

**Estimativa da radiação solar urbana para a Cidade de Recife-PE***Estimation of urban solar radiation for the City of Recife-PE**Estimación de la radiación solar urbana para la Ciudad de Recife-PE***Willames de Albuquerque Soares**Professor Doutor, UPE, Brasil  
was@poli.br**Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral**Professor Doutor, UPE, Brasil  
jaime.cabral@poli.br**Alexandre Duarte Gusmão**Professor Doutor, UPE, Brasil  
gusmao.alex@poli.br**Maurício Costa Goldfarb**Professor Doutor, UPE, Brasil  
mauricio.goldfarb@upe.br**Irami Buarque do Amazonas**Professor Doutor, UPE, Brasil  
irami.amazonas@upe.br

**RESUMO**

A Radiação Solar Global urbana (RS) é um dos principais insumos da climatologia urbana, e deve já ser considerada desde a concepção do projeto de construção das infraestruturas verdes, que mitiga os impactos ambientais da urbanização. Os objetivos deste trabalho foram calibrar e avaliar o desempenho na estimar da RS, para a capital pernambucana, de seis modelos existentes na literatura, a saber: Hargreaves; Samani (1982), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hunt et al. (1998) e Annandale et al. (2002), referentes a um período chuvoso no ano de 2023, com dados de uma estação meteorológica automática instalada em um dos campi da Universidade de Pernambuco, na cidade de Recife-PE. Utilizou-se como critérios estatísticos para a análise dos dados calculados: a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o coeficiente de Nash-Sulcliffe (NSE) e o coeficiente de massa residual (CMR). Os modelos para a estimativa da RS, listados por ordem crescente de maior eficácia são: Hunt et al. (1998), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hargreaves; Samani (1982), e Annandale et al. (2002). Entretanto, deve-se ressaltar que para a utilização do modelo proposto por Hunt et al. (1998), faz-se necessário os dados de precipitação diária o que pode não ser disponível, principalmente em séries históricas. Caso seja disponível apenas os valores da temperatura, o melhor modelo para de estimar a RS é o proposto por Bristow; Campbell (1984), que apresentou um desempenho satisfatório e muito próximo ao obtido pelo modelo proposto por Hunt et al. (1998).

**PALAVRAS-CHAVE:** Evapotranspiração. Radiação solar. Infraestruturas verdes.

**ABSTRACT**

*Urban Global Solar Radiation (RS) is one of the main inputs of urban climatology, and should already be considered from the conception of the construction project of green infrastructures, which mitigate the environmental impacts of urbanization. The objectives of this work were to calibrate and evaluate the performance in estimating the RS, for the capital of Pernambuco, of six existing models in the literature, namely: Hargreaves; Samani (1982), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hunt et al. (1998) and Annandale et al. (2002), referring to a rainy period in the year 2023, with data from an automatic meteorological station installed in one of the campuses of the University of Pernambuco, in the city of Recife-PE. The statistical criteria used for the analysis of the calculated data: the root mean square error (RMSE), the Nash-Sulcliffe coefficient (NSE) and the residual mass coefficient (CMR). The models, in ascending order of greater effectiveness are: Hunt et al. (1998), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hargreaves; Samani (1982), and Annandale et al. (2002). However, it should be noted that for the use of the model proposed by Hunt et al. (1998), it is necessary to have daily precipitation data, which may not be available, especially in historical series. If only temperature values are available, the best model for estimating RS is the one proposed by Bristow; Campbell (1984), which presented a satisfactory performance and very close to that obtained by the model proposed by Hunt et al. (1998).*

**KEYWORDS:** Evapotranspiration. solar radiation. Green infrastructures.

**RESUMEN**

*La Radiación Solar Global Urbana (RS) es uno de los principales insumos de la climatología urbana, y ya debe ser considerada desde la concepción del proyecto de construcción de infraestructuras verdes, que mitigan los impactos ambientales de la urbanización. Los objetivos de este trabajo fueron calibrar y evaluar el desempeño en la estimación de la RS, para la capital de Pernambuco, de seis modelos existentes en la literatura, a saber: Hargreaves; Samani (1982), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hunt et al. (1998) e Annandale et al. (2002), referente a un período lluvioso en el año 2023, con datos de una estación meteorológica automática instalada en uno de los campus de la Universidad de Pernambuco, en la ciudad de Recife-PE. Los criterios estadísticos utilizados para el análisis de los datos calculados: el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de Nash-Sulcliffe (NSE) y el coeficiente de masa residual (CMR). Los modelos, en orden creciente de mayor efectividad son: Hunt et al. (1998), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hargreaves; Samani (1982) y Annandale et al. (2002). Sin embargo, cabe señalar que para el uso del modelo propuesto por Hunt et al. (1998), es necesario contar con datos de precipitación diarios, que pueden no estar disponibles, especialmente en series históricas. Si solo se dispone de valores de temperatura, el mejor modelo para estimar RS es el propuesto por Bristow; Campbell (1984), que presentó un desempeño satisfactorio y muy cercano al obtenido por el modelo propuesto por Hunt et al. (1998).*

**PALABRAS CLAVE:** Evapotranspiración. radiación solar. Infraestructuras verdes.

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de infraestruturas verdes (IG) mitiga os impactos da urbanização, utilizando os componentes do ciclo hidrológico para reduzir o volume de escoamento. Na maioria das técnicas de IG, como nos jardins de chuva, a infiltração é o mecanismo principal de controle de águas pluviais, enquanto em um telhado verde a água é retida em seu solo e a recuperação da capacidade de infiltração é regulada pela evapotranspiração, que depende significativamente da radiação solar (*RS*).

A *RS* é um dos principais insumos da climatologia urbana, e deve já ser considerada desde a concepção do projeto de construção. Devendo influenciar nas tomadas de decisões quanto à orientação, a altura, a porcentagem de cobertura de vidro aceitáveis e dos requisitos de condicionamento climático dos edifícios. A radiação solar também é um fator importante no conforto térmico dos moradores das cidades. O aquecimento diferencial da cidade e seus arredores além de complexo é parcialmente responsável para a criação da ilha de calor urbana e as células de convecção associadas, com consequências consideráveis para a poluição do ar.

Todo o espectro da *RS* (radiação solar difusa e radiação solar direta) pode ser medido por um radiômetro específico (Piranômetro), encontrado em boa parte das estações meteorológicas modernas. Entretanto, devido aos custos de aquisição e de manutenção destes sensores, sua utilização não é disseminada na maioria das estações meteorológicas, principalmente as governamentais (JAHAN; AKHTAR, 2017).

Assim, alguns pesquisadores desenvolveram métodos empíricos para estimar a *RS* em função de dados mais facilmente disponíveis em estações meteorológicas, como a umidade do ar (YANG; KOIKE, 2002), precipitação (HUNT et al., 1998; LIU; SCOTT, 2001; RIVINGTON et al., 2005), a nebulosidade (DAVIES; MCKAY, 1989; MUNNER; GUL, 2000), a insolação (ANGSTRÖM, 1924; WONG; CHOW, 2001; ALMOROX; HONTORIA, 2004; CHEN et al., 2006) e a amplitude térmica diária (HARGREAVES, 1981; HARGREAVES; SAMANI, 1982; BRISTOW; CAMPBELL, 1984).

Esses modelos foram adequados e/ou modificados por outros pesquisadores, tentando melhorar as estimativas em outras localidades, ao longo do tempo. Entretanto, vale salientar que os modelos empíricos devem ser calibrados localmente, uma vez que as relações empíricas variam espacialmente. Ramos et al. (2018), salienta que apesar da melhora nas estimativas da radiação solar global, após a calibração, estes devem ser otimizados por época do ano, a fim de minimizar possíveis efeitos sazonais de cada região. Os modelos que estimam a *RS* geralmente usam a duração da luz do sol, a temperatura e outras variáveis meteorológicas como o índice de nebulosidade (BESHARAT et al. 2013). No entanto, utilizar todos esses parâmetros simultaneamente complica a correlação empírica, e geralmente, apenas alguns parâmetros são usados em conjunto nos modelos desenvolvidos (GUREL et al, 2023).

Os modelos que estimam *RS* a partir da insolação são mais precisos do que aqueles que a estimam a partir da temperatura do ar e da precipitação, entretanto, dificilmente os dados de insolação são encontrados nas estações meteorológicas de um modo geral (ALMOROX, 2011). Entretanto, dados de insolação não estão presente em muitas das estações meteorológicas existentes no Brasil. Portanto, os métodos propostos geralmente se baseiam na temperatura do ar e na precipitação se destacam e devem ser cada vez mais avaliados como uma alternativa viável, principalmente quando se quer analisar valores urbanos de *RS*.

Embora a *RS* seja bastante estudada em regiões agrícolas, poucas pesquisas a avaliaram nas regiões urbanas ou se desenvolveram modelos apropriados específicos para estes ambientes. Além disso, em diversas cidades brasileiras (Blumenau - SC, Porto Alegre - RS, Guarulhos-SP e João Pessoa-PB, por exemplo), as construções de telhados verdes passaram a ser obrigatória em novas edificações, visando minimizar os alagamentos. Em Recife-PE, essa obrigatoriedade entrou em vigor no ano de 2015 (Lei nº 18.112, 2015, Art. 1), porém, em muitos projetos e estudos ou não consideram a *RS* ou a estimam a partir de equações empíricas que não condizem com a realidade local.

Nesse contexto, ressalta-se a importância de estudos da radiação solar global em áreas urbanas, sendo imprescindível a definição de modelos adequados para sua estimativa que podem diferir daqueles mais adequados a regiões vegetadas.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram calibrar e avaliar o desempenho na estimar a Radiação Solar Global urbana, para a capital pernambucana, de seis modelos existentes na literatura, referentes a um período chuvoso no ano de 2023, com dados de uma estação meteorológica automática instalada em um dos campiis da Universidade de Pernambuco, na Cidade de Recife-PE.

## 3 METODOLOGIA

O estudo foi realizado na Cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, localizada nas coordenadas: latitude 8º 04' 03" S e longitude 34º 55' 00" O, altitude: 4m. A cidade litorânea contempla uma superfície territorial de 218,50 km<sup>2</sup>. Para a realização deste estudo, utilizaram-se dados da temperatura do ar, precipitação e radiação solar no período de 18 de maio 10 de julho de 2023, obtidos por meio de uma estação meteorológica automática da marca Davis, instalada nas dependências da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI). Inicialmente, os dados foram obtidos em intervalos de 10 minutos que posteriormente foram sumarizados em valores diários, obtendo-se valores máximos ( $T_{máx}$ ) e mínimos ( $T_{mín}$ ) de temperatura, total de radiação solar incidente (*RS*) e precipitação pluviométrica (*P*) a cada dia.

Posteriormente, os dados foram submetidos a uma avaliação de consistência com base nos critérios de eliminação propostos por Liu et al. (2009), a saber: a) dados ausentes para qualquer um dos elementos  $T_{máx}$ ,  $T_{mín}$  ou *RS*; b)  $T_{máx} < T_{mín}$ ; c)  $RS/RA > 1$ . A nebulosidade diária, definida pelo índice de claridade ( $I_k$ ), foi determinada pela relação:

$$I_k = RS/RA \quad (1)$$

Sendo *RA* a radiação solar no topo da atmosfera e  $I_k$  classificada conforma a tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da nebulosidade diária

$I_k$	Classificação
$0 \leq I_k < 0,3$	Céu nublado
$0,3 \leq I_k \leq 0,65$	Céu parcialmente nublado
$0,65 < I_k \leq 1$	Céu claro

Fonte: Auler; Minuzzi (2022)

**3.1 Modelos avaliados**

Os modelos analisados para estimar a radiação solar global (*RS*), estão apresentados na tabela 2, foram: Hargreaves; Samani (1982), Bristow; Campbell (1984), Jong; Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hunt et al. (1998) e Annandale et al. (2002). Todos eles utilizam como dados de entrada a radiação solar no topo da atmosfera (*RA*) e a amplitude térmica diária (diferença entre as temperaturas diárias máxima e mínima diária).

O modelo proposto por Hargreaves; Samani (1982), estima a radiação solar global de forma linear. Apresenta um parâmetro de ajuste regional, que depende das condições climáticas locais. Os autores recomendam para regiões litorâneas e continentais os valores, respectivamente, de 0,19 e de 0,16. O modelo proposto por Chen et al. (2004), assim como o de Hargreaves; Samani (1982), se utiliza de uma relação linear, considerando que o coeficiente linear da reta. Assim, o modelo possui dois parâmetros de ajustes.

Bristow; Campbell (1984) propuseram um modelo que estima a *RS* de forma exponencial, utilizando três parâmetros de ajuste regionais ( $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ). Embora sejam empíricos,  $\alpha$  representa a transmissividade máxima esperada para um dia de céu limpo, que depende da altitude e da poluição atmosférica local. Já os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$  controlam a variação de  $\alpha$  em função da amplitude térmica. Para os parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma$ , os autores recomendam os valores, respectivamente, de 0,7 e 2,4. Para o  $\beta$  o valor recomendado é de 0.004 para períodos secos e de 0.01 para períodos úmidos.

Jong; Stewart (1993), propuseram um modelo introduzindo o efeito da precipitação na estimativa de *RS*, de forma multiplicativa. Dispõe de quatro parâmetros de ajuste. Hunt et al. (1998), também apresentaram um modelo considerando a precipitação, entretanto de forma não multiplicativa, possuindo também quatro parâmetros de ajuste.

Tabela 2 – Modelos avaliados para estimar a radiação solar

Abreviação (referencia)	Modelo
RSHS (Hargreaves; Samani 1982)	$RS_{HS} = RA \cdot k_t \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5}$
RSBC (Bristow; Campbell 1984)	$RS = RA \cdot \alpha \cdot (1 - e^{-\beta \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^\gamma})$
RSJS (Jong & Stewart 1993)	$RS = \alpha (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^\beta (1 + \gamma P + \delta P^2) RA$
RSCH (Chen et al., 2004)	$RS = [\alpha (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5} + \beta] RA$
RSHU (Hunt et al., 1998)	$RS = RA \cdot \alpha \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5} + \beta T_{m\acute{a}x} + \gamma P + \delta P^2$
RSAN (Annandale et al. 2002)	$RS = RA \cdot \alpha (1 + 2.7 \cdot 10^5 Alt) (T_{M\acute{a}x} - T_{M\acute{i}n})^{0.5}$

Sendo *RS* e *RA* as radiações solar incidente na superfície e no topo da atmosfera ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ); *Alt* a altitude local (m);  $T_{m\acute{a}x}$  e  $T_{m\acute{i}n}$  as temperaturas máxima e mínima do dia (°C); *P* a presipitação (mm) e  $\alpha, \beta, \gamma$  e  $\delta$  coeficientes de ajustes dos modelos empíricos (adimensionais).

Annandale et al. (2002), propuseram um modelo com um parâmetro de ajuste e introduziram uma correção de *RS* em função da altitude. Eles recomendaram um valor de 0,16 para locais do interior do continente, onde a massa de terra domina e as massas de ar não são fortemente influenciadas por grandes massas de água. Já para locais costeiros, situados na costa

ou adjacentes à costa de uma grande massa de terra e onde as massas de ar são influenciadas por um corpo de água próxima, seu valor recomendado é de 0,19.

### 3.3 Radiação solar diária no topo da atmosfera

A radiação solar diária no topo da atmosfera,  $RA$  ( $\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ ) foi determinada pelas equações abaixo:

$$RA = 24 * \frac{60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\phi) \text{sen}(\theta) + \cos(\phi) \cos(\sigma) \sin(\omega_s)] \quad (2)$$

Sendo  $G_{sc}$  a constante solar ( $0,082 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ),  $J$  o dia do ano,  $d_r$  o inverso da distância relativa Terra-Sol,  $\omega_s$  o ângulo solar horário (rad),  $\phi$  a latitude (rad) e  $\sigma$  a declinação solar (rad), calculados pelas equações de 2 a 4:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (3)$$

$$\sigma = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi J}{365} - 1,39\right) \quad (4)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\cos(-\tan(\phi) \tan(\sigma))} \quad (5)$$

### 3.4 Ajuste e Desempenho dos modelos

Três critérios estatísticos foram utilizados para a análise dos dados calculados: a raiz quadrada do erro médio ( $RMSE$ ), o coeficiente de Nash-Sulcliffe ( $NSE$ ) e o coeficiente de massa residual ( $CMR$ ).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (RS_{obs} - RS_{est})^2}{n}} \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RS_{obs} - RS_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (RS_{obs} - \overline{RS_{obs}})^2} \quad (7)$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^n RS_{obs} - \sum_{i=1}^n RS_{est}}{\sum_{i=1}^n RS_{obs}} \quad (8)$$

Sendo  $\overline{RS_{obs}}$  a média dos valores observados de  $RS$ ,  $n$  a quantidade de valores observados,  $RS_{obs}$  e  $RS_{est}$  os valores observados e estimados de  $RS$ , respectivamente.

A  $RMSE$  variar entre 0 e o infinito ( $\infty$ ), sendo que, quanto menor, melhor a estimativa da  $RS$ . O  $NSE$  varia de  $-\infty$  a 1 e quanto mais próximo de 1 mais precisos são os resultados. Valores entre 0 e 1 geralmente são vistos como níveis de desempenho aceitáveis e valores inferiores a 0,0, indicam que é melhor utilizar a média dos dados observados que o valor predito pelo modelo. Os valores do  $NSE$ , acima de 0,0, podem ser interpretados conforme a tabela 3. (Nash; Sutcliffe, 1970). O CRM indica se o modelo superestimou ( $CRM < 0$ ) ou se subestimou ( $CRM > 0$ ) os valores observados.

Tabela 3 – Classificação dos valores de *NSE*

<i>NSE</i>	Classificação
$NSE < 0,5$	Insatisfatório
$0,5 \leq NSE < 0,65$	Satisfatório
$0,65 \leq NSE < 0,75$	Bom
$0,75 \leq NSE \leq 1$	Muito bom

Fonte: Lin et al. (2017), Boldrin et al., (2022).

#### 4 RESULTADOS

A *RS* média para o período estudado foi de  $12,10 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ . Como esperado, este valor é inferior à média anual encontrada para Recife por Ramos et al. (2018), entre os anos de 1999 e 2012, que foi de  $22,18 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$  ao avaliar a *RS* para 32 cidades brasileiras. Esta inferioridade se deu pelo estudo considera apenas o período chuvoso para a localidade. Em que em apenas um dia não ocorreram chuvas.

No período avaliado neste estudo, não houve nenhum dia de céu claro ( $I_k > 0,65$ ). Em 75,5% dos dias, o céu ficou parcialmente nublado ( $0,3 \leq I_k \leq 0,65$ ), e em 24,4% dos dias o céu foi classificado como nublado ( $0 \leq I_k < 0,3$ ). Na tabela 4 podemos ver os valores das medidas de posição e de dispersão da precipitação diária para Recife nos dias de céu nublado e parcialmente nublado. As chuvas foram bem mais constantes nos dias de céu nublado, apresentado um valor médio de quase 60 mm. Valor bem superior à média das chuvas nos dias de céu parcialmente nublado (8,90 mm). Inesperadamente, em um dia de céu parcialmente nublado houve uma precipitação acima de 60 mm.

Tabela 4 - Medidas de posição e de dispersão da precipitação diária para Recife, no período em estudo.

	Precipitação diária	
	Céu parcialmente nublado	Céu nublado
Mínimo	0,00 mm	3,80 mm
Máximo	61,80 mm	122,80 mm
Média	8,90 mm	58,67 mm
1º quartil	0,60 mm	25,20 mm
Mediana	2,60 mm	74,80 mm
3º quartil	13,05 mm	82,30 mm

A tabela 5 apresenta os coeficientes ajustados dos modelos analisados para a cidade de Recife-PE. Após os ajustes, os modelos apresentaram bons valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), com resultados entre 0,62 e 0,71. Assim, pode-se afirmar que esses modelos apresentam uma eficiência acima de 62% na estimativa da radiação solar. Neste estudo, os ajustes dos modelos foram realizados pelo método de quadrados mínimos.

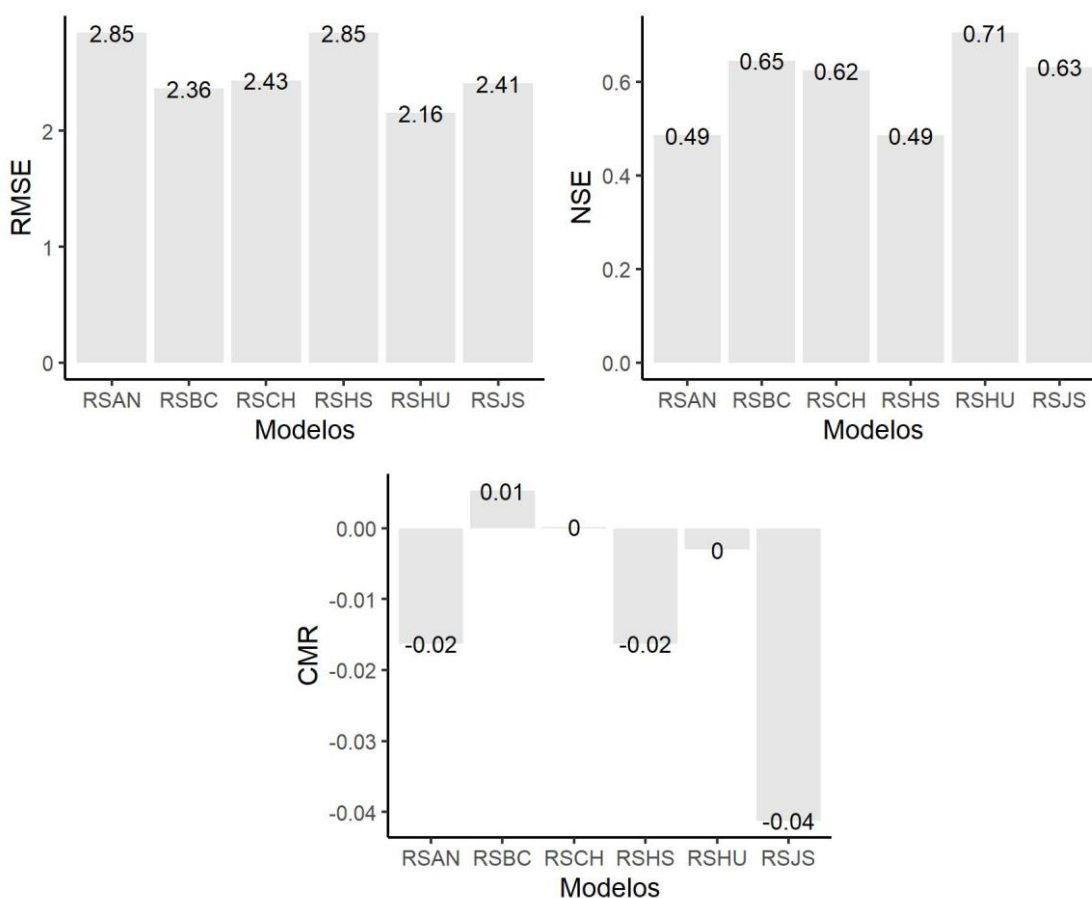
Os modelos que apresentaram melhores  $R^2$  foram, por ordem: RSHU, RSJS, RSBC, RSCH, SAAN e RSHS. Resultados semelhantes foram encontrados por Boscaini et al. (2019), para o município de Santa Maria – RS, que calibraram e avaliaram o desempenho de dez diferentes modelos de estimativa da *RS* em escala diária, a partir de dados de temperatura do ar, para o município de Santa Maria – RS, para fins de irrigação. Eles utilizaram dados de uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Eles concluíram que os modelos em geral, após calibração dos seus coeficientes, são de uso recomendados, quando não houver disponibilidade de dados de *RS* observados localmente.

Tabela 5 – Parâmetros empíricos e coeficientes de determinação dos modelos analisados, após a otimização.

Modelo	Parâmetros de ajuste				R <sup>2</sup>
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	
RSHS	0.16767				0.62
RSBC	0.58819	0.02114	2.24156		0.65
RSJS	0.17600	0.51000	-0.00100	-0.00002	0.69
RSCH	0.31770	0.37367			0.62
RSHU	0.15229	-0.07546	-0.09224	0.00034	0.71
RSAN	0.16769				0.62

A partir dos valores da Raiz quadrada raiz quadrada do erro médio (RMSE) e do coeficiente de Nash-Sulcliffe (NSE), podemos classificar os modelos avaliados para a Cidade de Recife-PE, e a partir do coeficiente de massa residual (CMR), podemos saber quais modelos subestimam e superestimaram os valores observados da *RS* (Figura 1). Globalmente, todos os modelos apresentaram resultados adequados e com exceção do modelo RSAN, todos apresentaram desempenho melhor que modelo RSHS, que representa a estimativa mais antiga. Esses resultados corroboram com a análise gráfica preliminar. Para todos eles, os valores de RMSE ficaram entre 2 MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> e 3 MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, e os valores de NSE ficaram entre 0,49 e 0,71. Quatro modelos superestimaram e dois subestimaram os valores observados de *RS*.

Figura 1 – Raiz quadrada raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de Nash-Sulcliffe (NSE) e coeficiente de massa residual (CMR), dos modelos ajustados para a Cidade de Recife-PE.



Em primeiro lugar temos o modelo RSHU, que apresentou o menor valor de RMSE (2.16 MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>) e um valor de NSE (0,71), mais próximo de 1, dentre os modelos analisados e sendo



classificado como bom. Vale ressaltar que este modelo, utiliza os valores de precipitação diária para estimar a *RS*. Este modelo apresentou uma discreta superestimativa, com relação aos valores observados da radiação solar global ( $CMR = -0.00272$ ).

O segundo lugar ficou com o modelo RSBC, que obteve um RSME de  $2,36 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$  e um NSE de 0,65 obtendo assim um resultado satisfatório. Este modelo estima a *RS* apenas em função da amplitude térmica e de forma exponencial e utiliza três parâmetros de ajuste regionais. Houve uma pequena subestimativa dos valores de *RS* por esse modelo ( $CMR = 0.00801$ ).

A terceira posição coube ao modelo RSJS, que assim como o modelo RSHU, considera os valores de precipitação em seus cálculos, entretanto de forma multiplicativa. Os valores de RMSE e de NSE foram, respectivamente, de  $2,41 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$  e de 0,63 sendo considerado satisfatório. Houve uma pequena superestimativa dos valores de *RS* pelo modelo RSJS ( $CMR = -0.03899$ ). O quarto colocado foi o modelo RSCH, que obteve um RSME  $2,43 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$  e um NSE de 0,62. Este modelo apresentou uma discreta subestimativa quando comparado aos valores observados da radiação solar global ( $CMR = 0.00023$ ).

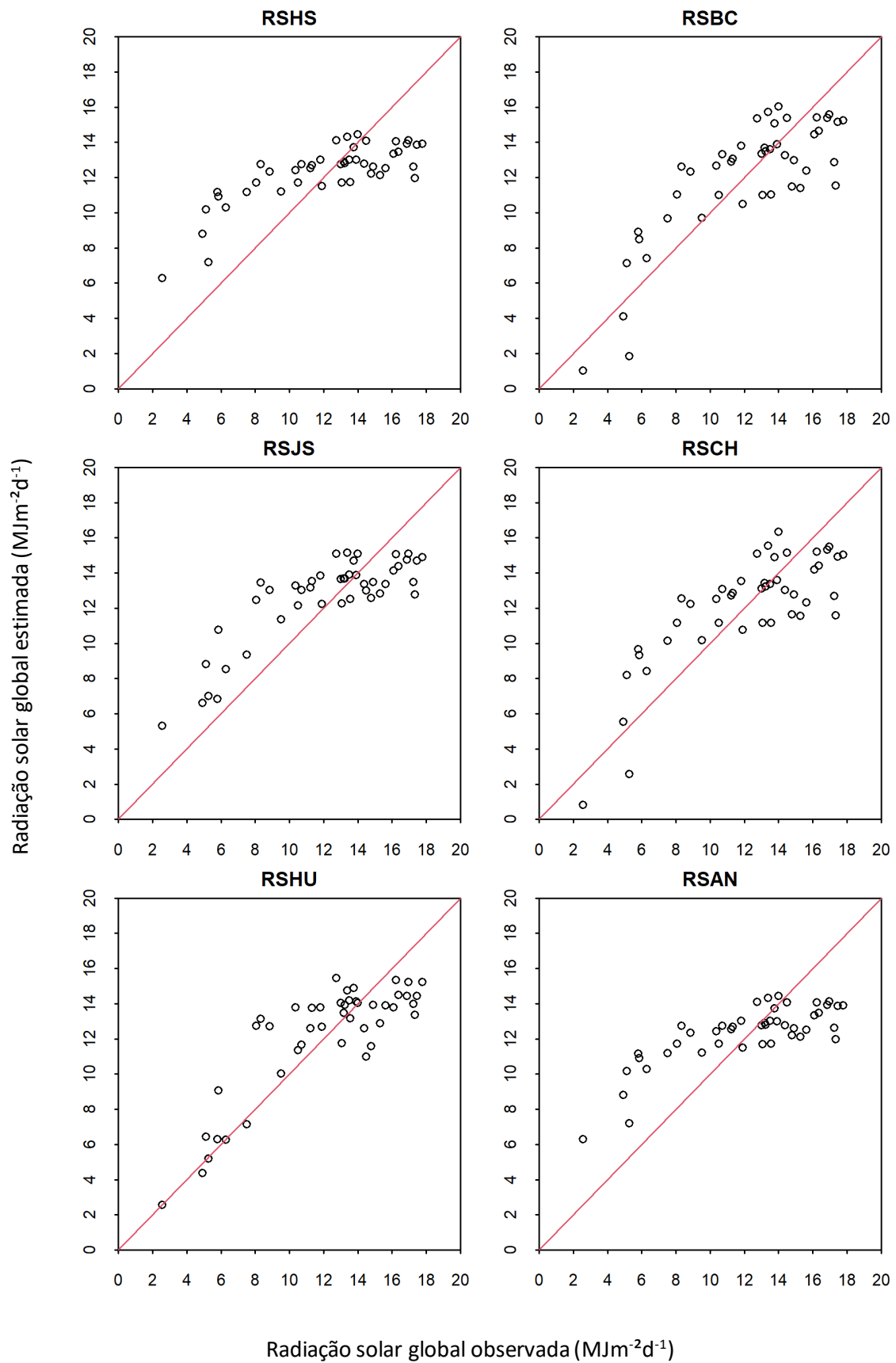
Os modelos RSHS e RSAN ficaram na quinta colocação, apresentando desempenhos iguais, tanto no RMSE ( $2,85 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ), quanto no NSE (0,49), sendo ambos classificados como insatisfatórios. Ambos os modelos apresentaram uma superestimativa dos valores observados da radiação solar global, com valores de  $CMR = -0.01560$ . Isto demonstra que, para a localidade e na época chuvosa, a inclusão da altitude no modelo não interfere no desempenho das estimativas de *RS*.

Silva et al. (2012), ao estimarem a *RS* para a região Noroeste do Estado de Minas Gerais, encontraram um resultado menos favorável ao estimar os valores de *RS* ao utilizar o modelo RSAN, que apresentou um  $R^2$  de apenas 0,5, e uma RSME de  $3,5 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Mazzarella et al. (2019), ao estimarem a *RS* diária utilizando o modelo de Hargreaves-Samani para o estado do Estado do Rio de Janeiro, fazendo uso de dados de 11 estações meteorológicas, concluíram que de uma maneira geral, o método Hargreaves e Samani não é satisfatório nem mesmo após ao ser calibrado, para as condições climáticas da localidade. Mostrando-se ser significativo apenas quando os dados são decorrentes de estações próximas de corpos d'água. Neste estudo, os modelos de Hargreaves; Samani e de Annandale et al. (2002), foram os que obtiveram os desempenhos mais fracos, embora ainda satisfatórios. Provavelmente, pelo local de estudo está próximo a um rio.

Na figura 2 estão apresentados os valores da radiação solar estimada em função da radiação solar medida, utilizando os modelos empíricos testados para a Cidade do Recife-PE. A principal vantagem deste tipo de gráfico é evidenciar rapidamente a relação entre os valores medidos e estimados, que deve ter seus valores próximos a linha 1:1. Além de ser possível determinar algumas anomalias existente. Pode-se observar que todos os modelos apresentaram valores estimado de *RG* dentro da mesma magnitude dos valores medidos (entre 0 e 20). É possível perceber que os modelos HSHA e HSNAN apresentaram uma maior quantidade de pontos distantes da reta 1:1, quando comparados aos demais. Muito embora, não seja possível determinar, apenas com base na análise gráfica, qual dos outros modelos apresentaram melhor desempenho. Dessa forma, o resultado dos gráficos corrobora os resultados encontrado pelos parâmetros estatísticos utilizados.

Figura 2 - Radiação solar estimada em função da radiação solar medida utilizando os modelos empíricos testados para a Cidade do Recife-PE.



## 5 CONCLUSÃO

Após a calibração dos parâmetros, os modelos analisados mostram-se capazes de estimar a radiação solar global diária para a Cidade de Recife-PE e podem ser utilizados quando da falta de dados em estações meteorológicas.

O resultado do desempenho dos modelos, classificados por ordem de maior para menor eficácia é: Hunt et al. (1998), Bristow; Campbell (1984), Jong & Stewart (1993), Chen et al. (2004), Hargreaves; Samani (1982), e Annandale et al. (2002). Entretanto, deve-se ressaltar que para a utilização do modelo proposto por Hunt et al. (1998), faz-se necessário os dados de precipitação diária o que pode não ser disponível, principalmente em séries históricas. Caso seja disponível apenas os valores da temperatura, o melhor modelo para de estimar a *RS* é o proposto por Bristow; Campbell (1984), que apresentou um desempenho satisfatório e muito próximo ao obtido pelo modelo proposto por Hunt et al. (1998).

Um fator que se deve considerar é que os modelos avaliados foram calibrados apenas para a estação chuvosa de 2023, o que pode ter influenciado nos seus desempenhos, caso este seja um ano atípico.

## 6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- ALMOROX, J. Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. **Turkish Journal of Physics**, Erzurum, v.35, n.1, p.53-64, 2011.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain, **Energy Conversion and Management**, Cambridge, v.45, p.1529-1539, 2004.
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Londres, v. 5, n. 210, p. 121-126, 1924.
- ANNANDALE, J., JOVANOVIĆ, N., BENADÉ, N. ALLEN, R. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**, v.21, p. 57-67, 2002.  
<https://doi.org/10.1007/s002710100047>.
- AULER, F.R.; MINUZZI, R.B. Estimation of daily global solar radiation by air temperature under different cloudiness conditions in Florianópolis, Santa Catarina. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 7, n 1, p. 026-032, 2022. <https://doi.org/10.24221/jeap.7.01.2022.3996.026-032>
- BESHARAT, F., DEGHAN, A. A., FAGHIH, A. R. Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 798-821, 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>
- 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, n. 2, p. 159-166, 1984.  
[https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)
- BOLDRIN, M. T. N.; BENÍCIO, S. H. M.; RODRIGUES, A. M.; OLIVEIRA, L.; FORMIGA, K. T. M. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.15, n. 04, 1827-1842, 2022.
- BOSCAINI, R., ROBAINA, A. D., PEITER, M. X., RODRIGUES, P. E. C., NETO, M. C. Estimativa da radiação solar global para fins de manejo de irrigação. **Revista Engenharia Na Agricultura - REVENG**, v. 27, n.6, p. 498-507, 2019.  
<https://doi.org/10.13083/reveng.v27i6.954>
- CHEN, R., ERSI, K., YANG, J., LU, S., ZHAO, W. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, v.45, p. 1759-1769, 2004.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>
- CHEN R. S.; LU S.; KANG E.; YANG J.; JI X. Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 47, p. 865-878, 2006.
- DAVIES, J. A.; MCKAY, D. C. Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces. **Solar Energy**, Kidlington, v. 43, n. 3, p. 153-168, 1989.

GUREL, A. E., AGBULUT, U. BAKIR, H. ERGUN, A., YILDIZ, G. A state of art review on estimation of solar radiation with various models. **Heliyon**, v. 9, n. 2, e13167. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13167>

HARGREAVES, G.H. Responding to tropical climates. In: **FOOD AND CLIMATE REVIEW, THE FOOD AND CLIMATE FORUM**, Aspen Institute for Humanistic Studies, 1980-1981, Boulder, Colo. Proceedings... Boulder: Aspen Institute for Humanistic Studies, p. 29-32, 1981.

HARGREAVES, G.L., HARGREAVES, G.H., Riley, J.P. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drainage**, ASCE 111, p. 265–275, 1985.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage**. ASCE; Delaware, v. 108, p. 225-30, 1982.

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. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00055-0).

JAMIL, B., AKHTAR, N. Comparison of empirical models to estimate monthly mean diffuse solar radiation from measured data: case study for humid-subtropical climatic region of India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p.1326-1342, 2017.

JONG, R.; STEWART, D.W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. **Canadian Journal of Plant Science**, v.73, p.509-518, 1993. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.057>

LIN, F., CHEN, X., YAO, H. Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 11, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001580)

LIU, X. et al. Calibration of the Angstrom-PreScott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.697-710, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.027>.

LIU, D. L.; SCOTT, B. J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 106, n. 1, p. 41–59, 2001.

MUNNER, T; GUL, M. S. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 41, n. 5, p. 461–82, 2000.

MAZZARELLA, D. S.; WANDERLEY, H. S.; OLIVEIRA-JÚNIO, J. F.; GOIS, G.; LYRA, G. B. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.12, n.06, p. 2325-2338, 2019.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, v.10, p. 282-290, 1970. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

RAMOS; J. P. A.; VIANNA, M. S.; MARIN, F. R. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.26, n.1, p.37-51, 2018. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v26i1.26299>

RIVINGTON, M.; BELLOCCHI, G.; MATTHEWS, K. B.; BUCHAN, K. Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 132, n. 3–4, p. 228–43, 2005

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, n.2, p.276-282, fev, 2012.

WONG, L. T.; CHOW, W. K. Solar radiation model. **Applied Energy**, London, v. 69, n. 3, p. 191–224, 2001.

YANG, K.; KOIKE, T. Estimating surface solar radiation from upper-air humidity. **Solar Energy**, Kidlington, v. 72, n. 2, p. 177–86, 2002.