

APLICABILIDADE DE MODELOS DE CORRELAÇÃO DA TEMPERATURA COM A RADIAÇÃO SOLAR PARA O NORDESTE BRASILEIRO

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho – manael@pesqueira.ifpe.edu.br

Carlos Fabiano dos Santos Silva – carlosfabianos@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

Resumo. A energia solar assume uma função indispensável no provimento significativo de energia renovável. Sendo o conhecimento do comportamento do recurso solar uma das peças fundamentais para o desenvolvimento de aplicações desta fonte primária de energia. É preciso ressaltar que devido ao alto custo para a realização de medições da radiação solar no Brasil, modelos que permitem estimar a radiação solar global são desenvolvidos no sentido de possibilitar a utilização de dados de temperatura e umidade, visto que este tipo de dado é mais comum de se medir. Este trabalho apresenta os resultados preliminares de um estudo sobre a aplicabilidade dos modelos de correlação no Nordeste brasileiro. A análise da aplicabilidade dos modelos de correlação entre variáveis climáticas e a radiação solar, permite identificar os que melhor se adequam às condições de localidades na Região Nordeste, sendo o INMET, a fonte de dados pela qual se pretende identificar esses modelos. 15 localidades da região Nordeste, foram escolhidas através da análise de mapas. Para este trabalho, foram testados três modelos de correlação: Bristow e Campbell (1984), Annandale et al. (2002) e Weiss e Hays (2004), para os dados da cidade de Feira de Santana-BA, foram utilizados 5 anos de dados diários de temperatura e radiação solar global. Como resultado, observou-se que, após utilizar um período de 5 meses para testes estatísticos, o modelo Annandale et al. (2002) foi o que apresentou melhores indicadores, sendo este o escolhido para realizar estimativas da radiação solar global na localidade em estudo. O segundo modelo que melhor apresentou indicadores estatísticos foi o de Bristow e Campbell (1984).

Palavras-chave: Estimção da radiação solar, Energia Solar, Temperatura ambiente

1. INTRODUÇÃO

É indiscutível que a energia solar assume uma função indispensável no provimento significativo de energia renovável. Com base nisto, existem diferentes formas de aproveitá-la, dentre as quais, se sobressai, a transformação de radiação solar em calor, como por exemplo a utilização de concentradores como uma das soluções que viabiliza se atingir fluxos concentrados de energia, produzindo assim quantidades expressivas da mesma. Além disto, segundo Cao et al. (2017), o conhecimento do recurso solar também tem sua importância em diversas áreas como agricultura, arquitetura e iluminação.

É preciso, em primeiro lugar, ressaltar que devido ao alto custo para a realização de medições da radiação solar no Brasil, existe um problema da disponibilidade de dados de radiação medidos, visto que o número de estações que registram esta grandeza é menor do que aquelas que registram temperatura e umidade, por exemplo (Borges et al., 2010).

Nota-se, por outro lado, que o alto custo não é o único problema para obtenção de dados da radiação solar. Diferentemente dos dados de temperatura e precipitação, as disponibilidades de dados da radiação são mais restritas. Alguns problemas de calibração, sujeira no sensor, água acumulada, dentre outros, acarretam a ausência de dados e dificultam a aplicação dos modelos (Abraha e Savage, 2008).

Um das soluções utilizadas, neste contexto, é o emprego de modelos de correlação de variáveis ambientais com a radiação solar. Existem diversos trabalhos cujos autores desenvolvem expressões matemáticas, permitem estimar a radiação solar tomando como base, por exemplo a temperatura ambiente, entre outros, como: Annandale et al. (2002), Bristow e Campbell (1984) e Chen et al. (2004).

Raichijk e Lanson (2011) realizaram um estudo mais completo com 11 modelos aplicados a duas localidades na Argentina. No Brasil, foram encontrados trabalhos que realizam análises e comparações dos modelos de temperatura nas condições locais, podemos citar: Silva et al. (2012), Fernandes et al. (2011), Santos et al. (2012) e Borges et al. (2010).

Este trabalho apresenta os primeiros resultados de uma proposta de estudo a ser realizado em diversas cidades do Nordeste do Brasil, com o objetivo de se encontrar qual modelo de correlação melhor se adapta às diversas condições climáticas presentes na região. Mais especificamente, são apresentadas as comparações de três modelos para a cidade de Feira de Santana-BA.

2. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DO ESTUDO E DOS MODELOS UTILIZADOS

Como citado anteriormente, este trabalho faz parte de uma proposta de estudo sobre o emprego de modelos de correlação de variáveis climáticas com a irradiação solar na Região Nordeste do Brasil. Inicialmente, está se trabalhando exclusivamente com modelos que relacionam a temperatura do ar com a irradiação. Este estudo pretende identificar qual ou quais modelos de correlação mais se adequam as várias condições climáticas presentes na região.

Para se reduzir a quantidade de localidades, o primeiro passo foi a identificação de localidades, que foram incluídas em zonas, de acordo com a similaridade de dados climatológicos. Nesta coleta preliminar dos dados das cidades analisadas, foram consideradas condições de climas específicos, tais como: temperatura média, precipitação, dias com precipitação, umidade relativa e horas de sol. O conjunto desses dados climatológicos correspondentes a cada cidade foram comparados entre si para a seleção das regiões, foram utilizados mapas para facilitar uma observação geográfica e climatológica das cidades trabalhadas. Ao término desse processo, foram evidenciadas 11 zonas climatológicas e 15 cidades passíveis de serem trabalhadas, que estão indicadas no mapa da Fig. 1.

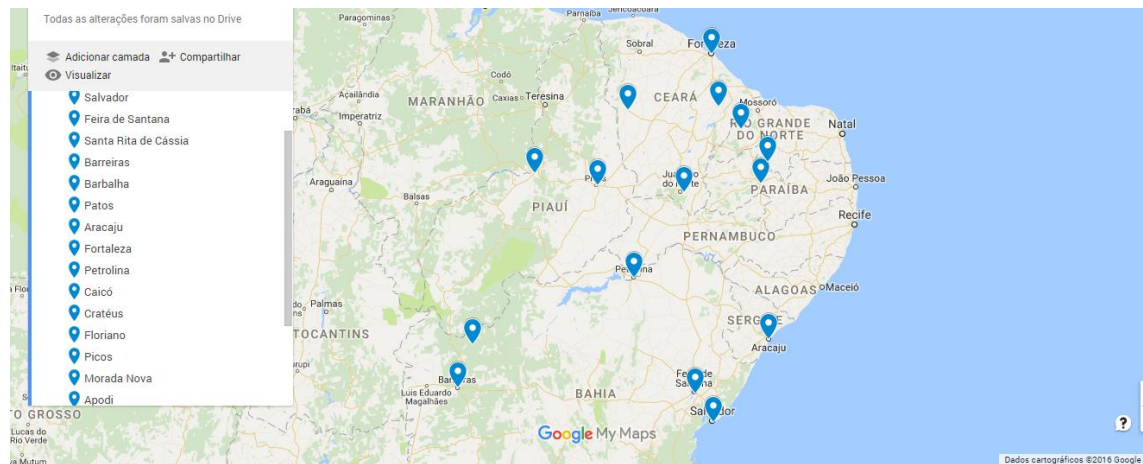


Figura 1 - Mapa da Região Nordeste com as localidades escolhidas para o desenvolvimento da proposta de estudo.

Observa-se na Fig. 1 que as localidades escolhidas estão dispostas em faixas da Região Nordeste, como por exemplo: litoral (alta umidade, grandes volumes de chuvas proximidade de grade corpo de água), zona da mata (umidade produzida pela vegetação, volumes de chuvas medianos), sertão (baixa umidade e pequenos volumes de chuva).

Como este é trabalho faz parte do estudo inicial, foram escolhidos apenas três modelos de correlação entre variáveis climáticas (no caso apenas a temperatura ambiente) e irradiação solar: o modelo de Bristow e Campbell (1984) que usa relação entre a transmitância atmosférica e a variação diária de temperatura do ar. O modelo de Annandale et al. (2002) que estima a irradiação solar, utilizando influências de presença de corpos de água e o valor da altitude do local. O modelo de Weiss e Hays (2004) que permite calcular a irradiação solar, utilizando como referência, valores da irradiação solar extraterrestre de dias anteriores.

Os modelos utilizados empregam a expressão da Eq. (1) para estimar o valor da irradiação diária em Wh/m^2 .

$$R_s = tt_i \cdot H_0 \quad (1)$$

Onde: tt_i é a transmissividade atmosférica (adimensional) e H_0 é a irradiação solar extraterrestre diária sobre uma superfície horizontal em Wh/m^2 , calculada com expressões que constam em Rabl (1985). Cada modelo emprega uma expressão diferente para a estimativa do valor de tt_i em função da variação de temperatura (ΔT) diária.

Modelo Bristow Campbell (BC)

O modelo BC apresenta a relação da transmissividade atmosférica (tt_i) como sendo uma função exponencial da variação de temperatura do ar diária (ΔT_i) e precipitação. Segundo os autores, este modelo apresentou sucesso entre 70% a 90% dos dados solares diários da entrada de radiação em três locais ao noroeste dos EUA.

O tt_i é calculado, segundo o modelo BC, por meio da Eq. (2).

$$tt_i = a \left(1 - e^{-b \cdot \Delta T_i^c} \right) \quad (2)$$

Na Eq. (2), a é o coeficiente de transmissão atmosférica do céu claro adimensional, i é o dia do ano, b e c são os coeficientes diários da variação de temperatura do ar, sendo $a=0,7$ e $b=0,010$ para o inverno e $b=0,004$ para o verão e $c=2,4$ (recomendados pelos autores). O ΔT_i é a variação das temperaturas máxima e mínima diárias do ar e pode ser calculado com a Eq. (3).

$$\Delta T_i = T_{m\acute{a}x}(i) - \frac{T_{m\acute{i}n}(i) + T_{m\acute{i}n}(i+1)}{2} \quad (3)$$

Para o cálculo do ΔT_i , na Eq. (3), o $T_{m\acute{a}x}(i)$ representa a temperatura máxima do dia e o $T_{m\acute{i}n}(i)$ a temperatura mínima do mesmo dia, todos em °C.

Modelo Annandele (AN)

O modelo AN estima o valor de tt_i por meio da Eq. (4).

$$tt_i = k_{rs} \left(1 + 2,7 \times 10^{-5} \cdot Alt \right) \left(T_{m\acute{a}x}(i) - T_{m\acute{i}n}(i) \right)^{0,5} \quad (4)$$

Onde: k_{rs} é o coeficiente de adaptação definido para o interior ou regiões litorais, seu valor é de 0,16 para locais no interior, onde a massa de terra domina e as massas de ar não são fortemente influenciadas por um grande corpo de água e de 0,19 para locais costeiros, situados ou adjacentes à costa de uma grande massa de terra e onde as massas de ar são influenciadas por corpos de água nas proximidades. Alt é valor da altitude do local em m.

Modelo Weiss e Cynthia (WC)

O modelo WC também estima a radiação solar diária, em Wh/m², usando a mesma relação da Eq. (1), destaca-se pelo modo diferenciado da expressão de tt_i (transmissividade atmosférica), apresentada na Eq. (5), que utiliza valores de radiação solar extraterrestre diária anterior ao dia que está sendo estimado.

$$tt_i = 0,75 \cdot \left[1 - e^{\frac{-b \cdot \Delta T^2}{H_{0(i-30)}}} \right] \quad (5)$$

Na Eq. (5): b é um coeficiente empírico, específico da localidade. $H_{0(i-30)}$ é a radiação solar extraterrestre 30 dias antes do dia corrente (i-30), calculada pelas expressões de Rabl (1985). Os autores determinaram o coeficiente b a partir de 10 anos de dados utilizando uma regressão não linear.

ΔT (°C) é o termo referente à variação da temperatura diária, é calculado com a Eq. (6). C é um fator de correção de precipitação adimensional.

$$\Delta T = C \cdot \Delta T_i \quad (6)$$

2.1 Descrição da origem e da qualificação dos dados

Para analisar a aplicabilidade dos três modelos, o primeiro Município escolhido foi Feira de Santana – BA (Latitude: -12,196200°, Longitude: -38,967384° e Altitude: 230 metros). No total foram utilizados dados do período de 2012 a 2017 obtidos do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), consistindo em 1642 dias de dados de temperatura e radiação solar. Um processo de aceitação dos dados foi utilizado no sentido de garantir que apenas dados com boa qualidade sejam utilizados. Como resultado deste processo, a Tab. 1 apresenta os percentuais que foram filtrados dos dados originais.

Tabela 1 - Resumo do processo de qualificação dos dados.

Quantidade	
Total coletado	1642
Total classificado	80,5%
Faltando dados	7,6%
Fora da faixa	1,09%
Incompletos para cálculo de ΔT_i	10,6%

Na Tab. 1, observa-se que foram coletados 1642 dias de dados no site do INMET, destes foram classificados apenas os que possuíam todos os dados meteorológicos do dia, excluindo os dias com falta de medição. Outro critério de exclusão foi a falha de valores de medições estando fora da faixa de validade do valor. Com a exclusão dos dados pelos filtros descritos, surgiu a necessidade de desconsiderar os dias que ficam na vizinhança dos dias excluídos (Incompletos para cálculo de ΔT_i) pois, conforme a Eq. (3) indica, para o cálculo de ΔT_i , se faz necessário o valor da temperatura mínima do dia anterior.

2.2 Resultado para o modelo BC

Relativo ao modelo BC, o gráfico da Fig. 2 ilustra o resultado da relação entre t_i e ΔT_i obtido pelos citados autores (Fig. 2a) e o resultado verificado com os dados de Feira de Santana (Fig. 2b).

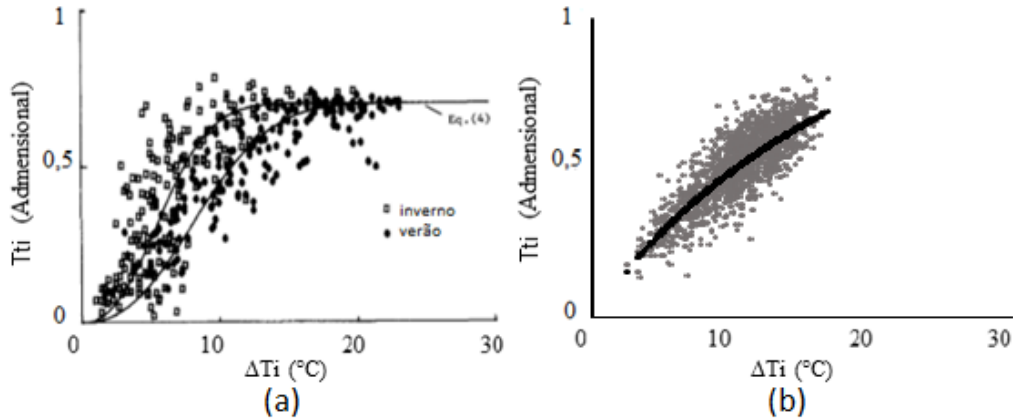


Figura 2 - Relação entre o índice de transmissividade e a variação de temperatura diária. (a) resultado do modelo Bristow e Campbell (1984). (b) resultado do modelo aplicado na cidade de Feira de Santana.

No gráfico da Fig. 2a, observa-se que a distribuição dos pontos foi separada em duas linhas de tendência uma utilizando dados coletados no inverno e a outra no verão. Observa-se que, para a localidade analisada, existem dias em que as variações de temperatura (ΔT_i) são baixas, da ordem de 1 °C, e dias com grandes variações de temperatura chegando a valores próximos de 22°C.

Na Fig. 2b, foram utilizados dados da cidade de Feira de Santana sem distinção de estação do ano. As variações de temperaturas verificadas estão entre 2 a 16, mas na faixa entre 9 a 16 °C, concentra 72,4% dos dias. Observa-se que as condições climatológicas das duas localidades são diferentes. Ainda na Fig. 2b, a curva em preto representa um ajuste dos coeficientes da Eq. (2) do modelo BC. Os valores obtidos estão indicados na Tab. 2.

Tabela 2 - Valores dos coeficientes obtidos para o modelo BC.

Coeficiente	Valor obtido
a	1,239
b	0,061
c	0,925

Os indicadores estatísticos observados no ajuste foram $R^2 = 0,698$ e $\chi^2 = 6,557$. Verifica-se a partir dos coeficientes encontrados que, o valor do coeficiente a, que representa a transmissividade atmosférica de céu claro situa-se fora da faixa de validade, pois para a condição de céu claro este valor é habitualmente 0,8, sendo o máximo teórico 1, podendo-se citar os resultados de Silva et al. (2012) cujo valor do coeficiente a ficou em torno de 0,7. Este fato indica que, aparentemente, este modelo não se aplica às condições climatológicas da cidade de Feira de Santana. Para completar a análise do modelo, a Fig. 3 apresenta a comparação entre os valores de radiação calculados com o modelo e os medidos pelo INMET.

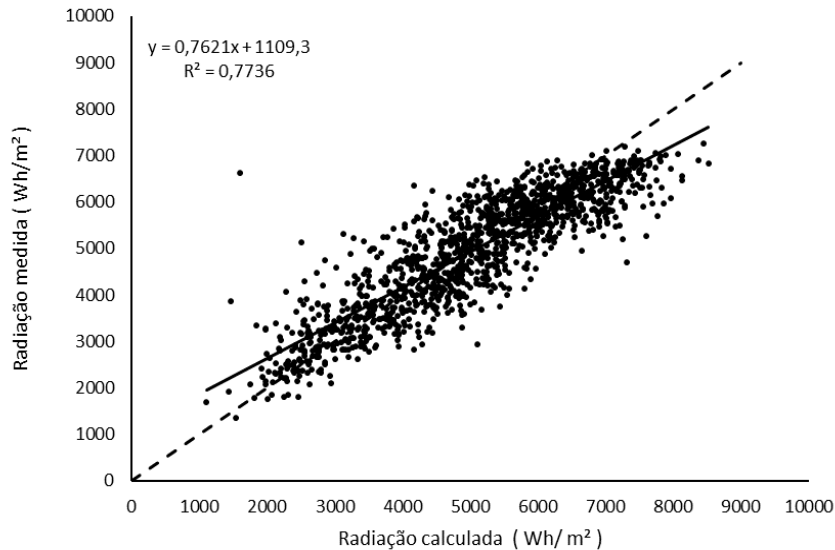


Figura 3 - Relação entre a radiação solar medida e a calculada pela Eq. (1) do modelo de BC para Feira de Santana – BA.

No gráfico da Fig. 3, a linha contínua mostra a tendência dos dados da relação entre radiação medida e calculada, foi inserida uma linha tracejada que representa a relação ideal entre as radiações para fins de comparação. Pela equação da reta obtida, verifica-se que o modelo sobre-estima os valores da radiação calculada em 24% com um desvio de aproximadamente 1100 Wh/m², embora tenha sido observado que um dos coeficientes obtidos tenha apresentado valor fora da faixa de validade.

2.3 Resultado para o modelo AN

Em relação ao modelo AN, foi obtido o valor do único coeficiente do modelo (k_{rs}), cujo valor encontrado foi 0,1566, próximo ao indicado pelos autores para áreas do interior (0,16). Foi construído o gráfico da Fig. 4, que mostra a relação entre a radiação solar diária medida e a radiação calculada com o modelo AN.

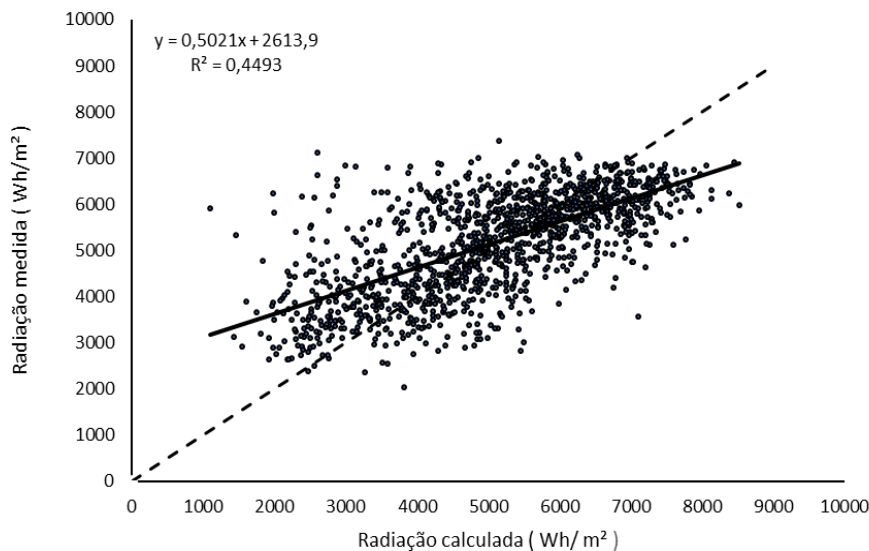


Figura 4 - Relação entre a radiação solar medida e a calculada pela Eq. (1) do modelo de AN para Feira de Santana – BA

No gráfico da Fig. 4, a linha contínua mostra a tendência dos dados da relação entre radiação medida e calculada, foi inserida uma linha tracejada que representa a relação ideal entre as radiações. Os valores da radiação calculada foram obtidos através da Eq. (4). Observa-se também uma maior dispersão dos dados em relação ao modelo BC.

2.4 Resultado para o modelo WC

Para o modelo WC, foi realizado processo semelhante para determinação do único coeficiente do modelo. Para obtê-lo, foi necessário calcular o coeficiente empírico (b), específico de Feira de Santana, utilizando uma modificação na forma da Eq. (5), conforme Eq. (7).

$$\underbrace{\ln\left(1 - \frac{t_i}{0,75}\right)}_{\text{Parte1}} = -b \times \underbrace{\frac{\Delta T^2}{Qo_{(i-30)}}}_{\text{Parte2}} \quad (7)$$

O gráfico da Fig. 5 apresenta a correlação entre os dois lados da Eq. (7), que permitiu a determinação do valor do coeficiente b do modelo WC. O valor utilizado foi 0,3736.

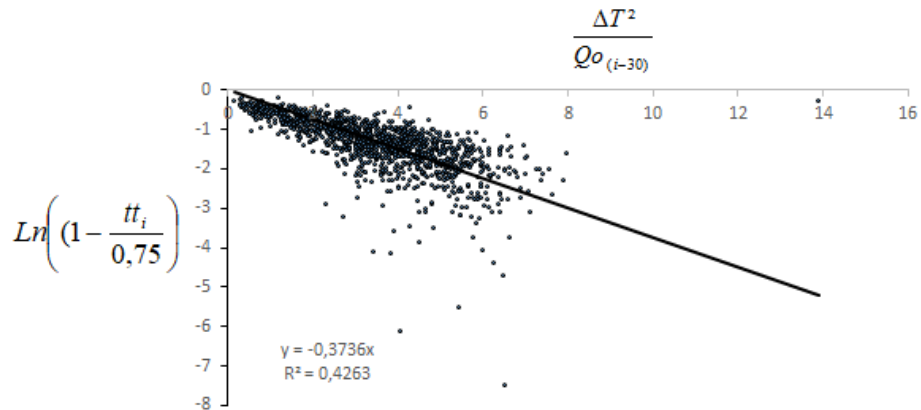


Figura 5 - Relação entre as duas partes da Eq. (7), para obtenção do valor do parâmetro b.

Como forma de comparação entre a relação encontrada com o modelo WC para a cidade de Feira de Santana, a Fig. 6 apresenta a relação entre t_i e ΔT_i apresentada por Weiss e Hays (2004), já na Fig. 7 está sendo apresentado o gráfico da mesma relação para Feira de Santana.

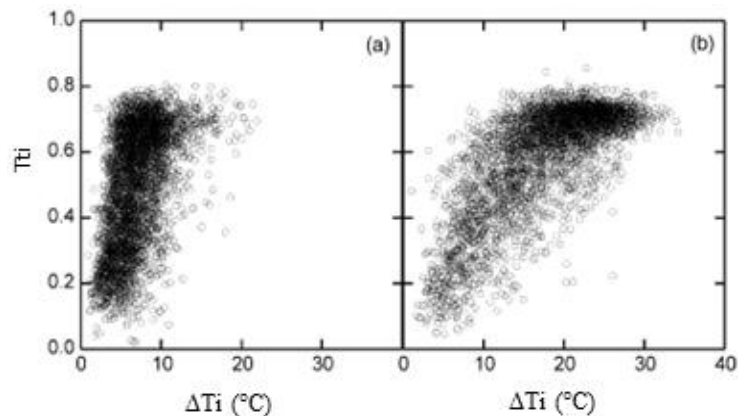


Figura 6 - Transmissividade em função de ΔT_i segundo Weiss e Hays (2004) para as cidades (a) Bandon e (b) McArthur CA .

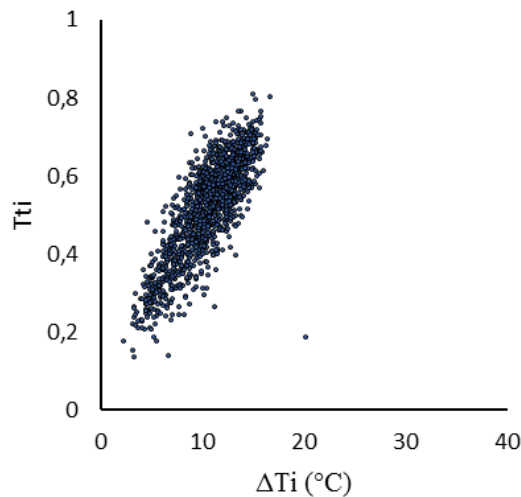


Figura 7 - Transmissividade em função de ΔT_i para Feira de Santana, calculada com o modelo WC.

O gráfico da Fig. 7 mostra que, na cidade de Feira de Santana, a variação de temperatura verificada está entre 0 e 20°C, com uma maior concentração de valores entre 10 e 15 °C. Já na Fig. 6a, observa-se que a variação está mais concentrada entre 1 e 12°C, a dispersão de t_i está mais inclinada que a encontrada em Feira de Santana (Fig. 7). Na Fig. 6b, a dispersão de t_i está mais concentrada para valores da variação de temperatura entre 15 e 30°C. Pode-se considerar que a localização destas faixas de concentração é determinada pela climatologia do local em estudo e que dependendo de onde esteja, o modelo WC pode estimar melhor a irradiação global, o que está apresentado na Fig. 8.

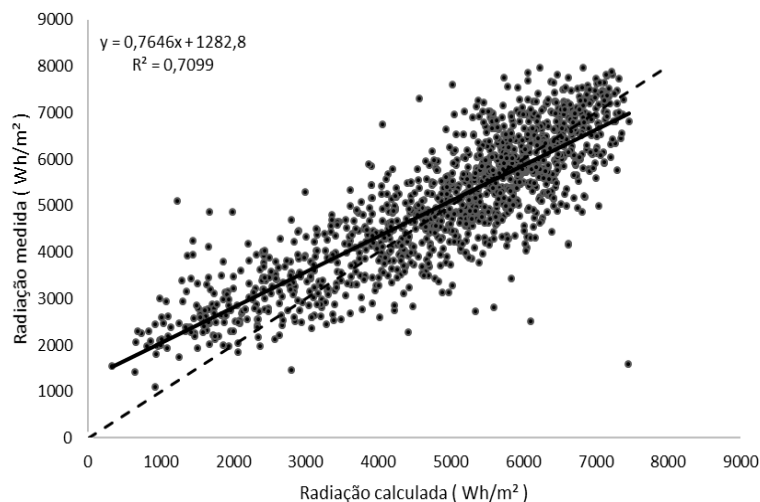


Figura 8 - Relação entre a radiação medida e calculada com o modelo WC para Feira de Santana-BA.

No gráfico da Fig. 8, a linha contínua representa a tendência da relação entre a radiação medida e calculada com o modelo WC, para o cálculo da radiação foi utilizada a Eq. (1). Observa-se que o modelo WC está superestimando os valores da radiação em aproximadamente 24% com um desvio de 1282 Wh/m². O valor do coeficiente de determinação (R^2) desta comparação é de 0,71.

2.5 Considerações finais

Neste trabalho foram apresentados os resultados preliminares de um estudo dos modelos de correlação entre variáveis ambientais e a radiação solar global, foram escolhidas 15 cidades que farão parte do estudo, e aqui mostrou-se o emprego de três modelos a saber: BC (Bristow e Campbell, 1984), AN (Annandale et al., 2002) e WC (Weiss e Hays, 2004).

Com a finalidade de realizar testes estatísticos nos modelos, utilizou-se um conjunto de dados diferente daquele utilizado para o cálculo dos coeficientes. O período utilizado foi de fevereiro de 2017 a junho de 2017, totalizando 118 dias. Foram utilizados como indicadores estatísticos o RMSE (erro médio quadrático), o MBE (erro médio) e o teste estatístico t, conforme sugere Chelbi et al. (2015), também foram utilizados o RMSE percentual e o MBE percentual, conforme apresenta Silva et al. (2012). A Tab. 3 apresenta os resultados dos indicadores estatísticos para o período de testes.

Tabela 3 - Resumo dos coeficientes encontrados e da qualidade do ajuste verificada.

Modelo	RMSE (Wh/m ²)	RMSE (%)	MBE (Wh/m ²)	MBE (%)	t
BC	626,65	13,31%	30,82	0,65%	0,53
AN	677,10	14,39%	7,87	0,17%	0,13
WC	704,08	14,96%	139,99	2,97%	2,20

Na Tab. 3, é possível notar que embora o modelo BC tenha apresentado menor valor do indicador RMSE e consequentemente o RMSE (%), o modelo AN, foi o que apresentou menores valores do MBE e da estatística t, embora tenha apresentado ligeira diferença para mais no RMSE (cerca de 7%), este é o modelo que se pode considerar mais adequado para a estimativa dos valores da radiação solar global em função da variação de temperatura diária para a cidade de Feira de Santana. No geral, os valores do RMSE e MBE estão próximos dos obtidos por outros estudos como Silva et al. (2012) e Borges et al. (2010).

Ressalta-se a necessidade de se testar outros modelos com o objetivo de verificar possíveis modelos que possam obter indicadores estatísticos menores que o modelo AN.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET por fornecer os dados que serviram de base para este estudo e ao IFPE pelo apoio dado para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abraha, M. G. e Savage, M. J., 2008. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 148, n. pp. 401-416.
- Annandale, J. G., Jovanovic, N. Z., Benadé, N. e Allen, R. G., 2002. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, vol. 21, n. pp. 57-67.
- Borges, V. P., Oliveira, A. S. d., Filho, M. A. C., Silva, T. S. M. d. e Pamponet, B. M., 2010. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 14, n. 1, pp. 74-80.
- Bristow, K. L. e Campbell, G. S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 31, n. pp. 159-166.
- Cao, F., Li, H., Yang, T., Li, Y., Zhu, T. e Zhao, L., 2017. Evaluation of diffuse solar radiation models in Northern China: New model establishment and radiation sources comparison. *Renewable Energy*, vol. 103, n. pp. 708-720.
- Chelbi, M., Gagnon, Y. e Waewsak, J., 2015. Solar radiation mapping using sunshine duration-based models and interpolation techniques: Application to Tunisia. *Energy Conversion and Management*, vol. 101, n. pp. 203-215.
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S. e Zhao, W., 2004. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, n. pp. 1759-1769.
- Fernandes, D. S., Heinemann, A. B., Amorim, A. d. O. e Paz, R. L. F. d., 2011. Avaliação de modelos de estimativa de radiação solar global para o Estado de Goiás. XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Guarapari-ES.
- Rabl, A., 1985. *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York, Oxford University Press.
- Raichijk, C. e Lanson, A., 2011. Evaluación de distintos modelos de estimación de la radiación solar global basado em datos de temperatura. *Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente*, vol. 15, n. pp. 11.09-11.13.
- Santos, C. M. d., Souza, J. L. d., Junior, R. A. F., Lyra, G. B., Tiba, C. e Melo, R. O., 2012. Irradiação solar global média horária mensal (Hgh) com modelos empíricos baseados na temperatura do ar para Maceió e Coruripe/Alagoas – Brasil. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Silva, V. J., Silva, C. R. d., Finzi, R. R. e Dias, N. d. S., 2012. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. *Ciência Rural*, vol. 42, n. 2, pp. 276-282.
- Weiss, A. e Hays, C. J., 2004. Simulation of daily solar irradiance. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 123, n. pp. 187-199.

Abstract. *The solar energy assumes an indispensable function in significant providing of renewable energy. The knowledge of solar resource behavior is a fundamental key to provide the development of this energy primary source. It emphasizes that due to the prohibitive cost to realize the solar radiation measurement in Brazil, models that estimate the global solar radiation are developed in the sense of allowing the use of temperature and humidity data, because this kind of database is most common to be measured. This work presents the primary results of an analysis about the applicability of correlations models in Brazilian northeast. This analysis of solar radiation and climatic variables correlation models allows to identify those ones that are most adequate to the northeast region places conditions, the data source of INMET is used to realize this analysis. 15 localities of northeast region were chosen through maps analysis. Three correlation models were tested for this work: Bristow and Campbell (1984), Annandale et al. (2002) and Weiss and Hays (2004), for Feira de Santana-BA city data. 5 years of temperature and solar radiation were used. As a result, it was observed, after using 5 months for statistical tests, the Annandale et al. (2002) presented better indicators and it was chose to realize global solar radiation estimative to this place. The Bristow and Campbell (1984) model presented in second place.*

Key words: *Solar radiation estimative, Solar energy, Ambient temperature.*