



XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia

23 a 28 de agosto de 2015

Lavras – MG – Brasil

Agrometeorologia no século 21:

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros



Comparação entre o modelo de Bristow-Campbell e Redes Neurais Artificiais na estimativa da irradiação global em Botucatu, São Paulo

Maurício Bruno Prado da Silva¹; Eduardo Nardini Gomes²; Érico Tadao Teramoto³; Daniel Gonçalves Gomes Júnior⁴; Alexandre Dal Pai⁵

¹Agrônomo, mestrando em Irrigação e Drenagem, FCA-UNESP, Fone: (14) – 3880-7585, mauricio.prado19@hotmail.com

²Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, Professor assistente, Unidade Diferenciada de Registro – UNESP

³Eng. Agrícola, Doutor em Energia na Agricultura, Professor substituto, Unidade Diferenciada de Registro – UNESP

⁴Agrônomo, mestrando em Irrigação e Drenagem, FCA-UNESP

⁵Físico, Doutor em Energia na Agricultura, Professor assistente, FCA-UNESP

RESUMO: Informações de irradiação solar global (H_G) são de grande importância para analisar a viabilidade de diversos projetos ligados às atividades socioeconômicas. Em virtude dos altos custos de aquisição, manutenção e calibração dos sensores que monitoram esta componente, medidas de H_G são escassas em muitas locais. Diversos métodos foram propostos e analisados no intuito de estimar valores confiáveis de H_G . Neste trabalho o modelo de Bristow-Campbell (B-C) é avaliado e comparado com modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs) multilayer perceptron (MLP) na estimativa de H_G . O modelo empírico de B-C possui a amplitude térmica como variável de entrada. Similarmente, a amplitude térmica é considerada nos modelos da RNAs. Os dados de H_G e temperatura do ar foram obtidos da estação meteorológica localizada na Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no município de Botucatu (22,85°S; 48,43°W e alt. de 786 m). A série climática dos dados é do período de 1996-2011. Foram considerados anos típicos e atípicos meteorológicos, obtidos a partir da série climática, para validação dos modelos. Os índices estatísticos de comparação de modelos foram: Mean Bias Error (MBE), relative Mean Bias Error (rMBE, %), Root Mean Square Error (RMSE), rRMSE (relative Root Mean Square Error, %) e o índice concordância de Willmott (d). As estimativas de H_G com os modelos concordam com as medidas e seguem tendência semelhante, com coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,692 a 0,736 para RNA ano atípico e B-C ano típico respectivamente. Contudo, entre os modelos desenvolvidos neste trabalho verificou-se que B-C ano típico obteve melhor desempenho (MBE = $-1,210 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, RMSE = $3,532 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $d = 0,912$) e que a RNA ano atípico desempenho inferior (MBE = $2,462 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, RMSE = $4,796 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $d = 0,856$). A validação dos modelos com base no, ano típico e atípico meteorológico, mostrou ser eficiente e interessante para diferentes comparações de metodologias. Com base no rRMSE, verifica-se que as duas técnicas dão resultados aceitáveis ($20\% \leq \text{rRMSE} < 30\%$), com destaque para os modelo empírico.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, RNA's, Temperatura do ar.

COMPARISON BETWEEN BRISTOW-CAMPBELL MODEL AND NEURAL ARTIFICIAL NETWORKS IN THE ESTIMATION OF GLOBAL IRRADIATION IN BOTUCATU, SÃO PAULO

ABSTRACT: The knowledge on climatic variation of global radiation (H_G) has great importance in analysis of the feasibility of various projects related to socioeconomic activities. Due to the high acquisition costs, maintenance and calibration of sensors that monitor this meteorological variable, measured data of H_G are scarce in many places. Several methods have been proposed and analyzed in order to estimate reliable values of H_G . In this paper the Bristow-Campbell model (B-C) is evaluated and compared with models of Artificial Neural Networks (ANN) multilayer perceptron (MLP) in the

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

estimation of H_G . The empirical B-C model has the temperature range as the input variable. Similarly, the temperature range is considered in RNAs models. Data of H_G and air temperature were obtained from the weather station located at the College of Agricultural Sciences (FCA) of the Universidade Estadual Paulista (UNESP) in Botucatu (22.85°S; 48.43°W and alt 786 m). The climatical serie was measured in the periodo of 1996-2011. Were used typical and atypical weather years, obtained from the climatic series, for validate the models. The statistical indexes used in the comparison of models were: Mean Bias Error Mean Bias Error (MBE), relative Mean Bias Error (rMBE, %), Root Mean Square Error (RMSE), relative Root Mean Square Error (rRMSE, %) and Willmott's Index of Agreement (d). The H_G estimates with the models agree with the measures and follow similar trend, with coefficients of determination (R^2) ranging from 0,692 to 0,736 for RNA atypical year and BC typical year respectively. However, among the models developed in this work it was found that BC performed better typical year (MBE = -1,210 MJ m⁻² day⁻¹, RMSE = 3,532 MJ m⁻² day⁻¹ and $d = 0,912$) and RNA year atypical underperformed (MBE = 2,462 MJ m⁻² day⁻¹, RMSE = 4,796 MJ m⁻² day⁻¹ and $d = 0,856$). Validation of the models based on typical and atypical weather year proved to be efficient and interesting comparisons for different methodologies. Based on rRMSE, it turns out that the two techniques give acceptable results (20% ≤ rRMSE <30%), highlighting the empirical model.

KEYWORDS: Modeling, ANNs, Air temperature.

INTRODUÇÃO

A irradiação solar global incidente na superfície terrestre (H_G) é a principal fonte de energia de importantes processos físico-químico e biológicos como aquecimento do ar, do solo, evapotranspiração, fotossíntese, entre outros (Bristow e Campbell, 1984; Borges et al., 2009; Silva et al., 2011). Além de principal variável meteorológica em pesquisas sobre evapotranspiração (na área de interesse de irrigação e drenagem); secagem e armazenamento de grãos e forragens; conforto térmico animal; modelagem computacional de desenvolvimento de culturas agrícolas; simulação hidrológica; entre outras (Chen et al., 2004; Chen et al., 2015; Podestá, et al., 2004; Rahimikhoob, 2010; Santos, 2014). Por isso que entender o comportamento de H_G em escala periódica no ambiente e dispor desta variável meteorológica é de grande importância para analisar a viabilidade de diversos projetos ligados às atividades humanas. Contudo, medidas de H_G são escassas em muitas localidades do mundo em virtude das dificuldades em adquirir sensores de monitoramento em decorrência de seus altos custos e problemas relacionados à manutenção e calibração (Hunt et al., 1998; Rahimikhoob et al., 2010). Com isso, diversos pesquisadores vêm ao longo do tempo divulgando estudos com modelos de estimativa H_G para suas respectivas localidades através de facilmente podem ser obtidas de postos meteorológicos como o brilho solar e a temperatura do ar (Angstrom, 1924; Hargreaves e Samani, 1982; Bristow e Campbell, 1984). Atualmente outra via interessante para obtenção de estimativas mais precisas de H_G vem sendo através das técnicas de aprendizagem de máquinas (AMs) e diversos estudos vem indicando resultados satisfatórios (Bosch, et al., 2008; Behrang et al., 2010; Rahimikhoob, 2010; Wan, et al., 2008; Waewsak et al., 2014; Chen et al., 2015). O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o modelo empírico de Bristow-Campbell com o desenvolvido pela RNA na estimativa da irradiação solar global (H_G) através da temperatura do ar em Botucatu, SP.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização da área de estudos

A área de estudo (estação de radiometria solar) está localizada na unidade acadêmica da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no município de Botucatu (22,85°S; 48,43°W e altitude de 786 m), situado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo. O clima é temperado quente (mesotérmico) com verão quente e úmido (dezembro-fevereiro) e inverno frio e seco (junho-agosto) (Teramoto e Escobedo, 2012). As principais variáveis meteorológicas utilizadas neste trabalho foram irradiação solar global (H_G) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e as temperaturas máxima ($T_{\text{máx}}$) e mínima ($T_{\text{mín}}$) do ar ($^{\circ}\text{C}$). As quais foram monitoradas por um piranômetro Eppley PSP e por um termômetro de bulbo de mercúrio Incoterm (com escala de medição variando de -15 a 60 $^{\circ}\text{C}$ e imprecisão de $0,2^{\circ}\text{C}$) instalados em abrigo termométricos convencionais (venezianas) instalados a altura de $1,5$ m, respectivamente. A aquisição de dados de H_G foi realizada através de um datalogger CR23X da Campbell Scientific operando na frequência de 1 Hz e armazenamento (médio) que armazena a cada 5 minutos em média. O conjunto de dados das temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) e mínimas ($T_{\text{mín}}$) foi adquirido mediante a coleta feita por observadores meteorológicos da própria UNESP. A série de dados totais de H_G , $T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$ correspondem a um período de 16 anos (1996-2011) de medidas em escala diária foram divididas em anos típico e atípico para efeito de análises estatísticas mais detalhadas (que considera o intervalo de variação do desvio padrão da média, com o valor da irradiação média de cada ano) neste trabalho. Mais detalhes dessa metodologia em Escobedo et al. (2013).

As estimativas de H_G foram obtidas através do modelo exponencial desenvolvido por Bristow e Campbell (1984) que é descrito em detalhes na equação 1:

$$H_G/H_0 = \beta_1 [1 - \exp(-\beta_2 \Delta T^{\beta_3})] \quad (1)$$

em que, H_G ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) é a irradiação solar global; H_0 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) irradiação solar global no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); β_1 é o coeficiente de transmissividade atmosférica máxima em dias de céu claro; β_2 é o coeficiente de controle da taxa da transmissividade máxima em função da amplitude térmica (ΔT); β_3 é o coeficiente de auxílio do controle da transmissividade máxima em função da amplitude térmica (ΔT); ΔT amplitude térmica ($^{\circ}\text{C}$) é a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas mediante ajuste da metodologia de Bristow e Campbell (1984).

Técnicas de aprendizagem de máquinas para estimativas de H_G

As técnicas de aprendizagem de máquinas (AMs) empregam um princípio de inferência denominado de indução. Em que as conclusões gerais são obtidas a partir de um determinado conjunto de exemplos. Assim, a aprendizagem supervisionada é uma das principais abordagens da indução (Lorena et al., 2011). As Artificiais Neurais Networks (ANN's) ou Redes Neurais Artificiais (RNA's) são sistemas computacionais que se baseiam na estrutura, no método de processamento e na capacidade de aprendizagem do cérebro (Haykin, 1998). Estas são compostas de unidades de processamento simples, que simulam os neurônios biológicos em uma ou mais camadas (Lorena et al., 2011). No presente trabalho, é utilizado o treinamento da RNA's com a Multilayer Perceptron (MLP), com o algoritmo *backpropagation* (Haykin, 1998) e termo *momentum*. As RNA's foram testadas e avaliadas através da ferramenta computacional de domínio público WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*), que consiste num conjunto de algoritmos de AMs livre, disponível em <http://www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/> (Witten e Frank, 2005). Na Tabela 1 estão presentes os símbolos correspondentes às variáveis de entrada [amplitude térmica (ΔT) e irradiação solar global incidente no topo de atmosfera (H_0)] do modelo desenvolvidos pela RNA para estimativa de H_G (variável de saída).

Tabela 23. Modelo desenvolvido pelas Redes Neurais Artificiais (RNA's) através das variáveis

de entrada amplitude térmicas (ΔT) e irradiação solar global incidente no topo da atmosfera (H_o).

| ANN (MLP) | Variáveis de entrada |
|-----------|----------------------|
| RNA | $\Delta T, H_o$ |

Índices estatísticos

Na avaliação do desempenho dos modelos ANN e foram utilizados: MBE (Mean Bias Error), Relative Mean Bias Error (rMBE), Root Mean Square Error (RMSE), Relative Root Mean Square Error (rRMSE) e d de Willmott (Willmott, 1981; Moriasi et al., 2007; Escobedo et al., 2011; Santos et al., 2014). Estes índices estatísticas permitem a detecção de subestimativa ou superestimativa, espalhamento ou tendência sistemática e ajustamento dos modelos.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)}{N'} \quad rMBE (\%) = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)}{\bar{X}} \quad RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{N'} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$rRMSE (\%) = 100 \times \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{N'} \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{X}} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N'} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N'} (|P'_i| + |O'_i|)^2}$$

em que: P_i representa os valores estimados de ETo por ANN, O_i os valores de ETo_{PMF-56} , $|P'_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}_i$, em que \bar{O}_i , representa a média de O_i , $|O'_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}_i$. \bar{X} é o valor médio medido e N' o número de observações. Diferentes intervalos de rRMSE são definidos para avaliar a acurácia dos modelos (Heinemann et al., 2012): Excelente se rRMSE < 10%; Bom se 10% ≤ rRMSE < 20%; Aceitável se 20% ≤ rRMSE < 30%; Pobre se rRMSE ≥ 30%. O valor de (rRMSE) é o índice conclusivo sobre o desempenho dos modelos neste estudo. Todos os cálculos estatísticos foram feitos no Microcal™ Origin 6.0®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos coeficientes de B-C ajustados para Botucatu encontram-se na Tabela 2. Onde se podem verificar para B-C valores dos coeficientes ($\beta_1 = 0,673$; $\beta_2 = 0,047$; $\beta_3 = 1,602$) que estão próximos aos descritos por Bristow e Campbell (1984) e Mesa e Varas (2000). Outros trabalhos dispostos na literatura informam com mais detalhes algumas diferenças e semelhanças em relação aos valores obtidos neste trabalho (Chen et al., 2004; Almorox et al., 2011; SILVA et al., 2011; SANTOS et al., 2014).

Tabela 24. Coeficientes empíricos do modelos de Bristow-Campbell (B-C) determinado para Botucatu, SP

| Localidade | Botucatu | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Coefficientes | β_1 | β_2 | β_3 |
| B-C | 0,673 | 0,047 | 1,602 |

O desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros

A Figura 1 [(a) e (b)] demonstra a distribuição pareada de dados H_G (estimada) [pelos modelos de Bristow-Campbell (B-C) e das RNA's com H_G (medida)]. Em ambas as figuras a distribuição de H_G (estimada) é representada por asteriscos vermelhos e círculos verdes em torno da reta 1:1. Estes símbolos (asteriscos vermelhos e círculos verdes) indicam que os valores de H_G^d (estimada) foram obtidos mediante a metodologia dos anos típico e atípico respectivamente. Esta disposição de H_G (estimada) indica eventuais efeitos da sazonalidade atmosférica e dos aerossóis em Botucatu. Na comparação do desempenho dos modelos estatísticos com os desenvolvidos pelas técnicas de (AMs) ANN e B-C (Tabela 3), destaca-se que B-C ano típico foi o modelo de melhor desempenho estatístico entre os demais (MBE = -1,210 MJ m⁻² dia⁻¹; rMBE = -6,948%; RMSE = 3,532 MJ m⁻² dia⁻¹; rRMSE = 20,289%; d = 0,912; R² = 0,736). Em contraste com RNA ano atípico (MBE = 2,462 MJ m⁻² dia⁻¹; rMBE = 14,362%; RMSE = 4,796 MJ m⁻² dia⁻¹; rRMSE = 27,980%; d = 0,856; R² = 0,692) que foi o modelo de pior desempenho estatístico.

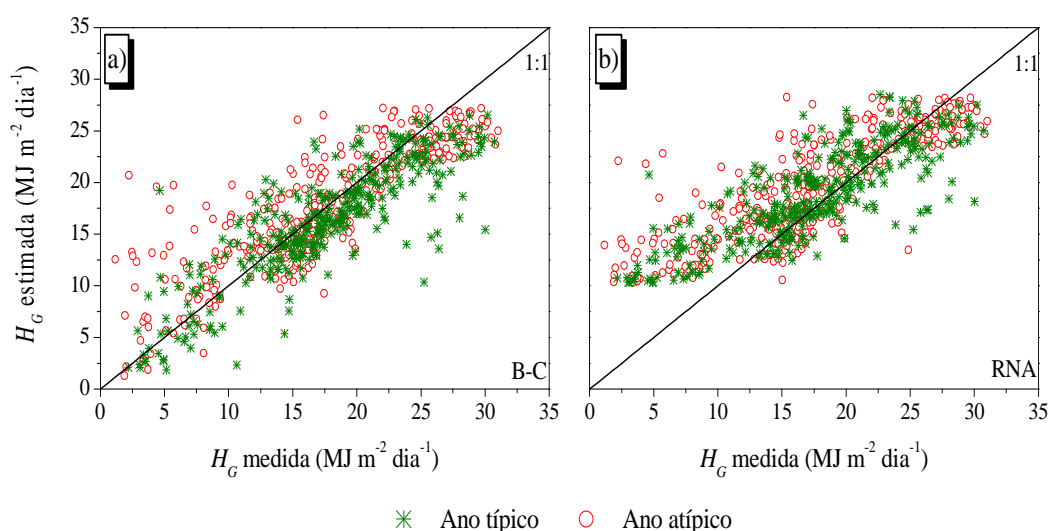


Figura 1. Dispersão dos valores estimados de H_G ano típico (asterisco azul) e ano atípico (círculo vermelho) correlacionados com H_G medida. (a) modelo de Bristow-Campbell e (b) Rede Neural artificial (RNA)

Tabela 25. Desempenho dos modelos B-C e RNA para estimativa da H_G em escala diária com diferentes indicadores estatísticos.

| Índices estatísticos | Bristow-Campbell (B-C) | | RNA (MLP) | |
|--|------------------------|-------------|------------|-------------|
| | Ano típico | Ano atípico | Ano típico | Ano atípico |
| MBE (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | -1,210 | 0,340 | 1,475 | 2,462 |
| rMBE (%) | -6,948 | 1,987 | 8,472 | 14,362 |
| RMSE (MJ m ⁻² dia ⁻¹) | 3,532 | 3,828 | 4,106 | 4,796 |
| rRMSE (%) | 20,289 | 22,349 | 23,582 | 27,980 |
| d | 0,912 | 0,916 | 0,855 | 0,856 |
| R ² | 0,736 | 0,735 | 0,715 | 0,692 |

De acordo com os resultados obtidos na base de validação dos modelos, verificou-se que o modelo B-C ano típico se sobressaiu em relação aos demais modelos de estimativa de H_G . Desta maneira, pode-se concluir que B-C estima H_G em Botucatu com precisão e é recomendável devido a sua praticidade. Embora a utilização das RNA's seja bastante promissora e necessite de pesquisas mais aprofundadas para ajustes que levem a modelagens mais precisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMOROX, J. et al. **Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain)**. Applied Energy, v. 88, p. 1703-1709, 2011.
- BORGES et al. **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.
- BOSCH et al. **Daily solar irradiation estimation over a mountainous área using artificial neural networks**. Renewable Energy, v. 33, p. 1622-1628, 2008.
- CHAVES, M. A.; ESCOBEDO, J.F. Solar radiation data base management software. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n.2, p. 91-98, 1999.
- ESCOBEDO J.F. Estimativa da irradiação solar direta na incidência norma (K_b) em função da transmissividade atmosférica (K_t) e razão de insolação (n/N). In: Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente. V. 17, pp. 11.101-11.110, 2013.
- Heinemann, A. B.; Van Oort, P. A. J.; Fernandes, D. S.; Maia, A. H. N. Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. **Bragantia, Campinas**, v. 71, n. 4, p.572-582, 2012.
- SANTOS, C. M. et al. **On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil**. Energy, v. 71, p. 388-398, 2014.
- SILVA, C. R. et al. **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, p. 281-288, 2011.
- TERAMOTO, É. T.; ESCOBEDO, J. F. **Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo**. In: R. Bras. Agríc.Ambiental, v. 16, n.9, p. 985-992, 2012.
- WILLMOT, C. J. On validation of models, **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E. Data Mining: Practical machine learning tools and techniques (2nd ed.). San Francisco: Morgan Kaufman, 2005.