

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL DIÁRIA POR MEIO DE MODELOS ESTATÍSTICOS, REGRESSÕES MÚLTIPLAS E APRENDIZADO DE MÁQUINAS EM BOTUCATU/SP

ANGELICA CASTILHO PAES¹, EDSON LUIZ BASSETO², JOÃO FRANCISCO
ESCOBEDO³

¹ Física, Mestranda do programa de Energia na Agricultura, UNESP – FCA/Botucatu-sp, (14) 99769-9687, gecacp@hotmail.com

² Eng. Eletricista, Prof. Departamento de Engenharia Elétrica, UTFPR/Cornélio Procopio-PR.

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

Apresentado no XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019
17 a 19 de setembro de 2019 - Campinas - SP, Brasil

RESUMO: Neste trabalho foram testados métodos de estimativa da radiação solar global (H_G) para Botucatu, São Paulo. Foram testados os modelos estatísticos de Hargreaves e Samani (H - S) e Bristow e Campbell (B - C), Regressão Múltipla Não Linear (RMNL) e as Técnicas de Aprendizado de Máquinas (TAM) do tipo Rede Neural Artificial (RNA) e Máquina de Vetor de Suporte (MVS). Os modelos estatísticos (H - S) e (B - C) apresentaram desempenho similares e a equação de (RMNL) apresentou melhores resultados do que os modelos estatísticos. Já as (TAM) apresentaram resultados superiores aos modelos estatísticos e à regressão com destaque para SVM que apresentou os melhores resultados entre os modelos.

PALAVRAS-CHAVE: Variáveis meteorológicas, modelo Hargreaves e Samani; inteligência artificial.

ESTIMATE OF DAILY GLOBAL SOLAR RADIATION BY STATISTICAL MODELS, MULTIPLE REGRESSIONS AND LEARNING MACHINE IN BOTUCATU/SP

ABSTRACT: In this work were tested methods to estimate solar global radiation (H_G) for Botucatu, São Paulo. Were tested the statistical models of Hargreaves-Samani (H-S) and Bristow-Campbell (B-C), non linear multiple regression and learning machines techniques: Artificial Neural Network and Support Vector Machine. Regarding statistical models, H-S and B-C exhibited similar performance and the multiple regression equation exhibited better results than the statistical models. Learning machine techniques exhibited better results than de statistical models and regression, especially the SVM that exhibited the best results between the models.

KEYWORDS: Meteorological variables, Hargreaves and Samani model; artificial intelligence.

INTRODUÇÃO: A radiação solar é a principal fonte de energia da Terra, responsável por processos físicos e bioquímicos que ocorrem no planeta (CHEN et al; 2004). Dados de radiação são de extrema importância para diversos setores da pesquisa e produção, porém o alto custo dos equipamentos de medida e problemas com a manutenção e calibração destes aparelhos faz com que este seja um parâmetro ausente em algumas áreas (AJAYI et al.; 2014).

Uma opção para medida da radiação são as estimativas que podem ser feitas por meio de modelos estatísticos (HARGREAVES; SAMANI; 1982; BRISTOW; CAMPBELL; 1984), regressões múltiplas e aprendizado de máquinas, entre outros métodos (MEHDIZADEH; BEHMANESH; KHALILI, 2016).

Diante disto o presente trabalho tem como objetivo estimar H_G por meio de regressões múltiplas não lineares e técnicas de aprendizado de máquinas do tipo RNA e SVM, e comparar com os resultados das estimativas feitas a partir dos modelos estatísticos de Hargreaves e Samani (H – S) e Bristow e Campbell (B – C).

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 $22^{\circ}53'$ e longitude $48^{\circ}26'$. A altitude varia entre 650 m e 950 m em relação ao nível do mar. O clima é classificado como Cwa, pelo método de Köppen, sendo um clima temperado quente (mesotérmico) (TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F; 2012).

As variáveis medidas foram: irradiância solar global (I , $W\ m^{-2}$), medida por um piranômetro Eppley; temperatura máxima (T_M , $^{\circ}C$) e mínima (T_m , $^{\circ}C$), 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 H_G foi realizada com o auxílio de um datalogger CR23X da Campbell Scientific. As medidas são realizadas a cada 5 segundos, armazenando as médias a cada cinco minutos. As medidas de irradiância (W/m^2) foram integradas para a obtenção do valor da irradiação solar global diária (MJ/m^2). Os dados obtidos passaram por análise, e os valores inconsistentes foram retirados do banco de dados. Para os modelos, foram utilizados todos os dados e para validação os dados foram reorganizado em duas bases anuais independentes chamadas de Ano Típico e Ano Atípico. Para as técnicas RNA e SVM foram testados quatro cenários diferentes para os parâmetros de entrada: 1ª combinação (H_0 , H_G e ΔT), 2ª combinação (H_0 , H_G , ΔT , e RI), 3ª combinação (H_0 , H_G , ΔT e UR) e 4ª combinação (H_0 , H_G , ΔT , RI e UR).

Os indicativos estatísticos utilizados para avaliar a performance dos modelos foram o MBE (%), RMSE(%) e o índice de concordância de Wilmott d .

Rede Neural Artificial

Rede neural artificial é uma técnica inspirada no funcionamento do cérebro, com núcleos de processamento de dados (neurônios) conectados por sinapses que possuem pesos, ou seja, valores que definem a intensidade do sinal transmitido para o neurônio de saída (LANDERAS et al.; 2012). A rede neural utilizado neste trabalho é a Multilayer Perceptron, com o algoritmo Backpropagation, com função de ativação sigmoideal nas camadas ocultas e a função linear na camada de saída.

Máquina de vetor de suporte

A máquina de vetor de suporte é uma técnica baseada na teoria do aprendizado estatístico, desenvolvida por Vapnik, que pode ser utilizada para realizar classificações, regressões e previsões. Esta técnica apresenta resultados superiores a outras técnicas, como a RNA, por exemplo, por otimizar os resultados através da diminuição do risco estrutural, enquanto que a RNA trabalha com a minimização do risco empírico (MOHAMMADI et al.; 2015). Para gerar os modelos de SVM foi utilizado o algoritmo SMOreg improved, com a função RBF de Kernel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A figura 1 (a) apresenta o gráfico para a calibração do modelo H-S, com a correlação entre KT (H_G/H_0) e $\Delta T^{0.5}$. O coeficiente de calibração ajustado

foi $a = 0,170$ e o coeficiente de determinação foi de $R^2 = 0,495$. As figuras 1(b) e 1(c) apresenta a correlação entre dados de H_G medida e estimada a partir do modelo H-S, para o ano típico e o atípico, respectivamente.

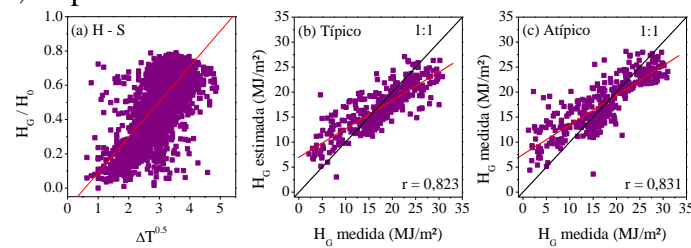


Figura 1 – (a) Correlação de KT (H_G/H_0) e $\Delta T^{0,5}$. Gráfico para a calibração do modelo H-S; (b) Correlação entre H_G medida e H_G estimada, para o ano típico e (c) atípico.

A tabela (1) apresenta os indicativos estatísticos da validação dos métodos de estimativas utilizados neste trabalho, para as duas bases de validação (ano típico e atípico). Para compor a tabela foram escolhidos os melhores resultados apresentados pelas técnicas RNA e SVM.

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

Técnica	Base de validação	MBE (%)	RMSE (%)	d
H-S	Típico	-3,087	21,870	0,870
	Atípico	3,169	24,693	0,880
B-C	Típico	-6,974	20,979	0,905
	Atípico	0,984	24,139	0,901
RM	Típico	-3,850	11,292	0,974
	Atípico	1,978	13,563	0,971
RNA	Típico	-3,569	10,331	0,979
	Atípico	3,113	13,765	0,971
MVS	Típico	-2,852	9,999	0,981
	Atípico	0,023	13,151	0,973

A figura 2 (a) apresenta a correlação entre KT e ΔT . Os valores dos coeficientes de calibração são $a = 0,637$, $b = 0,014$ e $c = 2,177$, e o valor do coeficiente de determinação é $R^2 = 0,537$. As figuras 2(b) e 2(c) apresenta a correlação entre dados de H_G medida e estimada a partir do modelo B-C, para o ano típico e o atípico, respectivamente.

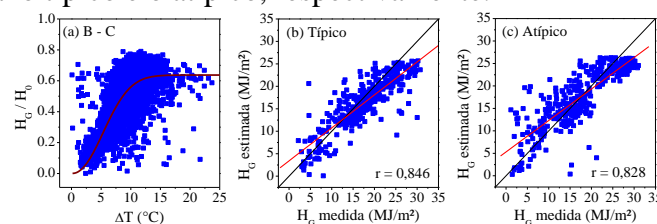


Figura 2 – (a) Correlação entre KT e ΔT . Gráfico para a calibração do modelo B-C; (b) Correlação entre H_G medida e H_G estimada, para o ano típico e (c) atípico.

Através dos métodos de regressões múltiplas foi desenvolvida a equação (1), que estima H_G a partir de dados de H_0 , ΔT , RI e UR.

$$H_G = 0,124 \cdot H_0 \cdot (\Delta T^{0,325}) + 0,308 \cdot H_0 \cdot (RI^{0,767}) \cdot (UR^{0,075}) \quad (1)$$

A figura (3) apresenta a correlação entre H_G medida e estimada a partir da equação (1), para o ano típico (fig. 3 (a)) e atípico (fig. 3 (b)).

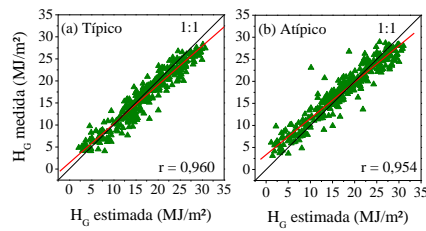


Figura 3 – Correlação entre H_G medida e H_G estimada, para o ano típico (fig. 4 (a)) e atípico (fig. 4 (b)) para a eq. (1).

A figura (4) apresenta a correlação entre os valores de H_G medidos e estimados a partir das técnicas de aprendizado de máquinas para o ano típico (figs. 4(a), 4(b), 4 (c) e 4(d)) e ano atípico (figs. 4(e), 4(f), 4(g) e 4(h)).

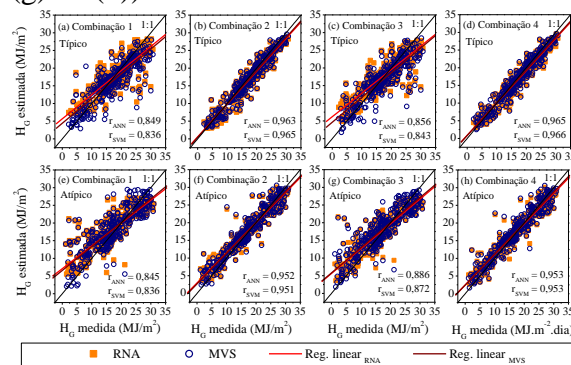


Figura 4 – Correlação entre H_G medida e H_G estimada, para o ano típico (fig. 6 (a), (b), (c) e (d)) atípico (fig. 6 (e), (f), (g) e (h)) para as técnicas de aprendizado de máquinas.

CONCLUSÕES:

- Os modelos estatísticos HS e BC apresentaram resultados similares, podendo optar-se pelo modelo mais simples, no caso HS;
- A equação de regressão múltipla e a técnica ANN apresentaram resultados similares, sendo possível optar pela regressão neste caso;
- A SVM apresentou resultados superiores aos resultados da regressão múltipla e da ANN, sendo a melhor opção para a estimativa de H_G .

REFERÊNCIAS:

- 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.
- CHEN, R.; ERSI, K.; YANG, J.; SHIHUA, L.; ZHAO, W. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1759 – 1769, 2004.
- MEHDIZADEH, S.; BEHMANESH, J.; KHALILI, K. Comparison of artificial intelligence methods and empirical equations to estimate daily solar radiation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 146, p. 215 – 227, junho, 2016.
- MOHAMMADI, K.; SHAMSHIRBAND, S.; DANESH, A., S.; ZAMANI, M.; SUDHEER, C. Horizontal global solar radiation estimation using hybrid SVM – firefly and SVM – wavelet algorithms: a case study. **Journal of the International Society the Prevention and Mitigation of Natural Hazards**, 2015.
- TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F. Análise da frequência anula das condições de céu em Botucatu, São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 985 – 992, 2012.
- LANDERAS, G.; LÓPEZ, J. J.; KISL, O.; SHIRI, J. Comparison of Gene Expression Programming with neuro-fuzzy and neural network computing techniques in estimating daily incoming solar radiation in the Basque Country (Northern Spain). **Energy Conversion and Management**, n. 62, p. 1 – 13, 2012.
- AJAYI, O. O.; OHIJEAGBON, O. D.; NWADIALO, C. E.; OLASOPE, O. New model to estimate daily global solar radiation over Nigeria. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, n. 5, p. 28-36, 2014.