

UTILIZAÇÃO DAS PREVISÕES DE TEMPERATURA AMBIENTE COMO ENTRADA PARA A ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR.

USE OF AMBIENT TEMPERATURE FORECASTS AS INPUT FOR
ESTIMATING SOLAR RADIATION.

Gabryel Galindo de Siqueira

gabryelggs1@gmail.com

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho

Manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Devido à grande necessidade de utilização da radiação solar para a geração de energia renovável e ao fato de muitas localidades não possuírem medidores de radiação, o trabalho surgiu como uma pesquisa para verificar se é possível calcular os valores de radiação diária utilizando modelos de correlação entre radiação e temperatura, com base em dados de previsões de temperatura. Foram testados dados de um ano e de um mês de previsões para duas localidades do litoral nordestino, sendo selecionados os quatro melhores modelos de correlação que obtiveram bons resultados em regiões litorâneas para o cálculo dos valores de radiação. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio de dois coeficientes de desempenho: o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE). Observou-se que os quatro modelos obtiveram resultados semelhantes, sendo o modelo de Li *et al.* (LI) o que apresentou os melhores resultados nas avaliações com valores de R^2 aproximadamente de 0,67 nos valores medidos e 0,33 nos valores previstos, e o RMSE obtendo valores próximos de $2,8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ nos valores medidos e $4,11 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ nos valores previstos.

Palavras-chave: Radiação solar. Estimativa de radiação solar. Previsões de temperatura ambiente.

ABSTRACT

Due to the great need to use solar radiation for renewable energy generation and the fact that many locations do not have radiation meters, this study emerged as a research project to verify whether it is possible to calculate radiation values using correlation models between radiation and temperature, based on temperature forecast data. Data from one year and one month of forecasts were tested for two locations on the northeastern coast, and the four best correlation models that obtained good results in coastal regions were selected for calculating radiation values. The performance of

the models was evaluated using two performance coefficients: the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE). It was observed that the four models obtained similar results, with the Li *et al.* (LI) which presented the best results in the evaluations with R^2 values approximately 0.67 in the measured values and 0.33 in the predicted values, and the RMSE obtaining values close to $2.8 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ in the measured values and $4.1 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ in the predicted values

Keywords: Solar radiation. Solar radiation estimation. Ambient temperature forecasts.

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é a principal fonte de energia responsável pelos processos físicos e biológicos que acontecem na Terra, sendo um elemento primordial para o processo de fotossíntese e, conseqüentemente, para a vida de todos os seres vivos no planeta. Além disso, influencia outros processos ecológicos e ambientais relacionados à temperatura do ar e do solo, afetando a transferência de calor por meio da evaporação e transpiração (SPOKAS & FORCELLA, 2006).

Devido ao fato de os dados de radiação solar não serem facilmente disponíveis, como os dados de temperatura e precipitação nas estações meteorológicas (HUNT *et al.*, 1998; RIVINGTON *et al.*, 2005), e ao elevado custo e manutenção necessários para os instrumentos de medição, esses dados não fazem parte de uma estação meteorológica básica, ao contrário dos instrumentos destinados à medição de temperatura, umidade relativa e precipitação.

Diante das limitações dos modelos existentes, a exploração de novas abordagens se torna essencial para mitigar essas restrições. A análise das interações entre variáveis ambientais pode revelar padrões relevantes, especialmente em regiões com características climáticas específicas. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é a fonte de dados pela qual se pretende identificar esses modelos (Melo *et al.*, 2015).

No contexto das mudanças climáticas, a radiação solar para fins de geração de energia não é uma medida alternativa, mas uma necessidade urgente e global, diante de um aumento populacional iminente, que demandará grande pressão para a produção de alimentos e energia, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa com a substituição das fontes de energia poluentes (Ribeiro *et al.*, 2011).

Conforme relatado pela ANEEL (2024), espera-se que o Brasil amplie ainda mais sua capacidade instalada de energia solar, com muitos novos projetos em andamento, especialmente em áreas com alta incidência solar, como o Nordeste. Além disso, o INMET tem contribuído com previsões climáticas que ajudam a otimizar a produção de energia solar, considerando fatores como a cobertura de nuvens e a intensidade da radiação solar. Nessas aplicações, é essencial medir a radiação solar que entra no sistema como forma de avaliar o desempenho da instalação. Em muitos casos, recorre-se a bancos de dados disponíveis na internet de instituições com vasto histórico de trabalho com informações meteorológicas, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Este trabalho busca uma resposta a esses problemas, com o objetivo de estudar maneiras de obter estimativas de radiação que permitam aproveitar melhor a energia

solar. Isso é especialmente importante, considerando a relevância significativa dessa variável para a utilização efetiva da energia solar.

2 DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de obter os melhores resultados, foi feito um estudo de vários artigos para a análise dos modelos já testados, que obtiveram desempenho satisfatórios em pesquisas anteriores, como podemos observar na Tabela 1.

Tabela 01 – Artigos revisados e seus desempenhos.

ARTIGO	CLASSIFICAÇÃO DE KOPPEN	PERÍODO	MELHOR MODELO TESTADO	R ²	RMSE(MJ m ² .d. ⁻¹)
Diniz et al., 2015.	Clima tipo Bs	2008 à 2010	Angstrom-Pascott (1940)	0,92	2,82
Fernandes et al., 2016.	Clima tipo Aw	2004 à 2009	Bristow e Campbell (1984) Donatelli e Belochi (2001)	0,69 0,64	2,66 3,12
Auler & Minuzzi, 2020.	Clima tipo Cf	01/2016 à 12/2016	Hunt et al. (1998) Chen et al. (2004)	0,71 0,74	— —
Filho & Silva, 2018.	Clima tipo BSh	2012 à 2017	Bristow e Campbell (1984)	0,69	2,25
Silva et al., 2012.	Clima tipo Aw, Bs	2008 à 2010	De Jong e Stewart (1993) Bristow e Campbell (1984) Donatelli e Campbell (1997)	0,87 0,87 0,88	3,3 3,3 3,2
Valente et al., 2022.	Clima tipo Am, Aw, Af	01/2020 à 12/2020	Bristow & Campbell (1984)	0,65	4,5
Almorox et al., 2013.	Clima tipo Cfa	07/2007 à 02/2011	Samani, Almorox (2013)	0,76	3,67
Prieto et al., 2022.	Clima tipo Cfb	2003 à 2016	Chen and Li (2012)	0,93	—

Fonte: o autor.

Analisado os artigos da tabela acima foram selecionados os 4 modelos que obtiveram resultados satisfatórios, sendo eles os modelos de estimativas de Radiação Solar Global que foram estudados no trabalho realizado Modelo de Bristol & Campbell, 1984 (BC), Chen *et al.*, 2004 (CH), Hunt *et al.*, 1998 (HU) e Li *et al.*, 2004 (LI) posteriormente são comparados estatisticamente a dados observados.

Para o cálculo do R_g nos modelos utilizados, é necessário o uso da radiação extraterrestre diária (R_a), podendo ser obtida utilizando a Eq. 5.

$$R_a = \frac{\tau_{day}}{\pi} \cdot I_{ex} \cdot \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot \omega_s \cdot \sin \lambda \cdot \sin \delta + \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s \quad (1)$$

Os valores numéricos necessários para o cálculo de R_a (Eq. 1) são a latitude λ , que depende do local, a declinação δ (Eq. 2), ângulo horário do pôr do Sol (Eq. 3). τ_{day} que é igual a 24×3600 que representa os segundos do dia e I_{ex} é a radiação solar extraterrestre em $W \cdot m^{-2}$, calculada com a (Eq. 4).

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \left(\frac{284 + N}{365} \right) \right] \quad (2)$$

$$\cos(\omega_s) = -Tg(\lambda) \cdot Tg(\delta) \quad (3)$$

$$I_0 = I_o \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360N}{365}\right) \right] \quad (4)$$

I_0 (Eq. 4) representa a constante solar, é utilizado com o valor de $1366,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. N (Eq.2 e 4) é o dia juliano.

Modelo Bristow & Campbell (BC) (1984)

O modelo Bristow & Campbell estima o valor de R_g por meio da Eq. (5).

$$R_g = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^c)) \cdot R_a \quad (5)$$

em que, R_g representa a radiação solar diária obtida pela equação de Bristow & Campbell ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); a é o coeficiente de transmissão atmosférica do céu claro adimensional, b e c são coeficientes diários da variação de temperatura do ar, sendo $a = 0,7$ e $b = 0,010$ e $c = 2,4$ (recomendados pelos autores). R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) que é obtido através das equações (1).

Modelo Hunt *et al.* (HU) (1998)

O modelo Hunt *et al.* estima o valor de R_g por meio da Eq. (6).

$$R_g = a \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} \cdot R_a + b \quad (6)$$

Onde: a é o coeficiente de adaptação definido para o interior ou regiões litorâneas, 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. R_a = radiação solar incidente extraterrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

Modelo de Chen *et al.* (CH) (2004)

O modelo Chen *et al.* estima o valor de R_g por meio da Eq. (7).

$$R_g = (a \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} + b) \cdot R_a \quad (7)$$

em que, R_g é a representa a radiação solar obtida pela equação de Hargreaves ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); a e b são os coeficientes de adaptação definidos respectivamente 0,384 e -0,369 (Auler & Minuzzi, 2020). e, R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) que é obtido através das equações (1).

Modelo de Li *et al.* (LI) (2004)

O modelo Li *et al.* estima o valor de R_g por meio da Eq. (8).

$$R_g = (a^1 + a^2 \cdot T_{\text{máx}} + a^3 \cdot T_{\text{mín}}) \cdot R_a \quad (8)$$

Os autores desenvolveram este modelo para estimativas diárias de R_g e obtiveram resultados um pouco melhores do que o modelo de Hargreaves que foi o primeiro modelo criado, sendo, a_1 , a_2 e a_3 os coeficientes de adaptação definidos utilizando método de regressão para chegar nos melhores coeficientes, R_a - radiação solar no topo da atmosfera ($MJ.m^{-2}d^{-1}$) que é obtido através das equações (1).

Para verificar a correlação e medir o desempenho entre os resultados da Radiação Solar Global observada e estimada pelos modelos, foram realizadas análises de regressão linear através do coeficiente de determinação (R^2) e da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), que podem ser obtidos através das (Eq. 9) e (Eq. 10)

$$R^2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ro - Re)^2}{\sum_{i=1}^n (Ro - Rem)^2}} \quad (9)$$

Onde, Ro – Radiação solar global observada ($MJ.m^{-2}d^{-1}$), Re – Radiação solar global estimada ($MJ.m^{-2}d^{-1}$), Rem – Média da radiação solar global estimada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ro - Re)^2}{n}} \quad (10)$$

Para obter o RMSE em termos percentuais, o valor do RMSE é dividido pela média dos valores reais Rom (média dos valores Ro) e multiplicado por 100. Isso converte o RMSE para uma forma percentual, facilitando a interpretação da precisão do modelo em termos relativos.

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{Rom} \times 100 \quad (11)$$

O RMSE em porcentagem indica o erro médio do modelo em relação ao valor médio dos dados. Por exemplo, um RMSE de 10% significa que, em média, as previsões do modelo estão 10% distantes dos valores reais.

3 METODOLOGIA

Para este plano de trabalho foi aplicada uma metodologia basicamente teórica. Esta por sua vez, baseada nos dados de previsão de temperatura, foi responsável por nortear condutas positivas de pesquisas.

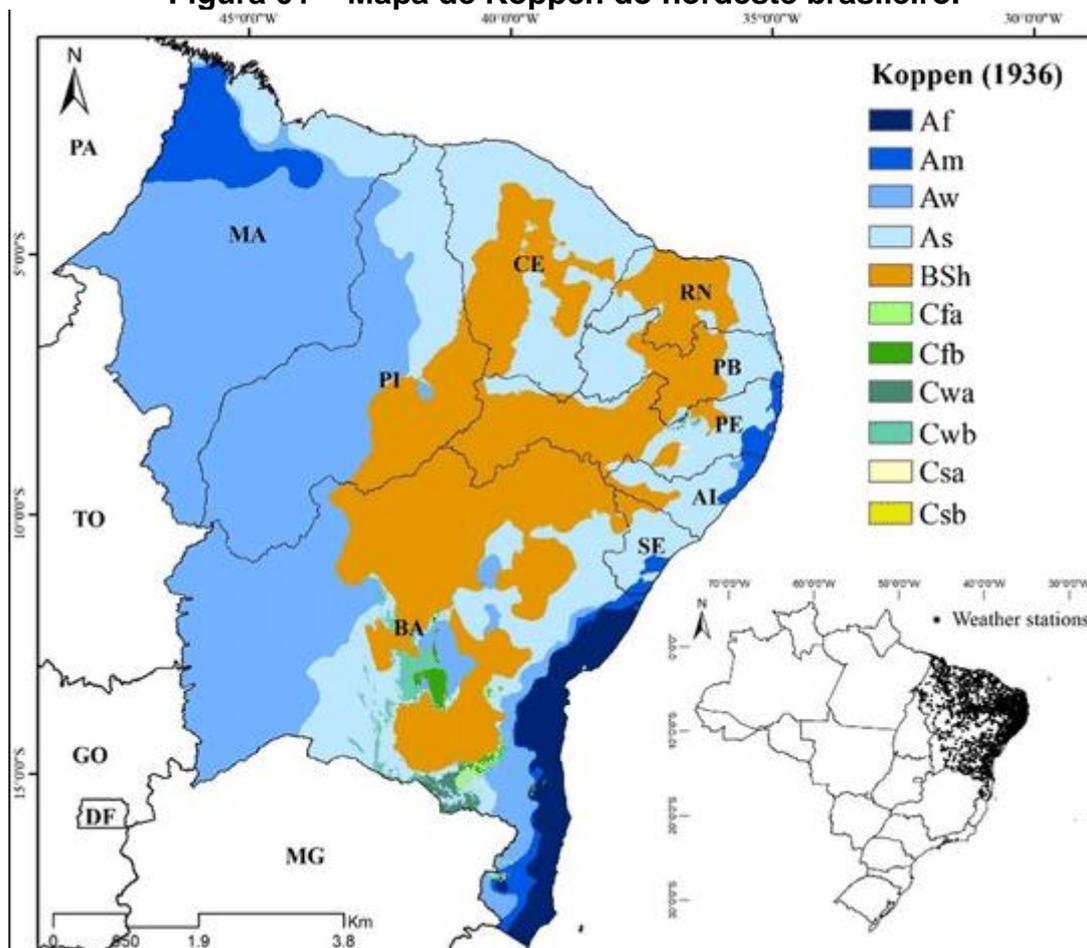
Em primeiro plano foram definidas as áreas de interesse, restringindo-se à duas cidades do Nordeste, Maceió – AL e João Pessoa – PB. foi realizada uma busca pela identificação dessas áreas para a verificação se era possível obter os dados reais de radiação medido, como essas duas capitais possuem sistemas de medição de radiação horarias com sistema do INMET, elas foram selecionadas.

Tabela 02 – Informações das localidades

Município	Latitude	Longitude	altitude (m)
Maceio - AL	9,66° Sul	35,73° Oeste	7
João Pessoa - PB	7,11° Sul	34,86° Oeste	43

Fonte: o autor.

No trabalho, foram utilizados dados horários de 8 de abril de 2023 a 31 de maio de 2024 de radiação solar global (Rg) e temperatura do ar obtidos das estações meteorológicas pertencentes ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) nas localidades mencionadas na Tabela 2. O clima das duas cidades, conforme a classificação climática de Köppen, são Am, ou seja, clima tropical, megatérmico, com temperatura média de 18°C no mês mais frio e média de precipitação pluvial anual superior a 700 mm, sendo a precipitação maior que a evapotranspiração (Almeida et al., 2016). Os dados foram inicialmente transformados em intervalos diários, com a obtenção de valores máximos (tmax) e mínimos (tmín) de temperatura do ar.

Figura 01 – Mapa de Köppen do nordeste brasileiro.

Fonte: Koppenbrasil

A segunda fase consistiu na coleta e organização dos dados. Esse processo incluiu conhecer o site do INMET, sendo que a coleta dos dados de um dia e dos dois

dias seguintes foi feita diariamente, uma vez que os dados de previsões não ficavam salvos no site. Os dados medidos de temperatura e radiação foram coletados ao final da coleta dos dados futuros, já que esses sim ficam salvos no site do INMET. Após a obtenção dos dados, foi feita a identificação dos mesmos e a análise de possíveis faltas de dados ou problemas na medição para garantir sua utilização. Em seguida, os dados foram organizados com o intuito de facilitar seu uso nos testes com os modelos.

Figura 02 – Layout site INMET, onde foram coletados os dados de previsão.

Maceió, AL - 18/03/2025 - Terça-Feira



Maceió, AL - 19/03/2025 - Quarta-Feira



Fonte: INMET.

Tabela 03 – Organização de dados para utilização nos modelos.

		JOÃO PESSOA-PB						
		PREVISÃO TEMPERATURA				TEMPERATURA MEDIDA		Radiação
		Prev - 2 dias		Prev - 1 dia				
DATA	DIA JULIANO	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MJ/m ²
08/04/2023	98	27	24	31	24	31,8	24,7	17,5976
09/04/2023	99	29	23	31	24	32,4	23,6	15,7133
10/04/2023	100	31	24	32	24	31,5	24	17,6740
11/04/2023	101	32	23	31	24	32,2	24,1	20,2154
12/04/2023	102	31	23	31	24	31,7	23,3	16,6543
13/04/2023	103	30	24	30	23	31,4	25,1	19,6673
14/04/2023	104	31	24	31	24	31,3	23,4	14,6157
15/04/2023	105	31	24	31	24	31,3	23,9	14,5116
16/04/2023	106	30	23	30	23	29,6	23,1	11,0485
17/04/2023	107	31	24	31	24	31,7	22,9	20,8561
18/04/2023	108	32	25	32	25	32	24,4	19,9320
19/04/2023	109	32	25	32	24	31,7	24,2	22,9362
20/04/2023	110	32	24	31	24	31,8	25,1	22,2631
21/04/2023	111	32	26	32	25	31,5	24,1	20,3889
22/04/2023	112	32	25	31	25	32,1	25,9	22,1405
23/04/2023	113	30	25	30	24	32,2	25,3	20,2529
24/04/2023	114	30	24	31	24	31,8	24,1	16,2995
25/04/2023	115	31	24	30	25	30,2	23,5	9,9449
26/04/2023	116	30	25	30	24	31,3	24	15,7467
27/04/2023	117	31	24	31	24	31,2	23,5	21,4947
28/04/2023	118	31	24	31	25	32,3	24,8	20,1833
29/04/2023	119	31	25	31	25	32,5	24,2	20,2746

Fonte: Autor

Simultaneamente, também foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os modelos de correlação entre variáveis climáticas e radiação solar. Nessa fase, foi feito um levantamento para avaliar as condições de aplicação dos modelos, possibilitando a definição prévia das variáveis a serem utilizadas.

Foram selecionados 4 modelos que obtiveram resultados satisfatórios em ambientes semelhantes aos de Maceió – AL e João Pessoa – PB, com o objetivo de otimizar o uso dos coeficientes de adaptação já utilizados em estudos anteriores. Os modelos selecionados, dentre aproximadamente 20 modelos estudados, foram os de Bristow & Campbell (BC), Chen *et al.* (CH), Hunt *et al.* (HU) e Li *et al.* (LI). Com isso, iniciaram-se os testes utilizando os dados medidos para avaliar os modelos nas cidades selecionadas.

Com os ajustes feitos, os testes começaram primeiramente utilizando os dados reais, com os valores medidos pelo INMET. Em seguida, foram realizados cálculos utilizando as previsões de temperatura do dia seguinte que foram coletados diariamente através do site do INMET. Por fim, foram feitos os cálculos com as previsões de temperatura para dois dias a frente. Com os resultados em mãos, foi realizada a avaliação dos modelos por meio de parâmetros de desempenho e, também, pela comparação com outros estudos, a fim de verificar se é possível obter resultados satisfatórios utilizando os dados de temperatura futura.

Para verificar a correlação e avaliar o desempenho entre os resultados da irradiação solar global observada e estimada pelos modelos, foram realizadas análises de regressão linear através do coeficiente de determinação (R^2), dada pela equação (7). Quanto mais próximo de 1 o, R^2 , melhor o ajuste da previsão. Para avaliar o desempenho dos modelos utilizou-se a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) dado

pela equação (8), sendo que igual a 0 indica uma estimativa perfeita do modelo e são considerados bons resultados até 10%.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Inicialmente, a ideia do trabalho era utilizar os modelos que haviam obtido bons resultados em estudos anteriores, para podermos testar os modelos matemáticos com as previsões de temperaturas futuras, sem precisar realizar a modelagem dos coeficientes de adaptação. No entanto, mesmo com a utilização dos melhores modelos, que haviam obtido resultados satisfatórios em ambientes semelhantes aos das cidades selecionadas, os primeiros resultados dos testes utilizando os coeficientes de adaptação de outros locais foi possível observar que os coeficientes pré-selecionados, principalmente nos dados da cidade de João Pessoa – PB, não conseguiam produzir valores razoáveis, e os resultados não estavam dentro do esperado. Assim, foi preciso ajustar esses coeficientes para a utilização dos modelos. Com isso, foi necessário o uso de modelos de regressão linear para o ajuste desses coeficientes, a fim de possibilitar o teste dos modelos com melhor desempenho. A Tabela 4, mostra os coeficientes já ajustados.

Tabela 04 – Coeficientes de adaptação dos modelos.

Maceió - AL			
BRISTOW & CAMPEBEL	Chen at el.	Li at el.	Hunt at el.
a = 0,9506266	a = 0,27834067	a = -0,155861	a = 0,279345
b = 0,0749558	b = -0,2645960	b = 0,0541817	b = -9,93458
c = 1,1396988		c = -0,0437106	
João Pessoa - PB			
BRISTOW & CAMPEBEL	Chen at el.	Li at el.	Hunt at el.
a = 0,57844	a = 0,265312	a = -0,62698	a = 0,2652934
b = 0,017228	b = -0,17225	b = 0,065646	b = -6,123958
c = 2,650575		c = -0,03665	

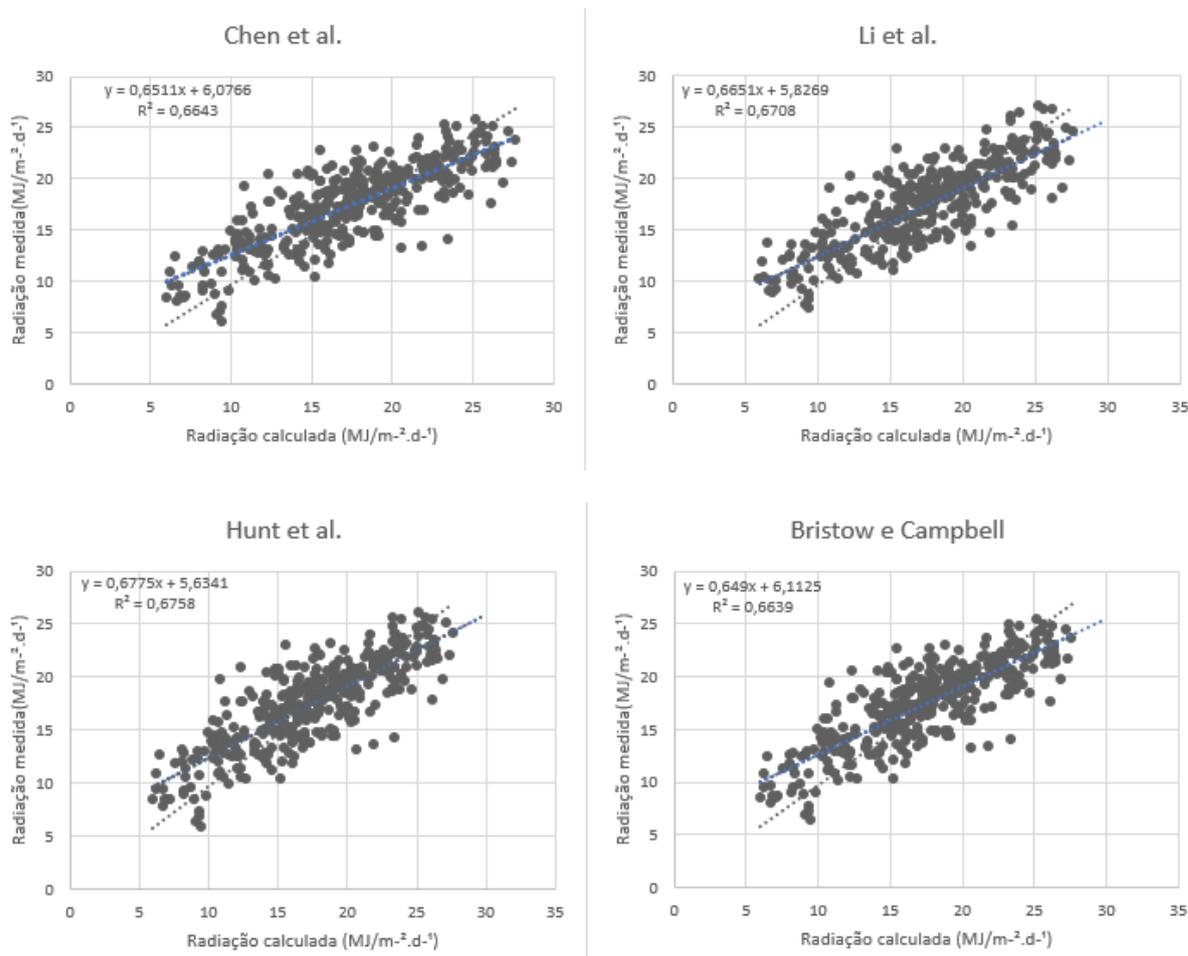
Fonte: o autor.

Com os coeficientes ajustados, os testes dos quatro modelos foram refeitos para as duas cidades. Os resultados foram significativamente melhores que os primeiros testes, que utilizaram os coeficientes pré-definidos dos modelos. O modelo de regressão linear (LI) obteve o melhor desempenho, embora os outros modelos também não apresentassem resultados muito diferentes. Todos tiveram desempenhos bem próximos, sendo que a maior diferença no teste de R^2 , do pior modelo para o melhor, foi de 0,0111 para a cidade de Maceió e 0,086 para a cidade de João Pessoa. Consequentemente, nos indicadores de RMSE, o modelo de regressão linear (LI) também obteve o melhor desempenho, com uma diferença de 0,8% do melhor modelo para o pior na cidade de Maceió - AL e 1,6% na cidade de João Pessoa.

O comportamento diário dos valores de radiação observada, medida pelas estações do INMET, em relação aos valores estimados pelos modelos (CH), (LI), (HU) e (BC) são mostrados nos gráficos da Figura 03.

Dados cidade de Maceio – AL:

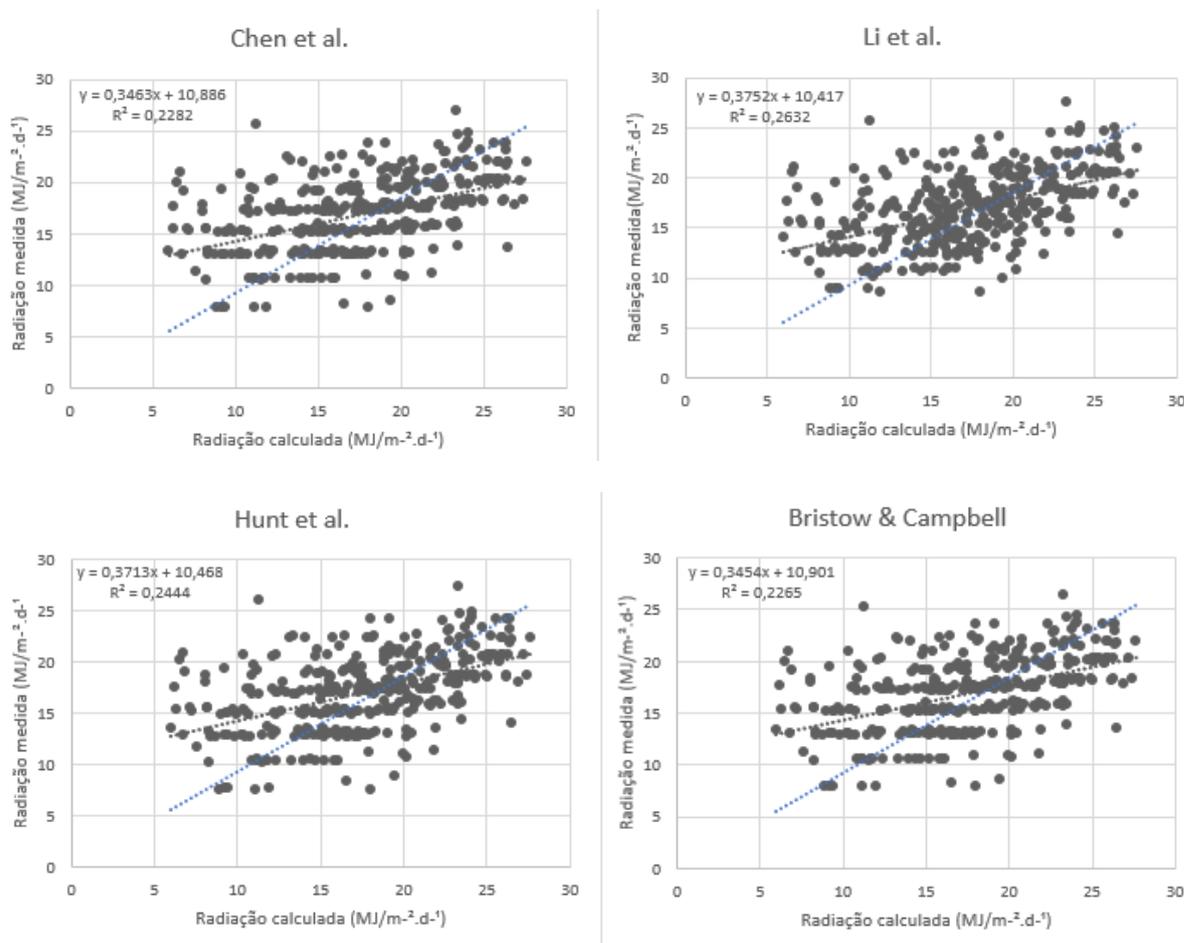
Figura 03 – Comparação da radiação medida e calculada para Maceió – AL, com os valores medidos do dia.



Fonte: Autor.

Nota-se ao observar o gráfico da cidade de Maceió - AL que os modelos testados apresentam valores do coeficiente de determinação (R^2) aproximadamente de 0,66 em média na estimativa da radiação solar, em comparação aos dados reais. Esses resultados, em comparação a outros estudos, foram próximos variando entre 0,6 e 0,8 portanto, os resultados são satisfatórios. Devido ao fato de serem dados gerais e não haver discrepância entre dias nublados, parcialmente nublados ou céu claro, já era esperado que os resultados apresentassem essa variação, pois cada coeficiente de adaptação sofre uma variação diferente para cada tipo de condição de céu, o que impacta seu desempenho.

Figura 04 – Comparação da radiação medida e calculada para Maceió – AL, utilizando previsões de 1 dia.

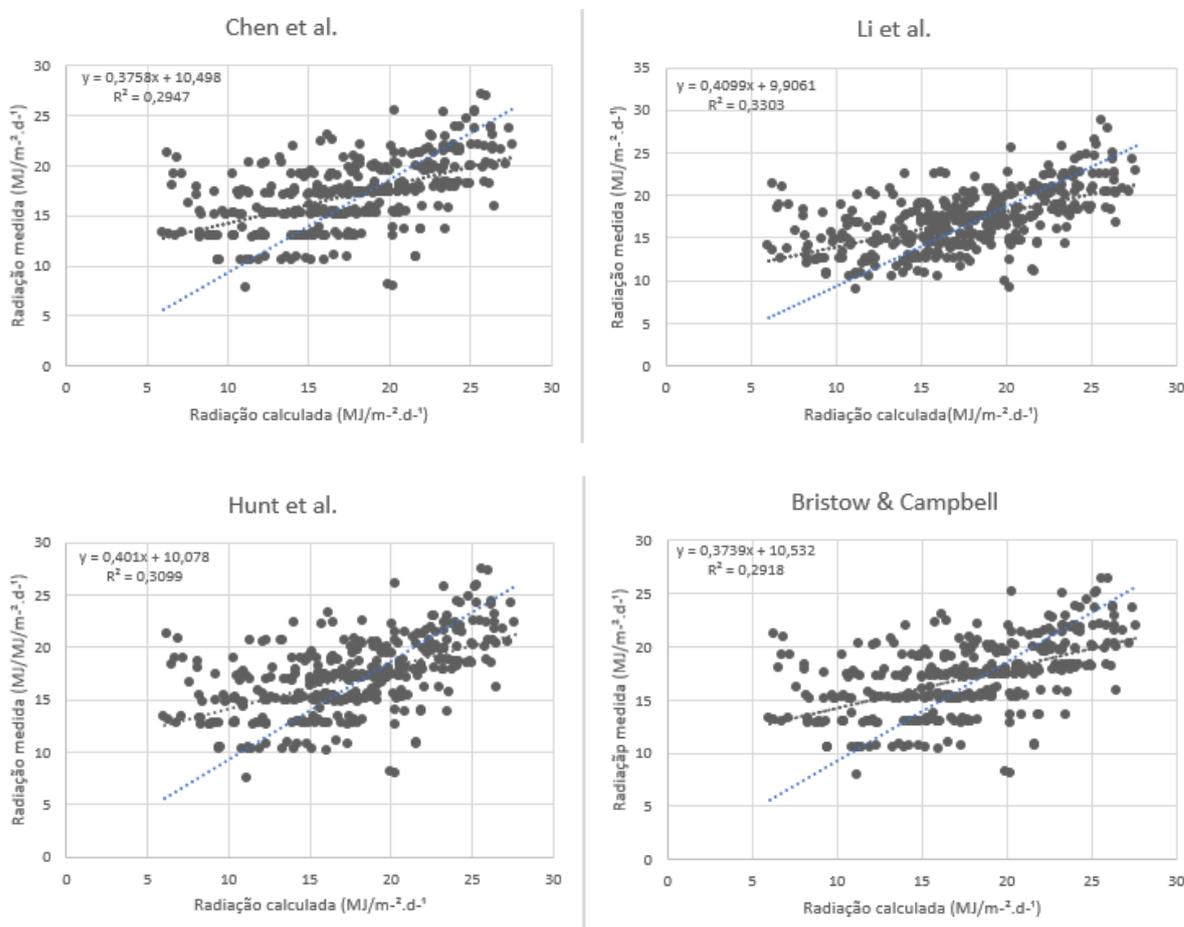


Fonte: Autor.

Os resultados obtidos utilizando os dados de previsão de temperatura para o dia seguinte têm um coeficiente de determinação (R^2) muito menor do que o valor real, com uma média de 0,23. Isso já era esperado, pois os dados de temperatura variam de um dia para outro, e, portanto, não será sempre que a previsão coincidirá com o valor real de temperatura do dia, como podemos observar na Figura 04.

Dos quatro modelos para a região de Maceió – AL, o modelo que mais se adequou ao clima da região foi o de Li *et al.* (Li), que obteve um R^2 de 0,2632.

Figura 05 – Comparação da radiação medida e calculada para Maceió – AL, utilizando previsões de 2 dias.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos utilizando os dados de previsão de temperatura para dois dias futuros mostraram uma melhora no coeficiente de determinação, que chegou a 0,30 em média. Portanto, o modelo obteve uma melhora em relação às temperaturas do dia seguinte, como mostra a Figura 05.

Como podemos observar no gráfico, sua dispersão é um pouco melhor do que a do dia seguinte. O modelo de Li *et al.* também teve o melhor desempenho para o R², com cerca de 0,33, e os outros modelos apresentaram resultados do coeficiente de determinação bem próximos.

Tabela 05 – Valores de RMSE calculados para Maceió – AL, nas três situações.

	Maceió - AL			
	BRISTOW & CAMPEBEL	CHEN ET AL.	LI ET AL.	HUNT ET AL.
	VALORES REAIS			
RMSE (MJ/m ²)	2,86	2,86	2,83	2,8
RMSE (%)	16,45	16,44	16,27	16,14
	PREVISÃO 1 DIA			
RMSE (MJ/m ²)	4,54	4,53	4,39	4,5
RMSE(%)	26,12	26,07	25,29	25,88
	PREVISÃO 2 DIAS			
RMSE (MJ/m ²)	4,24	4,22	4,11	4,19
RMSE (%)	24,37	24,31	23,66	24,12

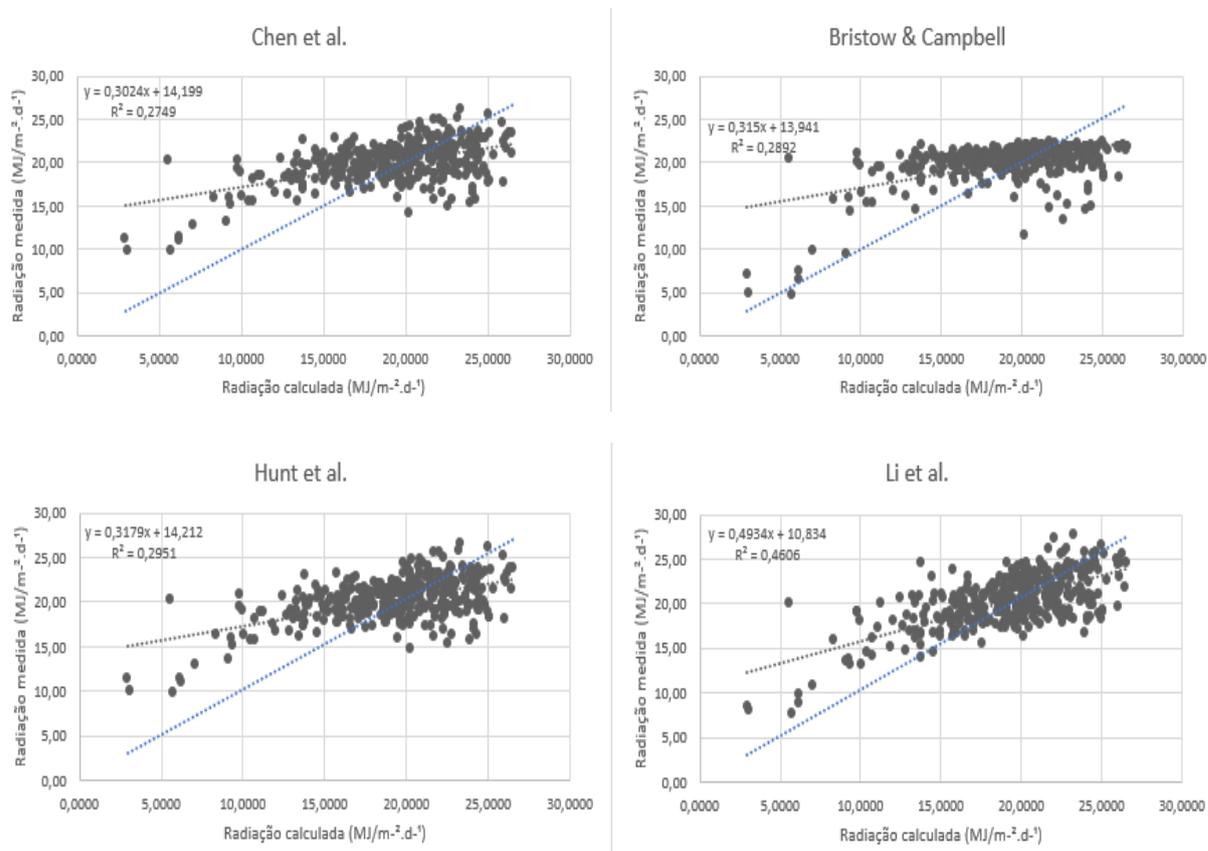
Fonte: Autor.

Os valores da raiz do erro quadrado médio (RMSE) são bons indicadores para um estudo utilizando dados gerais, sem analisar dias específicos. De acordo com os relatórios estudados, os valores estão adequados aos padrões esperados (Huawei Sun, 2015), como mostra a Tabela 05.

Os valores do RMSE variam em torno de 26% para os dados da previsão do dia seguinte e 24% para dois dias futuros. Isso significa que a variação do erro dos modelos testados chega a ser cerca de $\frac{1}{4}$ do valor real, o que é uma variação considerável. Portanto, uma possível forma de melhorar esses resultados seria utilizar o método de separar os dados por tipo de céu (claro, nublado e parcialmente nublado) para uma melhor avaliação dos valores.

Dados de João Pessoa – PB:

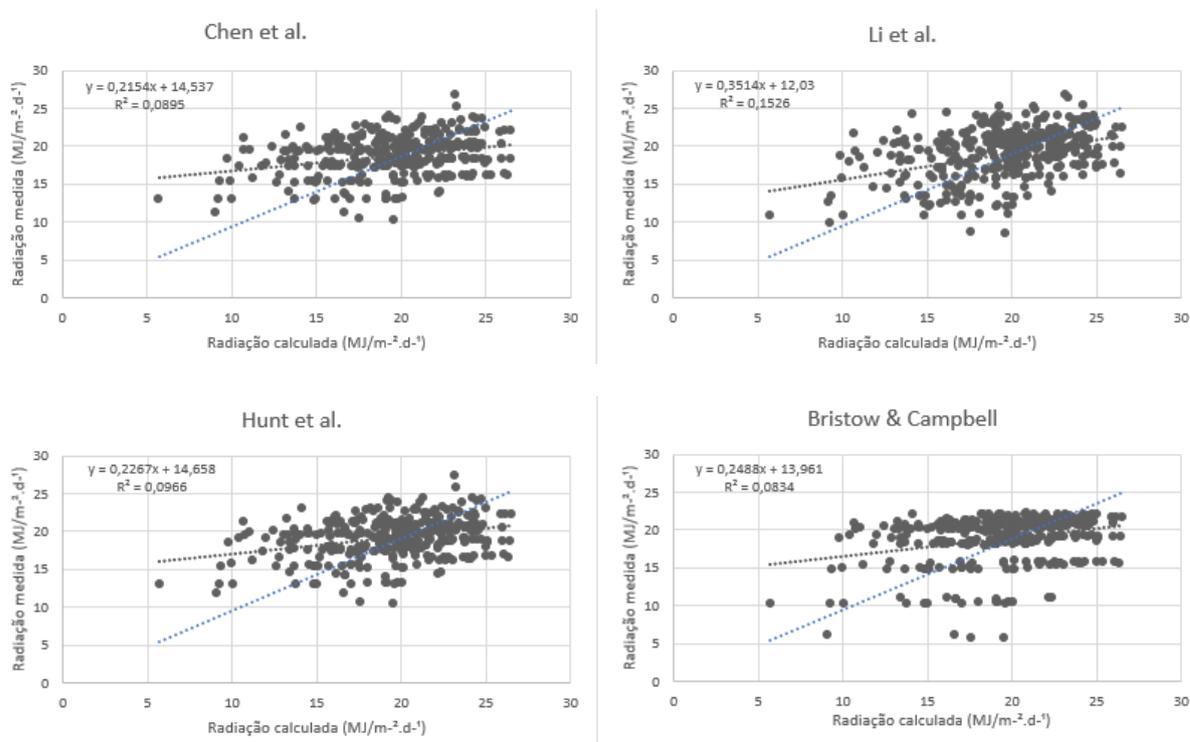
Figura 06 – Comparação da radiação medida e calculada para João Pessoa – PB, com os valores medidos do dia



Fonte: Autor.

Para os dados de João Pessoa – PB, os resultados utilizando os dados de temperatura para dimensionar o R_g não foram muito eficientes. Apesar de ter sido utilizado o método de regressão para o ajuste dos coeficientes para a região, os resultados com dados reais, os valores de R^2 calculados, ficaram entre 0,28 e 0,46, o que representa uma variação considerável entre os modelos, já que os valores esperados eram entorno de 0,6. Isso mostra que possivelmente devido à variação de temperatura da cidade e à questão da precipitação, que não se adequam a nenhum dos modelos utilizados. Além disso, problemas nos dados medidos, como interferência, sujeira, defeitos no medidor, entre outros, podem ter influenciado os resultados. Mesmo com o ajuste dos coeficientes, não obtivemos bons resultados.

Figura 07 – Comparação da radiação medida e calculada para João Pessoa – PB, utilizando previsões de 1 dia.

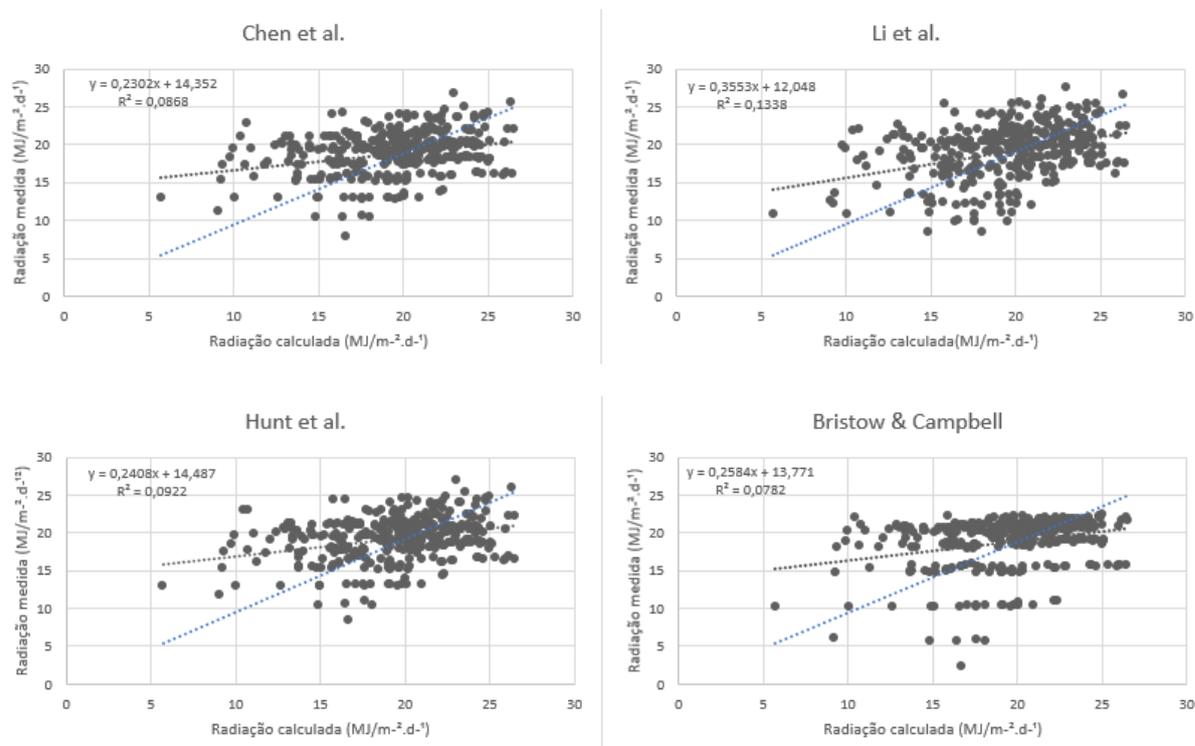


Fonte: Autor.

Os resultados obtidos utilizando os dados de previsão de temperatura para o dia seguinte na cidade de João Pessoa – PB foram muito baixos.

Pelo gráfico, podemos notar que o melhor resultado foi o modelo de Li *et al.*, porém, o coeficiente de determinação (R^2) ficou em apenas 0,15, o que é um valor muito ruim. Isso indica que os modelos não são adequados para a correlação entre temperatura e radiação neste ambiente, pelo menos não sem a separação dos dias. Possivelmente, se os dados fossem separados em "céu claro", "parcialmente nublado" e "nublado", e se adaptássemos coeficientes específicos para cada situação, os resultados poderiam melhorar.

Figura 08 – Comparação da radiação medida e calculada para João Pessoa – PB, utilizando previsões de 2 dias.



Fonte: Autor.

Assim como no resultado utilizando os dados do dia seguinte, os resultados para dois dias futuros foram piores do que os anteriores. O melhor resultado continuou sendo o modelo de Li *et al.*, porém, seu baixo valor de R² implica que o modelo não se adequa para o cálculo da radiação neste clima.

Tabela 06 – Valores de RMSE calculados para João Pessoa – PB, nas três situações.

	João Pessoa - PB			
	BRISTOW & CAMPEBEL	CHEN ET AL.	LI ET AL.	HUNT ET AL.
	VALORES REAIS			
RMSE (MJ/m ²)	3,4109	3,3721	3,0462	3,4233
R ²	0,3654402	0,317733	0,4036707	0,367562
	PREVISÃO 1 DIA			
RMSE (MJ/m ²)	4,0852	3,8412	3,8459	3,7721
RMSE(%)	21,39	20,11	20,14	19,75
	PREVISÃO 2 DIAS			
RMSE (MJ/m ²)	4,2305	3,9263	4,0418	3,879
RMSE (%)	22,15	20,56	21,16	20,31

Fonte: Autor.

Os valores do RMSE para a cidade de João Pessoa – PB estão aproximadamente em 20% para os dados da previsão do dia seguinte e 21% para dois dias futuros. Esses valores são melhores do que os de Maceió – AL, mas como o R² foi pior, isso indica que o modelo não consegue explicar a variação dos dados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS/ CONCLUSÕES

O presente estudo buscou analisar a correlação entre os modelos matemáticos de temperatura e radiação solar para observar como os modelos se comportariam com dados de previsões de temperatura futuras. Como podemos observar no texto, os modelos apresentaram o comportamento já esperado, com uma eficiência menor do que a dos dados reais. No entanto, como foi uma pesquisa inovadora, já que não existem outras pesquisas utilizando modelos de correlação que usam dados futuros de temperatura, os resultados foram comparados com estudos utilizando dados reais, sendo assim, sua diferença de resultado foi muito distante do valor real. Contudo, os resultados apresentaram cerca de 1/3 dos valores de R², e o RMSE apresentou uma diferença de 9% no pior caso. Esses resultados podem ser melhorados com alguns ajustes e modificações na pesquisa.

Como sugestão para próximas pesquisas, recomendo separar os dados em "nublado", "parcialmente nublado" e "céu claro". Com essa separação, os modelos terão um desempenho melhor, permitindo uma análise mais detalhada sobre qual modelo se adequa melhor a cada tipo de clima específico.

REFERÊNCIAS

Almorox, J.; Bocco, M.; Willington, E. **Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina**, *Renewable Energy*, v.60, p.382-387, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148113002784>. Acesso em: 22 out. 2024.

Auler, F. R.; Minuzzi, R. B. **Estimativa de radiação solar global diária com base na temperatura do ar para diferentes condições de nebulosidade em Florianópolis**, Santa Catarina. *Journal of environmental analysis and progress*, V.7 p. 26-32, 2022. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/3996>. Acesso em: 20 out. 2024.

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, p.159-166,1984. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192384900170>. Acesso em: 23 ago. 2024.

CHEN, R.S. *et al.* **Validation of five global radiation models with measured daily data in China**. *Energy Conversion and Management*, v.45, n.1759-1769, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040300270X>. Acesso em: 08 out. 2024.

Diniz *et al.* **Avaliação de diferentes métodos de estimativa da radiação solar com base na temperatura do ar para o município de Serra Talhada – PE**, Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Artigo em anais e *proceedings*, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1027186/avaliacao-de-diferentes-metodos-de-estimativa-da-radiacao-solar-com-base-na-temperatura-do-ar-para-o-municipio-de-serra-talhada---pe>. Acesso em: 20 out. 2024.

Filho, M. H. O. P.; Silva, C. F. S. **Aplicabilidade de modelos de correlação da temperatura com a radiação solar para o nordeste brasileiro**, Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/669>. Acesso em: 15 out. 2024.

Fernandes, D. S.; Heinemann, A. B.; Amorim, A. O.; Paz, R. L. F. **Estimativa da Radiação Solar Global com Base em Observações de Temperatura para o**

Estado de Goiás, Revista Brasileira de Meteorologia, v.33 p.558-566, 2018.
Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/CQY7t93br5LkDzbSpCTMgCg/>.
Acesso em: 22 out. 2024.

HUNT, L.A. *et al.* **Estimation of solar radiation for use in crop modeling.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v.91, n.3-4, p.293-300, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192398000550> Acesso em: 12 out. 2024.

Prieto, J. I.; Garcia, D.; Santoro, R. **Comparative Analysis of Accuracy, Simplicity and Generality of Temperature Based Global Solar Radiation Models: Application to the Solar Map of Asturias**, *Sustainability*, V.14, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/11/6749>. Acesso em: 20 out. 2024.

RIVINGTON, M. *et al.* **Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v.132, p.228-243, 2005.
Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192305001577>. Acesso em: 10 nov. 2024.

Riberio, R. M.; Dias, L. A. S.; Berger, P.G.; Dias, D. C. F. S. **Agroenergia na mitigação das mudanças climáticas globais, na segurança energética e na promoção social**, 2011. Viçosa, MG: Suprema, 201p. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/xmlui/handle/123456789/2427>. Acesso em: 20 set. 2024.

Silva, V. J.; Silva, C. R.; Finzi, R. R.; Dias, N. S. **Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais**, *Ciência Rural*, Santa Maria, V.42, p.276-282, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/yb9tzCjRLxnms7zbDrRdqJB/>. Acesso em: 25 out. 2024.

Valente, A. M. C.; Vilhena, M. B.; Estumano, D. C. **Modelos de estimativas de Radiação Solar Global e análise estatística em cidades do estado do Pará – Brasil utilizando dados meteorológicos**, *Conjecturas*, V.22 p.390-407, 2022.
Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357874356_Modelos_de_estimativas_de_Radiacao_Solar_Global_e_analise_estatistica_em_cidades_do_estado_do_Para_-_Brasil_utilizando_dados_meteorologicos. Acesso em: 22 out. 2024.

SPOKAS, K; FORCELLA, F. **Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data**, *Weed Science*, V.54 p.182-189, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/232683283_estimating_hourly_incoming_solar_radiation_from_limited_meteorological_data. Acesso em: 20 out. 2024.