

ÍNDICE PARA AVALIAÇÃO DE MODELOS BASEADA EM LÓGICA FUZZY: RADIÇÃO SOLAR

RAFAEL ALDIGHERI MORAES¹, GILBERTO CHOHAKU SEDIYAMA², ARISTIDES RIBEIRO²

¹ Engenheiro Agrícola, D. Sc., Pós-Graduando, Depto. de Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP/Campinas – SP, e-mail: rafagricola@gmail.com.

² Engenheiro Agrônomo, Prof. Titular Ph.D, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa - MG

² Engenheiro Agrônomo, Prof. Titular Ph.D, Depto. de Engenharia Agrícola, UFV/Viçosa - MG

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de Setembro de 2009 – GranDarrell Minas Hotel, Eventos e Convenções – Belo Horizonte – MG

RESUMO: Ao avaliarmos modelos de estimativa, são utilizados diversos índices e testes estatísticos. No presente trabalho são avaliados a correlação, os padrões, a concordância, a acurácia, etc. Porém cada índice permite uma compreensão parcial do desempenho do modelo. De forma a agregar índices estatísticos em apenas um único índice, foi utilizado a técnica da lógica fuzzy. Esta técnica permite analisar cada índice de forma parcial, gerando ao final um único valor de desempenho do modelo de estimativa. Neste trabalho, foram utilizados três modelos de estimativas da radiação solar à superfície a partir da temperatura máxima e mínima e comparada com dados medidos a partir de estações automáticas do INMET em 12 locais no estado de Minas Gerais. Segundo o índice (I_{rad}), o melhor modelo para estimativa da radiação foi o de DONATELLI-BELLOCHI (2001) para 58% das cidades avaliadas e o segundo melhor foi CAMPBELL-DONATELLI (1998) com 34% e BRISTOW-CAMPBELL (1984) com 8%.

PALAVRAS-CHAVE: modelos de estimativa, índices estatísticos, radiação solar.

INDEX FOR EVALUATION OF MODELS BASED FUZZY LOGIC: SOLAR RADIATION

ABSTRACT: For models evaluations, different indices and statistical tests are used, for example, correlation, patterns, agreements, accuracy, etc. However, each index provides only a partial understanding of the performance of the model. In order to aggregate the statistical indices the technique of logic fuzzy was used. This technique allows analyzing each index in part, and then to generate a single final value indicating the performance of the model estimate. In this work, three models to estimate solar radiation using the maximum and minimum temperatures were used, and data from automatic stations of INMET in 12 locations in the state of Minas Gerais were compared with measured data. The modular indicator (I_{rad}), based in logic fuzzy, showed that the best model to estimate the solar radiation was the DONATELLI-BELLOCH (2001) for 58% of the locations evaluated, and the second best was the DONATELLI-CAMPBELL (1998) with 34% and then BRISTOW-CAMPBELL (1984) with 8%.

KEYWORDS: models of estimation, statistical indices, solar radiation.

INTRODUÇÃO: A lógica tradicional (booleana) lida com variáveis assumindo apenas dois possíveis estados: verdadeiro e falso. Na maioria dos casos, esta representação é suficiente, mas há situações em que se necessita de valores intermediários. Assim, de forma a analisar situações que precisam de julgamento sobre algo incerto (e.g. se algo está quente, meio quente, morno, frio, etc), foi desenvolvida a lógica fuzzy. A palavra fuzzy (vago, impreciso, nebuloso) foi introduzida na matemática por ZADEH (1965), para lidar com quantidades de contornos pouco nítidos ou mal definidos e que não podem ser descritas em termos de distribuições de probabilidade (RHEINGANTZ et al. 2000). Ao avaliarmos modelos de estimativa, temos um número variado de índices que analisam o modelo como, por exemplo, correlação, padrões, concordância, acurácia, etc. Porém, cada índice permite somente uma compreensão parcial do desempenho do modelo. Desta forma, o uso da lógica fuzzy permite agregar vários índices estatísticos e a partir do grau de importância dado para cada índice (de acordo com o pesquisador), obter uma visão global do desempenho do modelo, tendo como saída apenas um índice (BELLOCCHI et al., 2002). Assim, o presente trabalho teve por objetivo analisar a utilização da lógica fuzzy em agregar índices estatísticos e, com isso, selecionar o melhor modelo de estimativa da radiação solar global baseado nas temperaturas máximas e mínimas para o estado de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS: Para obtenção do I_{rad} , foram formulados três módulos, refletindo a magnitude dos resíduos (Acurácia), a correlação dos valores estimados e medidos (Correlação), e a habilidade de o modelo produzir resíduos uniformemente distribuídos sobre duas importantes variáveis independentes, dia do ano e temperatura mínima do ar (Padrão). O valor de cada módulo é dependente de um ou mais índices e de um conjunto de regras e decisões. Para cada módulo, um valor (sem dimensão) varia entre 0 (melhor resposta do modelo) e 1 (pior resposta do modelo). O processo de agregação é efetuado pela combinação valores difusos de pesos. De acordo com essa aproximação pode-se caracterizar a forma de cada função para cada índice de entrada, ou seja, por dois limites pré-definidos e por um intervalo de transição. A função do intervalo de transição pode ter diferentes formas, sendo que neste trabalho foi baseada em LIAO et al. (2003), cuja função utilizada é quadrática. Assim, se x é o valor do índice, α e γ são os limites inferiores e superiores respectivamente, e o valor dado pela função forma é constante em 0 e 1 para $x \leq \alpha$ e para $x \geq \gamma$, respectivamente. A função apresenta a seguinte forma:

$$S(x; \alpha; \gamma) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha \\ 2 * \left(\frac{x-\alpha}{\gamma-\alpha}\right)^2 & \alpha < x < \beta \\ 1 - 2 * \left(\frac{x-\gamma}{\gamma-\alpha}\right)^2 & \beta \leq x \leq \alpha \\ 1 & x \geq \gamma \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

em que, $\beta = (\alpha + \gamma)/2$. A interseção das equações, ou seja, o ponto médio entre os dois extremos é 0,5. Para cada módulo, foi formulada uma regra de decisão para os valores dados pela equação anterior, sendo F ou U de acordo com as regras estabelecidas. A descrição desta lingüística para estes componentes é efetuada de forma relativamente simples, sendo utilizada a lógica de decisão utilizando fatores como “se”, “então”. Após o processo de divisão dos pesos em cada módulo e em cada índice estatístico, temos a incidência relativa de cada índice sobre o valor do I_{rad} , conforme os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Relativa incidência de cada índice sobre o valor do indicador I_{rad} (RRMSE, raiz do erro quadrático médio relativo; P(t), probabilidade do teste t; EF, eficiência (índice); IP_{doy} e $IP_{Tmín}$, padrões versus dia do ano e da temperatura mínima, respectivamente).

Índice	Incidência Relativa sobre o I_{rad}
--------	---------------------------------------

RRMSE	0,4 x 0,55 = 0,22
EF	0,4 x 0,55 = 0,22
P(t)	0,2 x 0,55 = 0,11
r	1,0 x 0,15 = 0,15
IP _{doy}	0,5 x 0,30 = 0,15
IP _{Tmín}	0,5 x 0,30 = 0,15

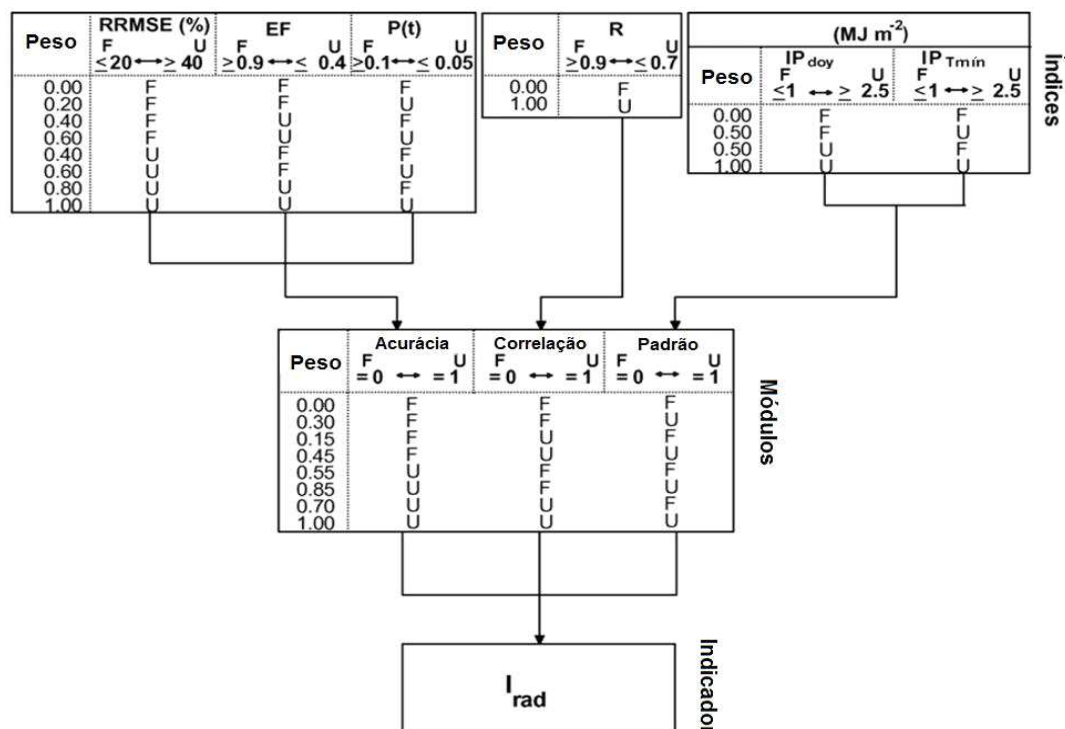


Figura 1 - Índices estatísticos, módulos e o indicador usado para avaliação estatística, com regras de decisão e a agregação sistemática (índices: RRMSE, raiz do quadrático erro médio relativo; EF, eficiência do modelo; P(t), probabilidade do teste *t* pareado; R, correlação; IP_{doy} e $IP_{Tmín}$, índice padrão para dia do ano e para temperatura mínima respectivamente; módulos: Acurácia, Correlação e Padrão, I_{rad} , indicador; F, favorável; U, não-favorável). [Fonte: adaptado de Savage et al. (2008)]

A radiação solar global (R_g), a partir de dados de temperatura máxima e mínima, foram obtidas a partir dos seguintes modelos, segundo SAVAGE et al. 2008: BRISTOW e CAMPBELL (1984), DONATELLI e CAMPBELL (1998) e DONATELLI e BELLOCCHI (2001). A região abrange o estado de Minas Gerais, utilizando dados de estações meteorológicas automáticas do INMET em 12 localidades (Carangola, Contagem, Formiga, Monte Verde, Montes Claros, Muriaé, Ouro Branco, Passos, Serra dos Aimorés, Timóteo, Varginha e Viçosa) para o ano de 2007. Foram utilizados dados diários de temperatura máxima ($T_{máx}$), temperatura mínima ($T_{mín}$) e radiação solar global (R_g).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: De acordo com cada modelo e local, foi analisada a estimativa da radiação solar através da lógica fuzzy. Para a análise da radiação solar, depois de calculados os índices, obteve-se os valores dos módulos e finalmente o I_{rad} . Apresenta-se, na tabela 2, os valores dos índices estatísticos para as cidades de Muriaé e Serra dos Aimorés,

a título de ilustração. Verificou-se que os menores valores para o I_{rad} , e sendo assim, melhor estimativa da radiação solar, foi em Serra dos Aimorés e Muriaé para os três modelos. Os demais locais, apresentaram respostas satisfatórias, ressaltando que o indicador não tem unidades e apenas classifica de forma ordinal a avaliação de cada análise.

Tabela 2 - Resposta para três modelos [Bristow-Campbell (BC), Campbell-Donatelli (CD), e Donatelli-Bellochi (DB)] em dois locais para o ano de 2007.

Localização	Modelo	RRMSE	EF	P(t)	r	IP _{doy}	IP _{Tmín}
Muriaé	BC	15,85	0,76	0,69	0,88	1,16	1,79
	CD	15,61	0,77	0,98	0,88	0,94	1,40
	DB	16,19	0,75	0,73	0,87	0,49	1,09
Serra dos Aimorés	BC	13,51	0,81	0,82	0,90	0,74	0,99
	CD	14,02	0,80	0,50	0,90	1,30	0,84
	DB	14,16	0,79	0,67	0,89	0,79	0,85

Do mesmo modo, na tabela 3 tem-se os valores dos módulos e do I_{rad} .

Tabela 3 - Análise da resposta dos modelos de radiação solar em 12 locais para o ano de 2007, com os módulos de acurácia, correlação e padrão; e o indicador I_{rad} .

Localização	Modelo	Acurácia	Correlação	Padrão	I_{rad}
Muriaé	BC	0,0627	0,0254	0,2979	0,0659
	CD	0,0564	0,0243	0,0695	0,0143
	DB	0,0722	0,0572	0,0033	0,0112
Serra dos Aimorés	BC	0,0254	0,0000	0,0000	0,0007
	CD	0,0342	0,0005	0,0406	0,0043
	DB	0,0370	0,0047	0,0000	0,0015

CONCLUSÕES: Conclui-se com este trabalho que a utilização da lógica fuzzy para agregação de índices estatísticos e seleção de modelos de estimativa é válida, principalmente por levar em consideração um número variado de índices. Verificou-se também que para as 12 cidades avaliadas, o modelo de DONATELLI-BELLOCHI (2001) foi o melhor para 58% das cidades, o segundo melhor foi CAMPBELL-DONATELLI (1998) com 34% e BRISTOW-CAMPBELL (1984) com 8%.

AGRADECIMENTOS: Agradimentos à agência de fomento à pesquisa, FAPEMIG, pelo apoio financeiro e ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BELLOCCHI, G., ACUTIS, M., FILA, G., DONATELLI, M. An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system, **Agronomy Journal**, Italy, v. 94, n.6, p. 1222-1233, 2002.
- LIAO, T. W. A., CELMINS, A. K., HAMMELL, R. J. A fuzzy c-means variant for the generation of fuzzy term sets. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 135, p. 241-257, 2003.
- RHEINGANTZ, P. A., ROCHA, A. C. M., LIMA, F. R., COSENZA, C. A. N. Modelos de Análise Hierárquica Aplicado na Avaliação do Desempenho dos Edifícios de Escritórios, **Anais do NUTAU'2000**, São Paulo: FAUUSP-NUTAU'2000, cód. 072, 2000.

SAVAGE, M. J., ABRAHA, M. G. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, South Africa, v. 148, p. 401-416, 2008.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.