

## ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PELOS MODELOS DE HARGREAVES-SAMANI E APRENDIZADO DE MÁQUINA SVM E ANN EM BOTUCATU/SP/BRASIL

ANGÉLICA CASTILHO PAES<sup>1</sup>, JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO<sup>2</sup>,  
MAURICIO BRUNO PRADO DA SILVA<sup>3</sup>, CÍCERO. M. DOS SANTOS<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Física, UNESP/Bauru-SP gecacp@hotmail.com;

<sup>2</sup>Físico, Prof. Dr. Departamento de Engenharia Rural, UNESP-FCA/Botucatu-SP;

<sup>3</sup>Engenheiro Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP-FCA/Botucatu-SP;

<sup>4</sup>Físico, Doutor em Irrigação e Drenagem, UNESP-FCA/Botucatu-SP.

Apresentado no

XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017

30 de julho a 03 de agosto de 2017 – Maceió/AL, Brasil.

**RESUMO:** Neste trabalho é apresentado o estudo comparativo entre dois métodos de estimativas da radiação solar global: modelo estatístico de Hargreaves-Samani (H-S), e o modelo de aprendizado de máquinas Artificial Neural Network (ANN) e Support Vector Machine (SVM). A técnica SVM apresentou melhor desempenho que a rede ANN e o modelo estatístico, enquanto que a técnica ANN apresentou melhor desempenho que o modelo estatístico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Radiação solar, modelo Hargreaves-Samani, modelagem estatística; inteligência artificial, variáveis meteorológicas.

## ESTIMATION OF GLOBAL SOLAR IRRADIATION BY THE HARGREAVES-SAMANI MODELS AND MACHINE LEARNING OF SVM AND ANN IN BOTUCATU / SP / BRAZIL

**ABSTRACT:** In this work is presented the comparative study between two estimation methods of the global solar radiation: the statistical model of Hargreaves-Samani (H-S), and the machine learning model Artificial Neural Network (ANN) and Support Vector Machine (SVM). The SVM technique presented better performance than the ANN network and the statistical model, while the ANN network presented better performance than the statistical model.

**KEYWORDS:** Solar Radiation, Hargreaves-Samani model, statistical modeling, artificial intelligence, meteorological variables.

**INTRODUÇÃO:** A radiação solar é um importante parâmetro para várias atividades do setor produtivo e de pesquisa, principalmente em processos de conversão de energia térmica, fotovoltaico e biomassa. Porém medidas de radiação solar ainda são realizadas em limitado número de estações meteorológicas. Uma opção para locais onde não são efetuadas medidas é o uso de equações empíricas, obtidas estatisticamente, especialmente desenvolvidas para se estimar a radiação a partir de outros parâmetros meteorológicos medidos com maior frequência nos postos meteorológicos. Uma destas

equações é a que foi desenvolvida por Hargreaves e Samani (1982), que estima a radiação solar global a partir de medidas da temperatura máxima e mínima e dos valores de radiação solar extraterrestre. Para que as medidas tenham maior precisão, tem se estudado o uso de técnicas de aprendizado de máquinas para realizar as estimativas. Este trabalho tem como objetivo estimar a radiação solar global através do modelo empírico de Hargreaves-Samani (H-S), através de Redes Neurais Artificiais (RNA) e Suporte Vetor Machine (SVM), e comparar o desempenho das três técnicas.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os dados utilizados neste trabalho foram: irradiância solar global, temperatura (máxima e mínima) e umidade relativa, coletados em Botucatu, no período de 1996-2011. As medidas de irradiância solar global ( $I$ ,  $W m^{-2}$ ) foram realizadas por um piranômetro Eppley, a temperatura máxima e mínima do ar ( $T$ ,  $^{\circ}C$ ) foi medida por termômetro de bulbo de mercúrio e álcool, respectivamente; e a umidade relativa do ar (UR, %) medida através de um higrômetro. Foram testadas três combinações diferentes para os parâmetros de entrada da ANN e da SVM. A tabela 1 apresenta a relação dos parâmetros de entrada utilizados para cada combinação, sendo três para cada técnica utilizada.

Combinações	Parâmetros de entrada
ANN1	$H_0$ , $(\Delta T)^{0.5}$ e $H_G$
SVM1	$H_0$ , $(\Delta T)^{0.5}$ e $H_G$
ANN2	$H_0$ , $(\Delta T)^{0.5}$ , RI e $H_G$
SVM2	$H_0$ , $(\Delta T)^{0.5}$ , RI e $H_G$
ANN3	$H_0$ , $(\Delta T)^{0.5}$ , RI, UR e $H_G$
SVM3	$H_0$ , $(\Delta T)^{0.5}$ , RI, UR e $H_G$

Tabela 1 – Parâmetros de entrada da RNA e da SVM para cada combinação, sendo  $H_0$  – radiação solar extraterrestre;  $T_{max}$  – Temperatura máxima;  $T_{min}$  – temperatura mínima,  $H_G$  – Radiação solar global; RI – razão de insolação; UR – umidade relativa do ar.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A figura 1 apresenta o gráfico de dispersão entre a transmissividade da radiação solar global e a amplitude térmica, e a linha em vermelho é a curva de regressão. O valor obtido para o coeficiente de determinação foi de  $R^2=0,505$ , e o valor do coeficiente de calibração foi de  $a=0,170$ .

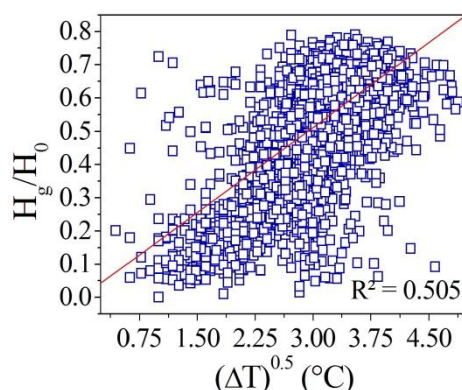


Figura 1 - Gráfico de dispersão entre os valores da transmissividade atmosférica da radiação solar global e a amplitude térmica para o período de 1996 à 2011. A linha vermelha apresenta a curva de regressão para o período.

A equação de regressão encontrada para o modelo estatístico de H-S foi:

$$\frac{H_G}{H_0} = 0,170 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \quad (1)$$

Para localidades de Alagoas, foram encontrados os seguintes resultados: para Água Branca  $a=0,187$  e  $R^2=0,741$ , para Santana do Ipanema  $a=0,168$  e  $R^2=0,790$ , para Arapiraca  $a=0,185$  e  $R^2=0,704$ ; para Cruz das Almas (Bahia), o coeficiente  $a=0,16$  foi predeterminado, com valor de coeficiente de determinação  $R^2=0,688$ ; em Telêmaco Borba (Paraná) foi encontrado  $a=0,12$  e  $R^2=0,740$ ; e em Minas Gerais, a média encontrada para as localidades estudadas foi:  $a=0,161$  e  $R^2=0,643$ . O valor do coeficiente de calibração encontrado para Botucatu está dentro do intervalo encontrado nos trabalhos citados, sendo que o coeficiente de determinação apresentou valor abaixo do obtido para as localidades citadas acima.

A figura 2 apresenta a dispersão entre os valores medidos e estimados da radiação solar global para os anos típico (a) e atípico (b). Os coeficientes de correlação encontrados foram  $r^t = 0,823$  para o ano típico e  $r^a = 0,831$  para o ano atípico, sendo o coeficiente de determinação  $(r^2)^t = 0,677$  e  $(r^2)^a = 0,690$ , para os anos típico e atípico, respectivamente. Os indicativos estatísticos foram:  $MBE^t = -3,1\%$ ,  $RMSE^t = 21,9\%$  e  $d$  de Wilmott  $d^t = 0,87$  para o ano típico, e  $MBE^a = 3,2\%$ ,  $RMSE^a = 24,7\%$  e  $d$  de Wilmott  $d^a = 0,88$  para o ano atípico. Com base no resultado de MBE é possível observar que para o ano típico a equação subestima dos valores de HG, e para os anos atípicos a equação superestima os valores.

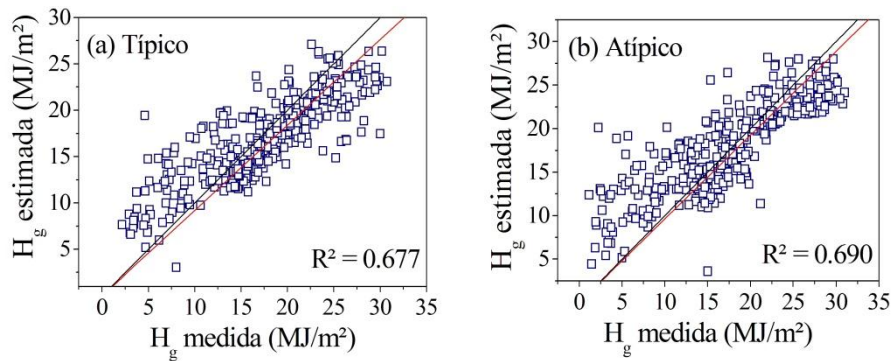


Figura 2 – Comparação entre os valores medidos e estimados para a radiação solar global através do modelo estatístico de Hargreaves e Samani para o ano típico (a) e o atípico (b). A linha vermelha apresenta a regressão linear para os dois casos.

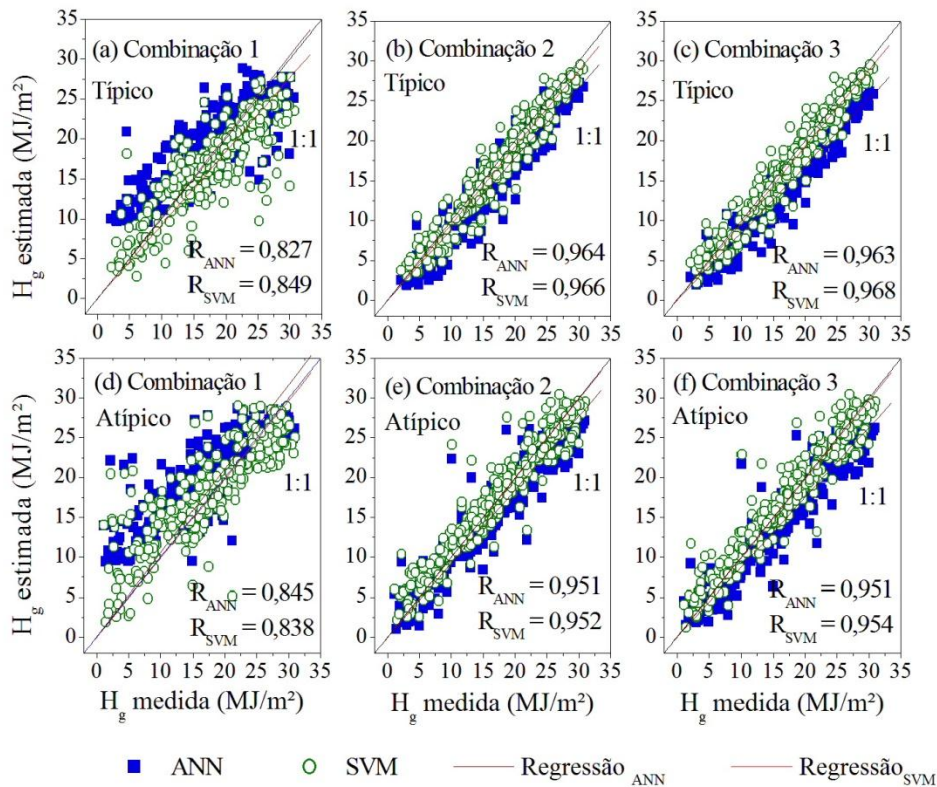


Figura 3 – Gráfico de dispersão entre os valores medidos e estimados para a radiação solar global por meio de aprendizado de máquinas, para as três combinações de parâmetro de entrada, para os anos típico (a, b e c), e atípico (d, e e f).

A figura 3 apresenta a comparação entre os valores medidos e os valores estimados da radiação solar global a partir das técnicas ANN e SVM para as três combinações de parâmetros, e a combinação 3 foi validada para os anos típico e atípico. Os valores do coeficiente de correlação encontrados foram:  $r_{ANN3}^t = 0,963$ ,  $r_{ANN3}^a = 0,951$ ,  $r_{SVM3}^t = 0,968$  e  $r_{SVM3}^a = 0,954$ . Os índices estatísticos encontrados foram: ( $r_{SVM3}^t = 0,97$ ,  $r_{SVM3}^a = 0,95$ ) e ( $r_{ANN3}^t = 0,96$ ,  $r_{ANN3}^a = 0,95$ ); ( $MBE_{SVM3}^t = -3,3\%$  e  $MBE_{SVM3}^a = 1,0\%$ ) e ( $MBE_{ANN3}^t = -16,2\%$  e  $MBE_{ANN3}^a = -11,6\%$ ); ( $RMSE_{SVM3}^t = 9,9\%$  e  $RMSE_{SVM3}^a = 12,9\%$ ) e ( $RMSE_{ANN3}^t = 19,2\%$  e  $RMSE_{ANN3}^a = 17,9\%$ ) e (d) de Willmott ( $d_{SVM3}^t = 0,98$  e  $d_{SVM3}^a = 0,97$ ) e ( $d_{ANN3}^t = 0,93$  e  $d_{ANN3}^a = 0,95$ ). A técnica SVM apresentou melhores resultados em comparação à ANN e ao modelo estatístico H-S, e a técnica ANN apresentou melhores resultados do que o modelo estatístico H-S.

Os valores de RMSE para as duas técnicas de aprendizagem de máquinas, para o ano típico e atípico, apresentaram resultados entre 10 e 20%, uma redução de 5 a 10 % do RMSE para o modelo estatístico. Com relação aos valores de MBE a técnica ANN subestima os resultados nas duas situações (ano típico e atípico). A técnica SVM subestima os resultados para o ano típico e superestima para o ano atípico, porém com menor desvio do que a ANN e o modelo estatístico.

**CONCLUSÕES:** As técnicas de aprendizado de máquinas apresentaram melhores desempenhos do que o modelo estatístico, sendo que o melhor resultado foi da SVM na terceira combinação, que apresentou coeficiente de correlação  $r_{SVM3}^t = 0,968$  e  $r_{SVM3}^a = 0,954$ , sendo os índices da ANN  $r_{ANN3}^t = 0,963$ ,  $r_{ANN3}^a = 0,951$ , e os índices do modelo estatístico  $r^t = 0,823$  e  $r^a = 0,831$ .

## REFERÊNCIAS

- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; FILHO, M. A. C.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.74-80, 2010
- HARGREAVES, G. H; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 108, p. 225-230, 1982.
- JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. Parametrização das equações de Hargreaves & Samani e Angström-Prescott para estimativa da radiação solar na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. *Ciência Rural*, v.43, n.3, p.383-389, 2013
- LIMA, F. J. L.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; LORENZ, E.; HEINEMANN, D. Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy*, v. 87, p. 807-818, 2016.
- SANTOS, C. M.; SOUZA, J. L.; JUNIOR, R. A. F.; TIBA, C.; MELO, R. O.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; LEMES, A. M. On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. *Energy*, v.71, p. 388-398, 2014
- SILVA, C. R.; SILVA, V. J.; JÚNIOR, J. A.; CARVALHO, H. P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p. 281-288, 2012.
- SILVA, M. B. P. Estimativa da irradiação solar global pelo método Angstrom-Prescott e técnicas de aprendizado de máquinas. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2016.