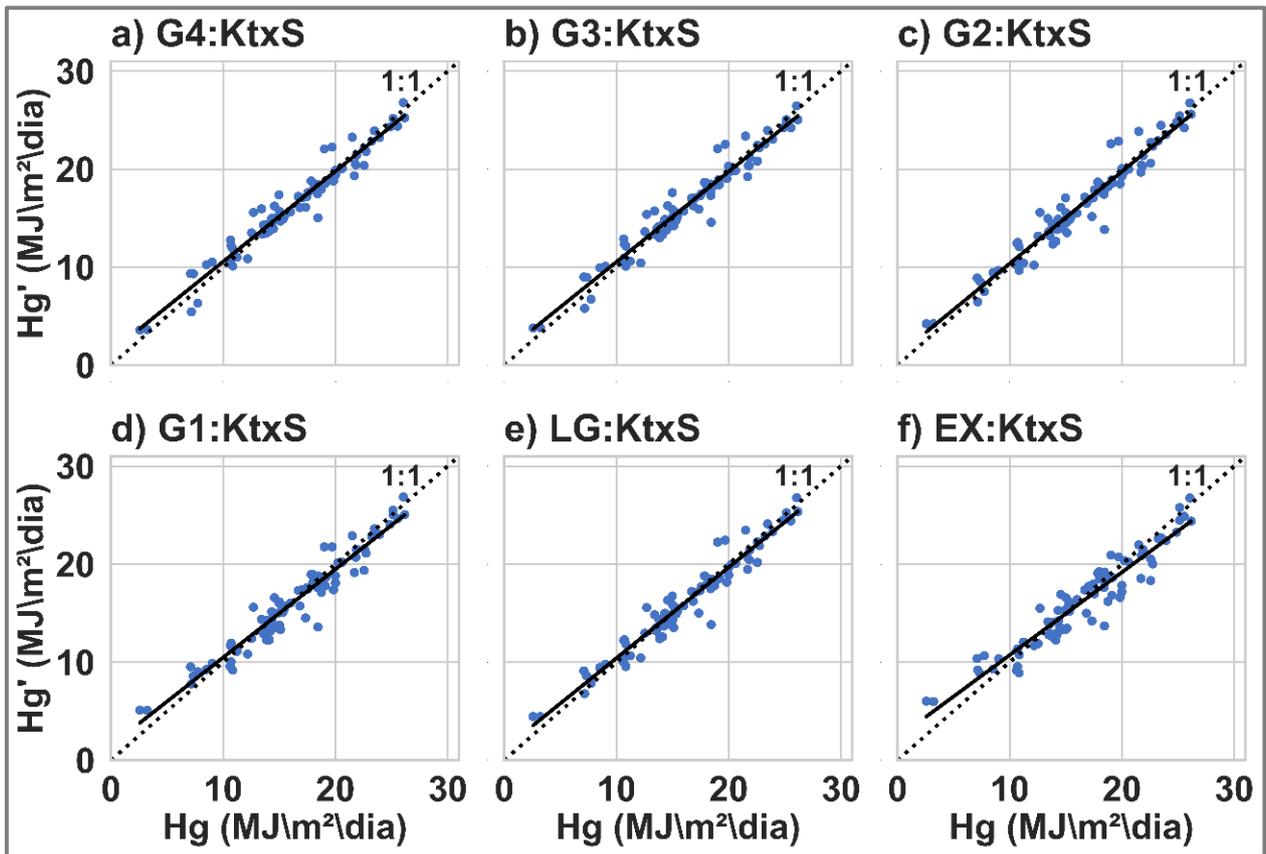


Figura 3 - Dispersão entre Hg e Hg' (dados de teste)

A Tab. 2 exhibe os resultados do teste de desempenho dos modelos empíricos de Hg, por meio dos indicadores de desempenho. Os modelos apresentam valores de MBE variando de -0,2734 MJ/m²/dia a 0,0732 MJ/m²/dia e rMBE de -1,6670% a 0,4466%, sendo que os modelos G4:KtxS e G3:KtxS demonstram tendência em superestimar as medidas, enquanto os demais modelos tendem a subestimar. Quanto ao restante dos indicadores, os valores de RMSE oscilam de 1,1825 MJ/m²/dia a 1,6528 MJ/m²/dia, rRMSE de 7,2109% a 10,0788% (excelente resultado), e r de 0,9509 a 0,9739.

Resultados semelhantes foram observados por Da Silva *et al.* (2017) em Botucatu, São Paulo (MBE de -0,5 a 0,2; rMBE de -3,0 a 1,1; RMSE de 2,3 a 2,7; rRMSE de 13,1 a 15,7; r de 0,94). Do mesmo modo, para alguns indicadores, valores aproximados foram encontrados em outras localidades por Da Silva *et al.* (2021) em Goiânia, Goiás (RMSE de 0,8; r de 0,93), por Medeiros, Silva e Bezerra (2017) em 4 cidades do Rio Grande do Norte (MBE de -0,1 a 1,1; RMSE de 1,0 a 1,9; r de 0,89 a 0,96), por Beruski, Pereira e Sentelhas (2015) em Ponta Grossa, Paraná (RMSE de 1,2 a 1,6), por Mohammadi *et al.* (2015) em Isfahã, Irã (RMSE de 2,6 a 2,8; rRMSE de 13,8 a 14,3) e por Trnka *et al.* (2005) em 10 localidades na Áustria e República Tcheca (MBE de -0,5 a 0,3; rMBE de -4,1 a 3,1; RMSE de 1,4 a 1,8; rRMSE de 13,0 a 17,3).

Tabela 2 - Desempenho dos modelos empíricos de Hg (dados de teste)

Modelo	MBE	rMBE	RMSE	rRMSE	r
G4:KtxS (Eq. 12)	0,0732	0,4466	1,1825	7,2109	0,9739
G3:KtxS (Eq. 13)	0,0357	0,2179	1,1945	7,2840	0,9732
G2:KtxS (Eq. 14)	-0,0173	-0,1054	1,2502	7,6241	0,9702
G1:KtxS (Eq. 15)	-0,1627	-0,9923	1,3632	8,3127	0,9656
LG:KtxS (Eq. 16)	-0,0620	-0,3784	1,2384	7,5519	0,9710
EX:KtxS (Eq. 17)	-0,2734	-1,6670	1,6528	10,0788	0,9509

Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial.

Ao avaliar o desempenho individual dos modelos empíricos propostos com base nos indicadores de desempenho e no IDG, apresentado na Fig. 4, destaca-se que o modelo EX:KtxS evidenciou o menor desempenho em relação a todos os indicadores considerados, incluindo MBE (-0,2734 MJ/m²/dia), rMBE (-1,6670%), RMSE (1,6528 MJ/m²/dia), rRMSE (10,0788%) e r (0,9509). Como resultado, o IDG associado a esse modelo foi o mais baixo, atingindo -3,4864, indicando um desempenho geral inferior em comparação com os demais modelos.

Em contrapartida, o modelo G2:KtxS se destacou positivamente em relação aos indicadores MBE (-0,0173 MJ/m²/dia) e rMBE (-0,1054%). Por outro lado, o modelo G4:KtxS demonstrou melhor desempenho nos indicadores RMSE (1,1825 MJ/m²/dia), rRMSE (7,2109%) e r (0,9739). No entanto, o modelo G3:KtxS obteve maior equilíbrio entre os indicadores, com melhor desempenho em termos de MBE e rMBE em comparação com o modelo G4:KtxS, além de superar o modelo G2:KtxS em relação ao RMSE, rRMSE e r. Deste modo, o modelo com polinômio de grau 3 (G3:KtxS), se sobressaiu como o mais acurado para estimar Hg, com um IDG de 1,2906.

Em outras regiões do mundo, o uso do modelo com polinômio de grau 3 tem demonstrado superioridade, conforme evidenciado por Bahel, Bakhsh e Srinivasan (1987) em um estudo abrangendo 48 cidades ao redor do globo. Também se mostrou mais vantajoso para Yaniktepe e Genc (2015) em Osmaniye (Turquia), para Mecibah *et al.* (2014) em 6 localidades na Argélia, para Teke e Yıldırım. (2014) em 4 cidades da Turquia, para Jin, Yezheng e Gang (2005) em 69 localidades na China, e para Ulgen e Hepbasli (2004) em 3 cidades da Turquia. Além de ser recomendado por Aras, Balli e Hepbasli (2006) em 12 cidades na Turquia e por Rensheng *et al.* (2006) para 86 localidades na China.

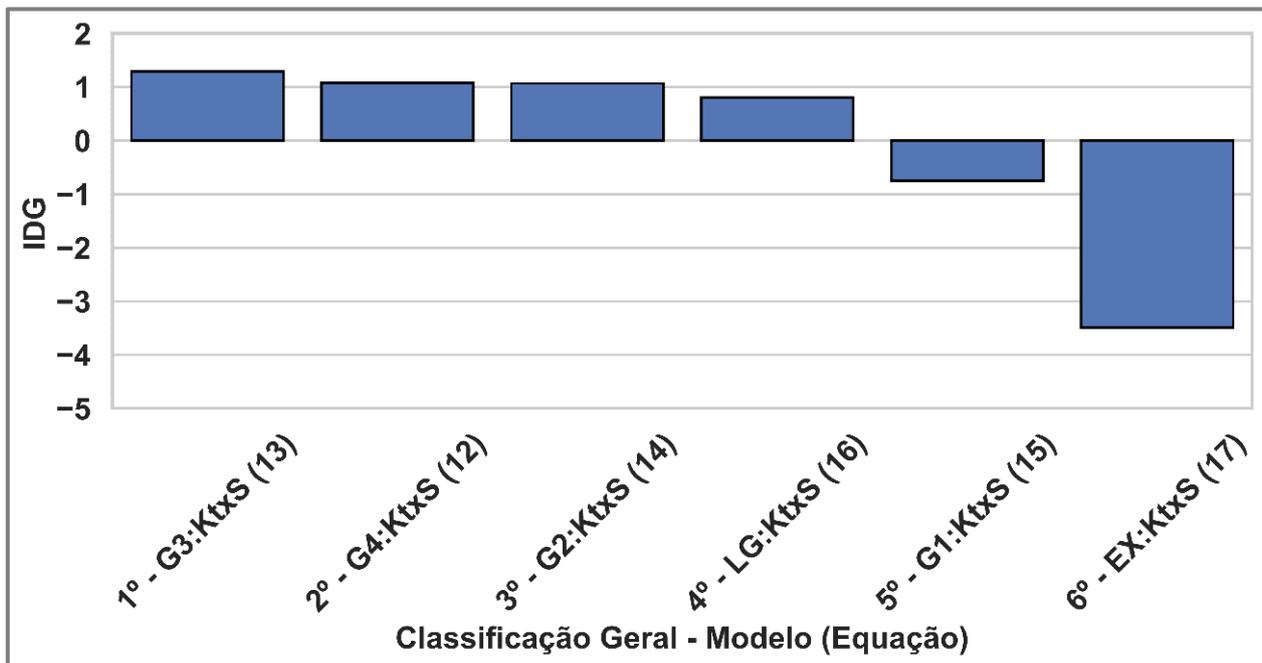


Figura 4 - IDG dos modelos empíricos de Hg (dados de teste)

Adicionalmente, os modelos empíricos G4:KtxS (Eq. 12) e G2:KtxS (Eq. 14) apresentam valores de IDG próximos ao modelo com o melhor desempenho global, G3:KtxS (Eq. 13), indicando que também podem ser considerados como alternativas viáveis para a estimativa de Hg.

4. CONCLUSÕES

Devido a desafios como a escassez de instrumentos e questões financeiras, os dados de irradiação solar global são limitados, especialmente em estações de países em desenvolvimento e áreas isoladas. Diante desse cenário, é crucial desenvolver modelos empíricos capazes de estimar essa irradiação com base em outros parâmetros meteorológicos disponíveis. Por meio de dados de brilho solar coletados de maneira automatizada e padronizada, o estudo possibilitou desenvolver modelos empíricos para estimar a irradiação solar global no município de Botucatu, São Paulo, Brasil. A partir dos resultados apresentados, se obteve as seguintes conclusões:

- A utilização do IDG simplificou a análise de desempenho dos modelos empíricos, permitindo a integração dos resultados individuais dos indicadores em um único valor. Isso viabilizou a seleção dos modelos com desempenho superior, facilitando a avaliação e a comparação entre os diferentes modelos propostos;
- Para os modelos empíricos de Hg, foi observado que 3 modelos apresentaram desempenho elevado e próximo, conforme indicado pelo IDG. No entanto, entre esses 3 modelos, o modelo G3:KtxS (Eq. 13) se destacou como o mais acurado, com a seguinte equação matemática:

$$K_t = 0,632(S)^3 - 1,193(S)^2 + 1,133(S) + 0,161$$

REFERÊNCIAS

- Alam, S., Kaushik, S. C., Garg, S. N., 2009. Assessment of diffuse solar energy under general sky condition using artificial neural network, *Applied Energy*, vol. 86, n. 4, pp. 554-564.
- Anis, Md. S. *et al.*, 2019. Generalized models for estimation of global solar radiation based on sunshine duration and detailed comparison with the existing: A case study for India, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 31, pp. 179-198.
- Aras, H., Balli, O., Hepbasli, A., 2006. Global solar radiation potential, part 1: model development, *Energy Sources*, vol. 1, pp. 303-315.
- Bayrakçi, H. C., Demircan, C., Keçebaş, A., 2018. The development of empirical models for estimating global solar radiation on horizontal surface: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2771-2782.
- Bahel, V., Bakhsh, H., Srinivasan, R., 1987. A correlation for estimation of global solar radiation, *Energy*, vol. 12, pp. 131-135.
- Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., 2015. Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate: the case of direct irradiance, *Energy Conversion and Management*. vol. 98, pp. 236-251.
- Beruski, G. C., Pereira, A. B., Sentelhas, P. C., 2015. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR, *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 30, n. 2, pp. 205-213.
- Bexaira, K. P. *et al.*, 2018. Coeficientes de Angström-Prescott para Estimar a Radiação Solar no Rio Grande do Sul, *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 33, n. 3, pp. 401-411.
- Da Silva, E. P. P. B. *et al.*, 2021. Parametrização das Equações de Hargreaves & Samani e Ångström-Prescott Para Estimativa da Radiação Solar em Goiânia-GO, *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 36, n. 4, pp. 683-688.
- Da Silva, M. B. P. *et al.*, 2017. Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 26, pp. 11-23.
- Das, A., Park, J., Park, J., 2015. Estimation of available global solar radiation using sunshine duration over South Korea, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 134, pp. 22-29.
- Despotovic, M. *et al.*, 2015. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models, *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 56, pp. 1869-1880.
- De Souza, J. L. *et al.*, 2016. Empirical models of daily and monthly global solar irradiation using sunshine duration for Alagoas State, Northeastern Brazil, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 14, pp. 35-45.
- El-Metwally, M., 2004. Simple new methods to estimate global solar radiation based on meteorological data in Egypt, *Atmospheric Research*, vol. 69, pp. 217-239.
- Estação Meteorológica Lageado - EML, 2023. Estações meteorológicas. Disponível em: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.php>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- Estação Solarimétrica Lageado - ESL, 2023. Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar. Disponível em: <http://solarimetria.fca.unesp.br>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- Franco, J. R. *et al.*, 2023. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP, *Irriga*, vol. 28, n. 1.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2023. Panorama do município de Botucatu - SP. Cidades: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 28 fev. 2023.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation, Ontario: Academic Press.
- Jamil, B., Siddiqui, A. T., 2018. Estimation of monthly mean diffuse solar radiation over India: performance of two variable models under different climatic zones, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 25, pp. 161-180.
- Jin, Z., Yezheng, W., Gang, Y., 2005. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China, *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 257-268.
- Khorasanizadeh, H., Mohammadi, K., 2016. Diffuse solar radiation on a horizontal surface: reviewing and categorizing the empirical models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 338-362.
- Li, M. F. *et al.*, 2013. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China, *Energy Conversion and Management*, vol. 70, pp. 139-148.
- Liu, X. *et al.*, 2012. Assessing models for parameters of the Ångström-Prescott formula in China, *Applied Energy*, vol. 96, pp. 327-338.
- Mecibah, M. S. *et al.*, 2014. Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 194-202.
- Medeiros, F. J., Silva, C. M. S., Bezerra, B. G., 2017. Calibration of Ångström-Prescott Equation to Estimate Daily Solar Radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil, *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 32, n. 3, pp. 409-461.
- Millán-Ocampo, D. E. *et al.*, 2021. Electrochemical deposition of copper using a modified electrode with polyaniline film: Experimental analysis and ANN-based prediction, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 123, pp. 272-283.

- Mohammadi, K. *et al.*, 2015. Support vector regression based prediction of global solar radiation on a horizontal surface, *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 433-441.
- Paulescu, M. *et al.*, 2016. Ångström–Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 495-506.
- Raniero, M. R., 2020. SunCounter: Programa computacional para contagem automatizada de horas de brilho solar registradas por heliógrafos, *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu*.
- Rensheng, C. *et al.*, 2006. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China, *Energy Conversion and Management*, vol. 47, n. 7-8, pp. 865-878.
- Rincón, A. *et al.*, 2018. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay, *Solar Energy*, vol. 170, pp. 201-211.
- Sólis-Pérez, J. E. *et al.* Artificial neural networks with conformable transfer function for improving the performance in thermal and environmental processes, *Neural Networks*, vol. 152, pp. 44-56.
- Souza, A. P. *et al.*, 2022. Estimativa das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação solar global horizontal, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, n. 3, pp. 277-288, 2011.
- Tahir, Z. R. *et al.*, 2021. Estimation of daily diffuse solar radiation from clearness index, sunshine duration and meteorological parameters for different climatic conditions, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, pp. 101544.
- Teke, A., Yildirim, H. B., 2014. Estimating the monthly global solar radiation for Eastern Mediterranean Region. *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 628-635.
- Trnka, M. *et al.*, 2005. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formula, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 131, pp. 54-76.
- Ulgen, K., Hepbasli, A., 2004. Solar radiation models. Part 2: comparison and developing new models, *Energy Sources*, vol. 26, pp. 521-530.
- Varejão-Silva, M. A., 2006. *Meteorologia e Climatologia, Versão Digital 2*.
- World Meteorological Organization - WMO, 2012. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, Geneva: World Meteorological Organization, n. 8.
- Yaniktepe, B., Genc, Y. A., 2015. Establishing new model for predicting the global solar radiation on horizontal surface, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 15278-15283.
- Zhao, N., Zeng, X., Han, S., 2013. Solar radiation estimation using sunshine hour and air pollution index in China, *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 846-851.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp) de Botucatu pelo apoio financeiro concedido através das bolsas de estudos (Mestrado e Doutorado).

ESTIMATES OF GLOBAL SOLAR RADIATION BY DIFFERENT REGRESSION METHODS BASED ON SUNSHINE DURATION

Abstract. *The objective of this study was to assess different methods for estimating global solar radiation on a horizontal surface at a daily scale ($MJ/m^2/day$) in the city of Botucatu, São Paulo, Brazil. In addition to the traditional linear method of Angstrom-Prescott, polynomial functions of degree 2 to degree 4, as well as logarithmic and exponential approaches, were considered. Sunshine duration data used to develop empirical models were collected by software using digital image processing techniques. The period from January 1, 2015, to December 31, 2015, was chosen for developing the empirical models. The performance of the empirical models was evaluated through indicators such as MBE, $rMBE$, RMSE, $rRMSE$, and r . To rank the models based on performance, the Global Performance Index (GPI) was utilized. The use of GPI simplified the performance analysis of empirical models, allowing the integration of individual indicator results into a single value. The polynomial model of degree 3 demonstrated higher accuracy in estimating global solar radiation in the city of Botucatu.*

Keywords: *Solar Radiation Modeling. Regression Methods.*