

ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL DIÁRIA POR MEIO DE MODELOS DE REGRESSÃO NÃO LINEAR EM BOTUCATU/SP

ANGELICA CASTILHO PAES¹, SERGIO AUGUSTO RODRIGUES², JOÃO
FRANCISCO ESCOBEDO³

¹ Física, Mestre em Energia na Agricultura, UNESP – FCA/Botucatu-sp, (14) 99769-9687, angelica.castilho@unesp.br

² Estatístico, Prof. Dr. Departamento de Bioprocessos, UNESP-FCA/Botucatu-SP;

³ Físico, Prof. Dr. Departamento de Engenharia Rural, UNESP-FCA/Botucatu-SP;

Apresentado no XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2021
08 a 10 de novembro de 2021 – Congresso On-line

RESUMO: Neste trabalho foram testados modelos de regressão não linear para a estimativa da irradiação solar global (H_G) para Botucatu, São Paulo. Os modelos clássicos de Hargreaves e Samani (HS) e Bristow e Campbell (BC) foram testados, e quatro equações de regressão não linear múltipla (RM) foram desenvolvidas e testadas a partir de dados de temperatura (T), razão de insolação (RI) e umidade relativa (UR). Os modelos clássicos HS e BC apresentaram desempenhos similares - RMSEt = 21,870 % e RMSEa = 24,693 % para o modelo HS e RMSEt = 20,979 % e RMSEa = 24,139 % para o modelo BC - e apresentaram resultados inferiores às equações de RM, com os menores resultados para a RM2 de RMSEt = 11,292 % e RMSEa = 13,563 %.

PALAVRAS-CHAVE: Variáveis meteorológicas, modelo Hargreaves e Samani, regressão múltipla.

ESTIMATE OF DAILY GLOBAL SOLAR IRRADIATION BY NON LINEAR REGRESSION MODELS IN BOTUCATU/SP

ABSTRACT: The methods of nonlinear regression were tested in this project to estimate global solar irradiance in Botucatu, São Paulo. Models of Hargreaves and Samani (HS), and Bristow and Campbell (BC), which are considered classics methods, were tested and furthermore four multiple nonlinear regression equations (RM) were developed and tested from data as well as temperature, insolation ratio and relative humidity. The classical models HS and BC had similar performance – RMSE = 21,870 % and RMSEa = 24,693 % for HS model and RMSEt = 20,979 % and RMSEa = 24,139 % for the BC model - and, in contrast they have showed inferior results than the RM equations. Among the four equations developed, the RM2 has shown the best results, with RMSEt = 13,292 % and RMSEa = 13,563 %.

KEYWORDS: Meteorological variables, Hargreaves and Samani model, multiple regression.

INTRODUÇÃO: A irradiação solar é a principal fonte de energia da Terra, participa do balanço de energia, ciclo hidrológico, influencia variáveis meteorológicas (PIRI; KISI, 2014). Portanto os dados desta variável são úteis para diversos setores da pesquisa e produção, mas o custo dos equipamentos e dificuldades com a manutenção e a calibração faz com que H_G não seja medida continuamente (BESHARAT et al.; 2013).

Uma alternativa às medidas de H_G são as estimativas, que podem ser feitas através de modelos de regressão múltipla, como os modelos de Hargreaves e Samani (1982), Bristow e Campbell (1984), que utilizam dados de amplitude térmica para estimar H_G , além de outros modelos encontrados na literatura, desenvolvidos para as localidades estudadas, combinando as variáveis meteorológicas disponíveis no local de estudo (BILGILI; OZGOREN, 2011, SWARTMAN; OGUNLADE, 1967). Diante disto o presente trabalho tem como objetivo estimar H_G por meio dos modelos clássicos de Hargreaves e Samani (HS) e Bristow e Campbell (BC), desenvolver e testar uma equação de regressão não linear múltipla (RM) a partir dos dados disponíveis e comparar esta equação com os modelos clássicos.

MATERIAL E MÉTODOS: Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos em Botucatu – SP, no período de 1996 – 2011. O município está localizado no Estado de São Paulo, na latitude 22°53', a 786 m acima do nível do mar, com clima Cwa, temperado quente (mesotérmico) (ROSSI et al.; 2018). As variáveis medidas foram: irradiância solar global (I_G , $W\ m^{-2}$), medida por um piranômetro Eppley; temperatura máxima (T_M , °C) e mínima (T_m , °C), medidas por um termômetro de bulbo de mercúrio e álcool, respectivamente; horas de brilho solar (n , horas), medido por um heliógrafo; e umidade relativa do ar (UR, %), medida por um higrômetro. A aquisição de medidas de I_G foi realizada com o auxílio de um datalogger CR23X da Campbell Scientific. As medidas de I_G (W/m^2) foram realizadas a cada 5 segundos, com a média armazenada a cada 5 minutos, e a posterior integração para a obtenção de H_G diária (MJ/m^2), sendo que os valores inconsistentes foram retirados do banco de dados. O desenvolvimento das equações de regressão múltipla (RM) foi realizado baseado em modelos encontrados na literatura, como o de Hargreaves e Samani (1982), Bristow e Campbell (1984), Angström (1924) e Swartman e Ogunlade (1967). Para a estimativa dos coeficientes dos modelos todos os dados foram utilizados, excluindo os dados utilizados na validação, e para validação os dados foram reorganizados em duas bases anuais independentes chamadas de ano típico e ano atípico. Os indicadores estatísticos utilizados para avaliar a performance dos modelos foram o MBE (%), RMSE (%) e o índice de concordância de Willmott d .

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A equação (1) apresenta o modelo HS ajustado para Botucatu, com coeficiente estimado $a = 0,170$. Hargreaves (1985) sugere $a = 0,16$ para regiões distantes da costa, e $a = 0,19$ para locais próximos a costa ou a grandes corpos d'água. A figura 1(a) apresenta a correlação entre (H_G/H_0) e $\Delta T^{0,5}$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,495$.

$$\frac{H_G}{H_0} = 0,170 \cdot \sqrt{\Delta T} \quad (1)$$

As figuras 1(b) e 1(c) apresentam a correlação entre dados de H_G medidos e estimados a partir do modelo HS, para o ano típico (fig. 1(b)) e o atípico (fig. 1(c)), respectivamente.

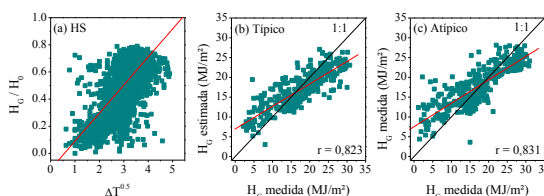


Figura 1 – (a) Correlação entre (H_G/H_0) e $\Delta T^{0,5}$; (b) Correlação entre H_G medida e H_G estimada, para o ano típico e (c) atípico.

A tabela (1) apresenta os indicadores estatísticos da validação dos modelos de estimativa testados neste trabalho, para as bases de validação do ano típico e atípico. Os valores de MBE apontam a tendência do modelo subestimar os valores de H_G para o ano típico e superestimar para o ano atípico. Os valores de RMSE e do índice d foram menores para o ano típico.

Tabela 1 – Indicativos estatísticos da validação dos modelos de estimativa testados.

Técnica	Base de validação	MBE (%)	RMSE (%)	d
HS	Típico	-3,087	21,870	0,870
	Atípico	3,169	24,693	0,880
BC	Típico	-6,974	20,979	0,905
	Atípico	0,984	24,139	0,901
RM1	Típico	-3,422	11,904	0,971
	Atípico	1,660	13,854	0,970
RM2	Típico	-3,850	11,292	0,974
	Atípico	1,978	13,563	0,971
RM3	Típico	-4,418	12,693	0,970

	Atípico	1,396	15,101	0.967
RM4	Típico	-4,787	12,919	0.969
	Atípico	1,693	15,836	0.964

A equação (2) apresenta o modelo BC ajustado para Botucatu, com os coeficientes estimados para Botucatu: $a = 0,637$, $b = 0,014$ e $c = 2,177$.

$$\frac{H_G}{H_0} = 0,637 \cdot \left(1 - e^{((-0,014) \cdot (\Delta T_z^{2,177}))}\right) \quad (2)$$

A figura 2 (a) apresenta a correlação entre (H_G/H_0) e ΔT , com valor de coeficiente de determinação de $R^2 = 0,537$. As figuras 2(b) e 2(c) apresentam a correlação entre dados de H_G medidos e estimados a partir do modelo BC para o ano típico (fig. 2(b)) e o atípico (fig. 2(c)).

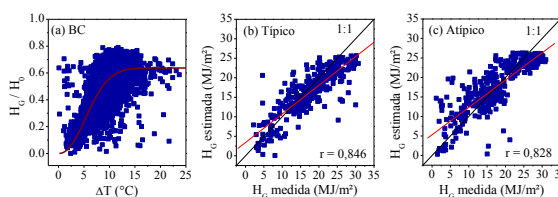


Figura 2 – (a) Correlação entre (H_G/H_0) e ΔT ; (b) Correlação entre H_G medida e H_G estimada, para o ano típico e (c) atípico.

Em relação aos valores de MBE, assim como HS, BC tem a tendência de subestimar os valores de H_G para o ano típico e superestimar para o ano atípico. O valor de RMSE é menor para o ano típico do que para o ano atípico, e ambos são menores do que os valores encontrados para o modelo HS. O índice d para o ano típico foi maior do que para o ano atípico, e os valores foram maiores em comparação com HS. Através do método de regressões múltiplas foram desenvolvidas quatro equações, utilizando dados de H_0 , ΔT , RI e UR para estimar H_G (equações 3, 4, 5 e 6):

$$H_G = a \cdot H_0 \cdot (\Delta T^b + c \cdot H_0 \cdot RI + f \cdot UR) \quad (3)$$

$$H_G = a \cdot H_0 (\Delta T^b + c \cdot H_0 \cdot RI^f \cdot UR^g) \quad (4)$$

$$H_G = a \cdot H_0 \cdot (1 - e^{((-b) \cdot \Delta T^c)}) + f \cdot H_0 \cdot RI + g \cdot UR \quad (5)$$

$$H_G = a \cdot H_0 \cdot (1 - e^{((-b) \cdot \Delta T^c)}) + f \cdot H_0 \cdot RI^g \cdot UR^h \quad (6)$$

A tabela (2) apresenta os valores dos coeficientes estimados para as quatro equações desenvolvidas, a partir dos dados medidos em Botucatu.

Tabela 2 – Valores dos coeficientes dos modelos de RM estimados para Botucatu.

Modelo	Equação	a	b	c	f	g	h
RM1	Eq. (3)	0,168	0,274	0,398	-0,009		
RM2	Eq. (4)	0,124	0,325	0,308	0,767	0,075	
RM3	Eq. (5)	0,395	0,191	1,143	0,026	-0,001	
RM4	Eq. (6)	0,387	0,079	1,572	0,023	1,454	0,027

A figura (3) apresenta a correlação entre H_G medida e estimada a partir dos modelos de RM, para o ano típico (fig. 3 (a), (b) (c) e (d)) e atípico (fig. 3 (e), (f), (g) e (h)).

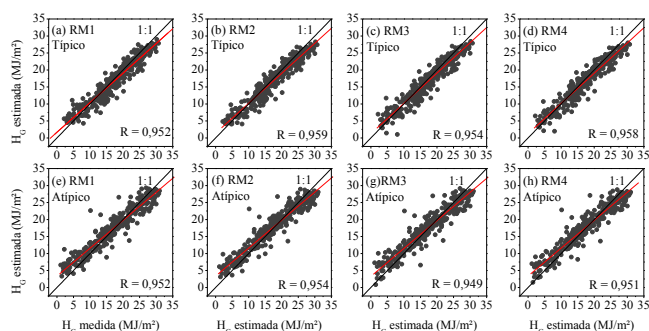


Figura 3 – Correlação entre H_G medida e H_G estimada através dos modelos de RM, para o ano típico (fig. 3 (a), (b) (c) e (d)) e atípico (fig. 3 (e), (f), (g) e (h)).

Os modelos de RM tendem a subestimar os valores para o ano típico e superestimar para o ano atípico, com o modelo RM1 apresentando o menor valor, em módulo, para o ano típico, e o modelo RM3 o menor valor para o ano atípico. Em relação aos valores de RMSE houve uma redução de cerca de 10 % nos valores, em comparação com os modelos HS e BC, sendo que o modelo RM2 apresentou os menores valores para os dois anos. Os valores do índice d dos modelos RM foram maiores do que dos modelos HS e BC, sendo que o modelo RM2 apresentou os maiores valores.

CONCLUSÕES: Os modelos estatísticos HS e BC apresentaram resultados similares, podendo optar-se pelo modelo mais simples de se ajustar, no caso o HS, que possui apenas um coeficiente para estimar. Os modelos de RM apresentaram resultados superiores aos modelos HS e BC, sendo que o modelo RM2 apresentou resultados superiores aos demais modelos de regressão múltipla.

REFERÊNCIAS:

- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121-125, 1924.
- BESHARAT, F.; DEGHAN, A. A.; FAGHIH, A. Empirical models for estimation global solar radiation: A review and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 798-821, 2013.
- BILGILI, M.; OZFOREN, M. Daily total global solar radiation modeling from several meteorological data. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 2011. DOI 10.1007/s00703-011-0137-9.
- BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 31, n. 2, p. 159 – 166, maio, 1984.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating Potential Evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 108, n. 3, p. 225 – 230, 1982.
- PIRI, J.; KISI, O. Modelling solar radiation reached to the Earth using ANFIS, NN-ARX, and empirical models (Case studies: Zahedan and Bojnurd stations). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 123, p. 39 – 47, dezembro, 2014.
- ROSSI, T. J. et al. Global diffuse and direct solar radiation of infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p.448-459, 2018.
- SWARTMAN, R. K.; OGUNLADE, O. Solar Radiation Estimates from Common Parameters. **Solar Energy**, v. 11, n. 3 – 4, p. 170 – 172, 1967.