

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE BAURU

VIRGILIO SANTINHO TAGLIAVINI

**ESTUDO DA EFICÁCIA DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE IRRADIAÇÃO SOLAR NA
REGIÃO DO CENTRO DE SÃO PAULO**

Bauru
2023

VIRGILIO SANTINHO TAGLIAVINI

**ESTUDO DA EFICÁCIA DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE IRRADIAÇÃO SOLAR NA
REGIÃO DO CENTRO DE SÃO PAULO :**

Trabalho de graduação do curso de bacharelado em CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO da Faculdade de Ciências do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção diploma de graduação do bacharelado em CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO .

Orientador: Profº Dr. João Eduardo Machado
Perea Martins

Bauru
2023

T127e

Tagliavini, Virgilio Santinho

Estudo da eficácia de modelos de estimativa de irradiação solar na região do centro de São Paulo / Virgilio Santinho Tagliavini. -- Bauru, 2023

34 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciência da Computação) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru

Orientador: João Eduardo Machado Perea Martins

1. Radiação solar. 2. Estimativas. 3. Cálculos numéricos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

VIRGILIO SANTINHO TAGLIAVINI

ESTUDO DA EFICÁCIA DE MODELOS DE ESTIMATIVA DE IRRADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DO CENTRO DE SÃO PAULO

Trabalho de graduação do curso de bacharelado em CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO da Faculdade de Ciências do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção diploma de graduação do bacharelado em CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO .

BANCA EXAMINADORA:

**Profº Dr. João Eduardo Machado Perea
Martins**

Orientador

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho"

Faculdade de Ciências

Departamento de Computação

Profº Dr. Simone das Graças Domingues Prado

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho"

Faculdade de Ciências

Departamento de Computação

Profº Dr. Kelton Augusto Pontara da Costa

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho"

Faculdade de Ciências

Departamento de Computação

16 de Novembro de 2023

RESUMO

A irradiação solar incidente na superfície terrestre é uma variável importante em diversas aplicações científicas e comerciais. Assim a capacidade de estimar e prever a irradiação solar global é necessária em diversos cenários, por isso existem diversos modelos para a estimar mas nenhum modelo é efetivo para toda a superfície terrestre. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de três modelos numéricos para estimar a irradiação solar diária para a região do centro do estado de São Paulo. Foram utilizados dados meteorológicos de sete cidades do centro do estado de São Paulo disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia para executar e registrar os resultados dos modelos estudados. Os resultados foram comparados com os dados reais registrados utilizando medidas estatísticas e estocásticas. Os resultados inicialmente obtidos indicaram que apenas o modelo de Hargreaves e Samani é efetivo em estimar a irradiação solar incidente na região porque os resultados dos demais modelos apresentaram baixos índices de concordância com os dados reais. Para aumentar a precisão dos modelos estudados foi adicionado um coeficiente de ajuste para cada cidade e modelo, isso resultou em estimativas adequadas em todos os modelos, com altos valores nas medidas de avaliação utilizadas, mas o modelo de Hargreaves e Samani permaneceu como o modelo de maior precisão para todas as cidades estudadas, com exceção de Barra Bonita onde é o segundo modelo mais preciso. Assim, estes modelos são apropriados para a estimativa da irradiação solar na região do centro do estado de São Paulo.

PALAVRAS-CHAVE: Irradiação Solar Incidente; Estimativa; Modelos Numéricos; São Paulo

ABSTRACT

The incident solar irradiation on the Earth's surface is an important variable in many scientific and commercial applications thus the ability to estimate and predict the incident solar irradiation is necessary in many scenarios, therefore many models exist to estimate it but none are effective in Earth's entire surface. Thus, this paper has the objective of measuring the performance of three numerical models in estimating the daily solar irradiation on the central region of the state of São Paulo. To achieve that the meteorological data of seven cities in São Paulo's central region made available by the Nacional Institute of Meteorology was used to execute and register the results of the studied models then their results were compared to each other and the real data using statistical and stochastic measurements. The initial results generated indicated that only the model of Hargreaves e Samani is effective in estimating the incident solar irradiation in the region because the other models produced low agreement indexes for the real data. To increase the models' accuracy an adjustment coefficient was added to each model in each city studied, this resulted in adequate estimates for all models, with high agreement indexes values, but the model of Hargreaves e Samani was still the model with highest precision on all cities with exception of Barra Bonita where it was the second most accurate. Thus, these models are able to adequately estimating the daily incident solar irradiation on São Paulo's state central region.

PALAVRAS-CHAVE: Incident Solar Irradiation; Estimation; Numerical Models; São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama da dissipação da irradiação solar pela atmosfera	11
Figura 2	Programa desenvolvido	19
Figura 3	Resultados dos modelos para a cidade de Avaré	24
Figura 4	Resultados dos modelos para a cidade de Barra Bonita	24
Figura 5	Resultados dos modelos para a cidade de Bauru	25
Figura 6	Resultados dos modelos para a cidade de Ibitinga	25
Figura 7	Resultados dos modelos para a cidade de Lins	25
Figura 8	Resultados dos modelos para a cidade de Piracicaba	25
Figura 9	Resultados dos modelos para a cidade de São Carlos	26
Figura 10	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Avaré	28
Figura 11	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Barra Bonita	28
Figura 12	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Bauru	28
Figura 13	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Ibitinga	29
Figura 14	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Lins	29
Figura 15	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Piracicaba	29
Figura 16	Resultado dos modelos ajustados para a cidade de São Carlos	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia	18
Tabela 2 – Resultados iniciais dos modelos estudados	23
Tabela 3 – Resultados dos modelos ajustados	27

LISTA DE SÍMBOLOS

R_a	Radiação solar no topo da atmosfera
R_d	Radiação solar dissipada pela atmosfera
R_s	Radiação solar incidente na superfície
T_a	Coeficiente de transmissividade atmosférica
Ti_{max}	Temperatura máxima diária do dia i
Ti_{min}	Temperatura mínima diária do dia i
C_a	Coeficiente de ajuste do modelo de Hargreaves e Samani
B_d	Coeficiente de transmissividade direta atmosférica
B_i	Coeficiente de transmissividade indireta atmosférica
δ	Declinação solar
ω_s	Ângulo do pôr do sol
D_r	Distância relativa entre a Terra e o Sol
P_a	Potência da irradiação solar incidente no topo da atmosfera

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	TRABALHOS CORRELATOS	13
2.1	Global Solar Radiation Models in Minas Gerais, Southeastern Brazil	13
2.2	Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP)	13
2.3	A Simple Method To Estimate Global Radiation	14
2.4	On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil	14
3	MODELOS NUMÉRICOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR .	16
3.1	Modelo de Weiss e Hays	16
3.2	Modelo de Hargreaves e Samani	16
3.3	Modelo de Thornton e Running	17
4	DADOS UTILIZADOS	18
5	METODOLOGIA	19
5.1	Pré-Processador	19
5.2	Estimador	19
5.3	Avaliador	20
5.3.1	Média	20
5.3.2	Desvio padrão	21
5.3.3	Erro Médio Quadrático	21
5.3.4	Índice de concordância de Willmott	21
5.3.5	Coeficiente de determinação	22
6	RESULTADOS	23
7	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

A irradiação solar na superfície da Terra, a energia solar que atinge a superfície terrestre, é um fator importante em diversos cenários. Ela é um importante fator no clima, determinando fatores como a taxa de evaporação da água e a temperatura do ar (HARGREAVES; SAMANI, 1982); para a produção de energia renovável, sendo o fator mais importante na geração de energia solar; e é importante para a agricultura e o meio ambiente já que determina quanta energia organismos autótrofos fotossintetizantes podem obter. Assim, a capacidade de prever a irradiação solar é valiosa para diversos propósitos científicos e comerciais.

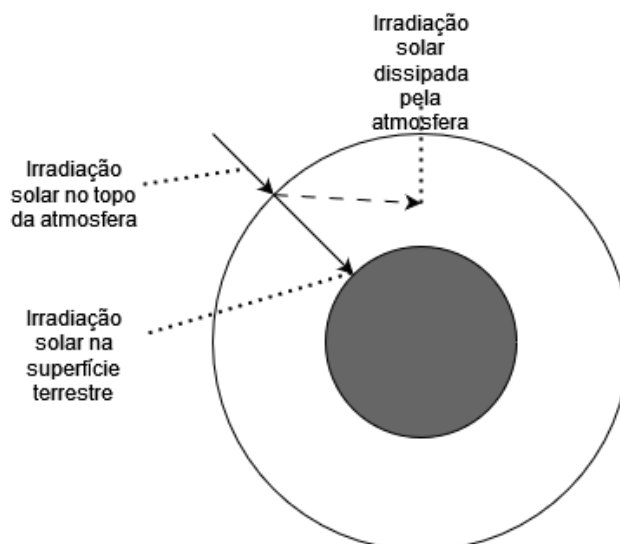
Assim, a irradiação solar em determinada região é uma informação importante em diversas aplicações porém ela não está sempre disponível por duas razões. A primeira é que nem todas as regiões da superfície terrestre possuem estações meteorológicas que observem e registrem a irradiação solar, (THORNTON; RUNNING, 1999). A segunda é que várias vezes se deseja não apenas as informações atuais e históricas da irradiação de uma região mas também deseja-se prever valores futuros para a irradiação solar. Então foram desenvolvidas diversas técnicas para estimar a irradiação solar em uma região, como modelos de aprendizado de máquina, ajuste de curvas e modelos numéricos mas neste trabalho foram estudados apenas modelos numéricos para estimativa da irradiação solar global.

A irradiação solar em determinada região da superfície terrestre depende de dois fatores, a irradiação solar no topo da atmosfera, que segundo Gomez et al. (2018), varia mas é considerada como uma constante de $1387,6 \text{ W/m}^2$, e as condições atmosféricas da região, que determinam quanta energia solar foi dissipada pela atmosfera através dos fenômenos de reflexão, difração e absorção antes de atingir a superfície terrestre (BERUSKI; PEREIRA; SENTELHAS, 2015).

Esse fenômeno é descrito na Figura 1 onde a irradiação solar atinge o topo da atmosfera e ao atravessar a atmosfera parte dela é dissipada antes de atingir a superfície da Terra.

Como a irradiação solar no topo da atmosfera se mantém aproximadamente constante ao longo do tempo e a sua previsão depende de fatores de difícil previsão, como manchas solares além efeitos atmosféricos e magnéticos solares, estimativas da irradiação solar na superfície terrestre se focam na dissipação da energia solar pela atmosfera através de variáveis atmosféricas terrestres, como a umidade, temperatura e presença de nuvens. Assim, é possível estimar a irradiação solar de uma região com base nas condições atmosféricas regionais, permitindo estimar a irradiação solar para aplicações científicas e comerciais.

Figura 1 – Diagrama da dissipação da irradiação solar pela atmosfera



Fonte: Produzido pelo autor

O cálculo da irradiação solar incidente através da dissipação atmosférica por modelos numéricos pode ser dividido em três tipos de acordo com Monteiro e Martins (2019), e Almorox, Hontoria e Benito (2011) com base nos fatores utilizados para estimar a irradiação solar.

O primeiro tipo é o dos modelos baseados na duração do dia, esses modelos abstraem completamente os fenômenos atmosféricos que dissipam a radiação solar e as variáveis atmosféricas responsáveis por isso, preferindo coeficientes de ajuste empíricos. Esses modelos podem ser precisos em certas situações mas precisam ser precisamente ajustados com dados históricos da irradiação solar incidente da região na qual se deseja os utilizar e deixarão de ser precisos caso as condições atmosféricas presentes nos dados de calibração do modelo mudarem, como observado por Belucio et al. (2014) para a região de Macapá onde o modelo estudado foi preciso apenas em certos meses do ano por causa de seus caracteres climáticos distintos.

O segundo tipo de modelos numéricos para estimar a irradiação solar são os modelos de nebulosidade, modelos que consideram a cobertura de nuvens em uma região em suas estimativas (SUPIT; KAPPEL, 1998). Esses modelos são capazes de estimar dados precisos para diversas condições atmosféricas e são menos suscetíveis a mudanças atmosféricas porque levam em consideração a cobertura das nuvens, importante fator na dissipação da irradiação solar (BELUCIO et al., 2014), mas dependem de registros da cobertura de nuvens na região para serem calibrados e, como registros da irradiação solar incidente, nem todas as estações atmosféricas registram essa variável então ela deve ser obtida de outras fontes como satélites meteorológicos (SUPIT; KAPPEL, 1998) ou estimada, mas ela é difícil de estimar com precisão e modelos para estimar a cobertura das nuvens necessitam da irradiação solar já que ela é uma importante variável na formação de nuvens de todos os tipos.

O último tipo de modelo é dos modelos de temperatura e umidade, estes modelos calculam a dissipação da irradiação solar pela atmosfera terrestre através das variáveis de temperatura e umidade do ar. Estes modelos tem a vantagem de utilizarem variáveis medidas na maioria das estações meteorológicas e possuem diversos modelos para as estimar sendo assim modelos versáteis. Porém, o desempenho destes modelos também é suscetível a mudanças atmosféricas como a passagem das

estações, como observado na região de Minas Gerais por Monteiro e Martins (2019) onde o clima é definido por verões úmidos e invernos secos.

Mas não é viável aplicar qualquer modelo numérico a qualquer região terrestre. Um modelo realista é muito custoso computacionalmente e na quantidade de entradas para ser útil para a maioria das aplicações, (WEISS; HAYS, 2004), então todos os modelos utilizados são simplificações dos complexos efeitos físicos que atuam na dissipação da irradiação solar pela atmosfera. Assim, diversos fatores são desconsiderados e por isso um modelo eficaz em uma região pode não ser eficaz em outra. Por exemplo, Borges et al. (2010) determinaram que para a região de Cruz das Almas da Bahia o modelo de Hargreaves-Samani se mostrou mais preciso do que o modelo de Thornton-Running mesmo que o modelo de Hargreaves e Samani seja um modelo mais simples e antigo que o de Thornton e Running. Assim, é necessário estudar a eficácia de cada modelo para determinada região terrestre a fim de determinar qual modelo mais preciso. Logo, se justifica o estudo da eficácia de modelos numéricos para estimar a irradiação solar para a região do centro de São Paulo.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de três modelos numéricos de temperatura e umidade em estimar a irradiação solar incidente na região central do estado de São Paulo. Isso foi realizado implementando os modelos estudados com a linguagem de programação Matlab e os executar utilizando dados meteorológicos históricos de sete cidades do centro do estado de São Paulo disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Então o desempenho dos modelos foi medido através de cinco medidas estatísticas e estocásticas.

2 TRABALHOS CORRELATOS

2.1 GLOBAL SOLAR RADIATION MODELS IN MINAS GERAIS, SOUTHEASTERN BRAZIL

O trabalho desenvolvido por Monteiro e Martins (2019), tem como objetivo avaliar a efetividade de modelos empíricos em estimar a irradiação solar diária incidente no estado de Minas Gerais, tema relevante porque poucas estações meteorológicas registram a irradiação solar. Nesse trabalho treze modelos empíricos foram avaliados utilizando dados meteorológicos históricos de dez cidades do estado de Minas Gerais disponibilizados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, os resultados dos modelos foram avaliados através de cinco métricas: a raiz do erro médio quadrático, porcentagem média do erro absoluto, média do erro de viés, índice de concordância de Willmott e o índice de performance.

Para manter o trabalho breve e facilitar seu desenvolvimento, os oito modelos com pior desempenho, os modelos de (ANGSTROM, 1924), (HARGREAVES; SAMANI, 1982), (HARGREAVES; HARGREAVES, 1985), (HUNT; KUCHAR; SWANTON, 1998), (AMPRAWUM; DORVLO, 1999), (ELAGIB; MANSELL, 2000), (WEISS et al., 2001), (CHEN et al., 2004), foram descartados e apenas os cinco melhores, (NEWLAND, 1989), (AKINOGLU; ECEVIT, 1990), (JONG; STEWART, 1993), (GOODIN et al., 1999), (ERTEKIN; YALDIZ, 2000), tiveram uma análise aprofundada da sua efetividade em cada cidade. Também, as autoras agruparam as cidades estudadas em três grupos com base na efetividade registrada dos modelos empíricos a fim de facilitar a análise dos resultados além de ser uma informação útil para futuros trabalhos da área.

O trabalho conclui que não existe um melhor modelo para estimar a irradiação solar diária incidente em todo o estado de Minas Gerais porque a região apresenta cinco tipos climáticos segundo a classificação de Köppen-Geiger's e nenhum modelo apresentou bom desempenho em todos os climas, gerando os grupos de cidades anteriormente citados.

2.2 RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ESTIMADA A PARTIR DA INSOLAÇÃO PARA MACAPÁ (AP)

Desenvolvido por Belucio et al. (2014) esse trabalho tem como objetivo utilizar e avaliar a efetividade da técnica de aprendizado de máquina da regressão linear sobre o modelo empírico de estimativa da irradiação solar incidente desenvolvido por Angstrom (1924) com dados meteorológicos históricos da capital do estado de Amapá, a cidade de Macapá. A efetividade da regressão linear no modelo de Angstrom (1924) foi avaliada através do uso do índice de concordância de Willmott e o coeficiente de correlação sobre os dados reais de irradiação solar incidente e os resultados do modelo treinado.

A regressão linear foi realizada para duas variáveis a e b do modelo de Angstrom (1924) para previsões mensais e anuais, utilizando dados diários provenientes de duas fontes o Instituto Nacional de Meteorologia e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais para o período de janeiro de 2006 até dezembro de 2012.

Os autores concluem em seu trabalho que o modelo pode ser utilizado para estimar a irradiação solar incidente na cidade de Macapá. Mas que para os modelos mensais a precisão varia entre os meses com os meses chuvosos, de janeiro a abril, apresentam bom desempenho enquanto os meses secos apresentaram desempenho pior. Porém, o modelo de estimativa anual apresentou bom desempenho, aconselhando o uso dele para todo o ano.

2.3 A SIMPLE METHOD TO ESTIMATE GLOBAL RADIATION

O trabalho de Supit e Kappel (1998) tem como objetivo desenvolver um modelo para estimar a irradiação solar incidente para uso em estimativas agronômicas na região da União Europeia e como poucas das estações meteorológicas registram a irradiação solar da região, como apenas 500 de 1200 estações do *Global Telecommunication System* registrando essa variável. Essa falta de dados torna modelos numéricos baseados em insolação inviáveis pois não há dados suficientes para calibrar seus coeficientes de ajuste empíricos então o modelo desenvolvido deveria utilizar variáveis atmosféricas. Os dados meteorológicos utilizados no estudo foram disponibilizados pelo *Global Telecommunication System* para o período de 1970 a 1995.

O modelo desenvolvido por Supit e Kappel (1998) é uma modificação do modelo de Hargreaves e Samani (1982), que utiliza temperatura e caráter climático, com dados da cobertura de nuvens na região, para estimar a irradiação solar incidente na região. O modelo desenvolvido conta com três variáveis empíricas que foram calculadas para cada região estudada através da técnica de regressão linear.

O modelo desenvolvido pelo autores apresentou bom desempenho com um coeficiente de determinação médio de 0.91 para as estações estudadas, algumas estações apresentaram coeficientes de determinação menores e a análise dos resultados do modelo nessas estações mostrou que ele estimou valores de irradiação solar incidente maiores que os reais então o modelo é otimista. Os autores concluem que o modelo não é apropriado para estimativas diárias mas adequado para estimativas mensais e para o uso em aplicações agronômicas.

2.4 ON MODELING GLOBAL SOLAR IRRADIATION USING AIR TEMPERATURE FOR ALAGOAS STATE, NORTHEASTERN BRAZIL

O trabalho desenvolvido por DOS SANTOS et al. (2014) tem dois objetivos, avaliar a efetividade de modelos numéricos para estimar a irradiação solar incidente diariamente e mensalmente no estado de Alagoas e determinar o melhor método de calcular a amplitude diária da temperatura do ar entre dois diferentes métodos. Os modelos avaliados podem ser divididos em dois grupos, os modelos derivados do modelo de Bristow e Campbell (1984), e os modelos derivados do modelo de Hargreaves e Samani (1982). O cálculo dos modelos foi feita com dados meteorológicos de oito estações meteorológicas do estado do Alagoas para o período de 2007 a 2009.

Os autores concluem que a diferença no desempenho dos modelos numéricos para estimar a irradiação solar incidente não foi afetado pelos diferentes métodos de calcular a amplitude diária da temperatura do ar com ambos os métodos gerando resultados semelhantes então os autores recomendam

utilizar o método mais simples. E que não há um modelo numérico efetivo para todo o estado de Alagoas, com modelos derivados do modelo de Hargreaves e Samani (1982) gerando os melhores resultados para a região interiorana e seca do estado enquanto os derivados do modelo de Bristow e Campbell (1984) tiveram a maior precisão para a região litorânea e úmida.

3 MODELOS NUMÉRICOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR

Como descrito na Figura 1, a irradiação solar que atinge a superfície terrestre é apenas parte do irradiação que atinge o topo da atmosfera já que a atmosfera dissipa parte dessa energia em si. Assim, a forma geral de um modelo numérico para estimar a irradiação na superfície terrestre pode ser descrito pela Equação 3.1.

$$R_a = R_d + R_s \quad (3.1)$$

Mas como a R_d é proporcional a R_a , isto é, a energia dissipada pela atmosfera é dependente da irradiação incidente no topo da atmosfera. A expressão pode ser reescrita como a Equação 3.2

$$R_s = R_a * T_a \quad (3.2)$$

Assim, os modelos numéricos para estimativa de irradiação solar na superfície terrestre tem como objetivo estimar T_a com base em variáveis atmosféricas como temperatura, umidade e pressão.

Neste trabalho, a eficácia de três modelos será estudada para a região central do estado de São Paulo, os modelos de Weiss e Hays, Hargreaves e Samani, e o modelo de Thornton e Running. Os modelos de Weiss e Hays, e Thornton e Running são modificações do modelo desenvolvido por Bristow e Campbell (1984), que relaciona a irradiância solar diária com as temperaturas mínimas e máximas diárias do ar (BORGES et al., 2010).

3.1 MODELO DE WEISS E HAYS

O modelo desenvolvido por Weiss e Hays foi criado com o objetivo de refinar o modelo de Bristow e Campbell, muito utilizado pela sua simplicidade, para melhorar sua eficácia mas preservando sua simplicidade (WEISS; HAYS, 2004). O modelo é definido por Borges et al. (2010) e Weiss e Hays (2004) pelas Equações 3.3 e 3.4, onde b é uma variável empírica dependente da região estudada.

$$T_a = 0.75 * [1 - \exp(\frac{-b * \Delta T^2}{R_{s(i-30)}})] \quad (3.3)$$

$$\Delta T_i = T_{i_{max}} - \frac{T_{i_{min}} + T_i - 1_{min}}{2} \quad (3.4)$$

Neste trabalho b foi calculado através da Equação 3.5 definida por Weiss e Hays (2004).

$$b = 0.128 + (0.9\Delta T - 4.528)^{-1} \quad (3.5)$$

3.2 MODELO DE HARGREAVES E SAMANI

O modelo de Hargreaves e Samani é, como o modelo de Bristow e Campbell, um dos modelos numéricos para estimativa da irradiação solar mais antigos, (BORGES et al., 2010). Assim, ele também é simples mas diferentemente do modelo de Bristow e Campbell ele considera também o caráter

climático da região, representado pelo coeficiente de ajuste C_a que é de 0.19 para regiões costeiras e 0.16 para regiões interioranas, (BORGES et al., 2010). Mas diferentemente do modelo de Bristow e Campbell e suas variações, o modelo de Hargreaves e Samani não possui variáveis empíricas. Como a região central de São Paulo está distante do oceano Atlântico e a região não possui grandes corpos de água, ela é considerada interiorana e terá C_a de 0.16. Hargreaves e Samani (1982) e Borges et al. (2010) definem o modelo como a Equação 3.6.

$$T_a = C_a * \sqrt{T_{i_{max}} - T_{min}} \quad (3.6)$$

3.3 MODELO DE THORNTON E RUNNING

O modelo desenvolvido por Thornton e Running é, assim como o de Weiss e Hays, um refinamento do modelo desenvolvido por Bristow e Campbell (1984) porém ele não é tão simples como os demais modelos estudados neste trabalho, pois depende de duas variáveis B_d e B_i que descrevem a transmissividade atmosférica direta e indireta, respectivamente, e que devem ser calculadas externamente, neste trabalho utilizamos as relações utilizadas por (BORGES et al., 2010) e descritas por (ALLEN, 1996). O modelo de Thornton e Running é definido por Thornton e Running (1999) e Borges et al. (2010) pelas Equações 3.7 e 3.8, onde $\bar{\Delta T}$ é a amplitude térmica mensal histórica da região.

$$T_a = (B_d + B_i) * (1 - 0.9 * e^{-B * (T_{i_{max}} - T_{i_{min}})^{1.5}}) \quad (3.7)$$

$$B = 0.031 + 0.201 * e^{-0.185 * \bar{\Delta T}} \quad (3.8)$$

4 DADOS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados os dados meteorológicos oferecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia de 7 cidades do estado de São Paulo: Avaré, Barra Bonita, Bauru, Ibatinga, Lins, Piracicaba e São Carlos.

Inicialmente foram requisitados dados de 01/01/2001 até 31/12/2022 porém nenhuma cidade possuía registros disponíveis para todo esse período, então foram requisitados todos os dados registrados pela estação até 31/12/2022. Assim, a análise da eficácia de modelos numéricos para estimativa de irradiação solar foi realizado individualmente para cada cidade e utilizou todos os dados disponíveis para a mesma.

Todos os dados registrados pelas estações foram requisitados mas o Instituto Nacional de Meteorologia também disponibilizou a latitude, a longitude e a altitude de cada estação.

As estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia utilizadas neste trabalho podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia

Cidade	Data de início	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Avaré	21/09/2006	-23.101666	-48.941111	776.36
Barra Bonita	23/04/2008	-22.471111	-48.557500	533.68
Bauru	29/08/2001	-22.358052	-49.028877	636.17
Ibatinga	08/11/2007	-21.855555	-48.799722	496.75
Lins	19/09/2006	-21.666111	-49.734722	460.65
Piracicaba	25/09/2006	-22.703055	-47.623333	566.46
São Carlos	03/09/2006	-21.980353	-47.883927	859.29

Fonte: Dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia

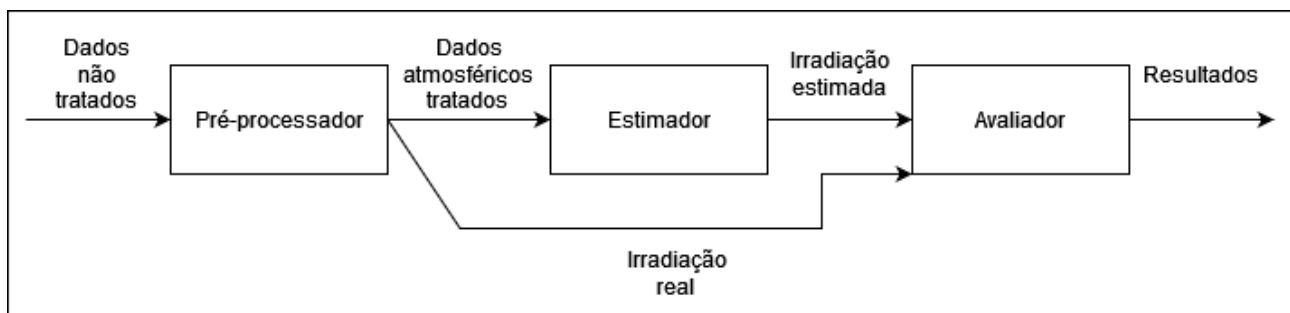
Contudo, os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia apresentam falhas, isto é, estações meteorológicas não são capazes de registrar ininterruptamente os dados atmosféricos da região. Isso ocorre por diversas razões como falhas em seus equipamentos de medição meteorológica, manutenções dos seus equipamentos ou quedas de energia. Dessa forma existem lacunas nos seus registros que devem ser tratadas para permitir a utilização de todos os dados registrados, o que será explorado na Metodologia.

5 METODOLOGIA

Para o estudo da eficácia dos modelos numéricos para estimativa da irradiação solar neste trabalho foi desenvolvido um programa que inicialmente possui duas funções: Executar e registrar o resultados dos modelos escolhidos utilizando os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, e analisar o desempenho desses modelos através de medidas como o erro médio quadrático, o coeficiente de determinação e a variância dos resultados. Porém, como foi discutido anteriormente, é necessário também tratar os dados oferecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia antes de os utilizar como entrada dos modelos escolhidos. Assim, o programa possui três módulos com funções diferentes e sua visão geral é como ser vista na Figura 2.

O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Matlab na versão 23.2.0.2365128 e executado no ambiente Windows 11 Pro na versão 22H2. O programa desenvolvido foi executado utilizando um computador com um processador AMD Ryzen 7 5700X 8-Core Processor de 3.40 GHz e 28 GB de RAM.

Figura 2 – Programa desenvolvido



Fonte: Produzido pelo autor

5.1 PRÉ-PROCESSADOR

Este módulo tem como objetivo tratar os dados brutos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia. Ele tem dois objetivos: preencher lacunas nos registros com valores apropriados e formatar os dados registrados de forma que a execução dos próximos módulos seja facilitada. Neste trabalho, o preenchimento das lacunas nos registros foi tratada preenchendo cada uma delas com a média dos valores válidos do mesmo horário, por exemplo, uma lacuna nos dados às 21:00 foi preenchida com a média dos valores válidos registrados às 21:00.

5.2 ESTIMADOR

É neste módulo que os modelos numéricos de estimativa da irradiação solar são executados, ele recebe os valores formatados pelo Pré-Processador e aplica sobre eles os modelos escolhidos neste trabalho então seus resultados são salvos em conjunto com os valores reais de irradiação solar global para posterior análise.

Dito isso, as estações do Instituto Nacional de Meteorologia registram apenas dados atmosféricos então falta aos modelos estudados o valor da irradiação solar no topo da atmosfera ao longo do dia. Infelizmente, observar e registrar esse valor por longos períodos de tempo para uma região não é possível então é necessário também estimar o irradiação solar no topo da atmosfera para cada dia em cada cidade estudada. Nessa estimativa, foram utilizadas as Equações 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 descritas por Allen (1996), que calculam a potência média da irradiação solar no topo da atmosfera P_a durante todo o dia a partir da latitude do local ϕ e do dia do ano DDA como segue.

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2 * \pi * DDA}{365} - 1.39\right) \quad (5.1)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi) * \tan(\delta)) \quad (5.2)$$

$$D_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2 * \pi * DDA}{365}\right) \quad (5.3)$$

$$P_a = \frac{1367 * D_r}{\pi} * (\omega_s * \sin(\phi) * \sin(\delta) + \cos(\phi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s)) \quad (5.4)$$

Então a irradiação solar diária no topo da atmosfera R_a pode ser obtida multiplicando P_a pela duração de um dia pela Equação 5.5.

$$R_a = P_a * 60 * 60 * 24 = P_a * 86400 \quad (5.5)$$

5.3 AVALIADOR

Este módulo auxilia a análise da eficácia dos modelos executados pelo Estimador. Ele recebe os resultados gerados pelo Estimador, aplica sobre ele seis medidas para avaliar seu desempenho e registra os resultados. O Avaliador calcula e registra as seis medidas para avaliar os modelos: Média 5.3.1, desvio padrão 5.3.2, erro médio quadrático 5.3.3, índice de concordância de Willmott 5.3.4 e o coeficiente de determinação 5.3.5.

5.3.1 Média

A média aritmética representa o valor central de um conjunto de dados. Para um conjunto C de n elementos ela é calculada pela Equação 5.6.

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (5.6)$$

Para este trabalho, a média pode ser utilizada para avaliar a efetividade dos modelos estudados. Onde idealmente a diferença entre a média dos valores reais e estimados deve ser zero, o que indicaria que o modelo é preciso já que uma discrepância entre as médias mostra que o modelo numérico estima valores maiores ou menores que os reais. Porém, médias próximas não garantem que o modelo seja preciso então são necessárias outras medidas para avaliar os modelos.

5.3.2 Desvio padrão

Esta medida indica quão dispersos os elementos de um conjunto estão, isto é, quão distantes os elementos de um conjunto estão da média desse conjunto, (MORETTIN; BUSSAB, 2010). O desvio padrão de um conjunto C é calculado pela Equação 5.7.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n}} \quad (5.7)$$

Na avaliação dos modelos deste trabalho ela pode ser utilizada em conjunto com a média para avaliar o caráter de uma função. Isto é, como descrito no item anterior, a média não pode ser utilizada por si só para avaliar modelos porque mesmo que as médias reais e estimadas sejam próximas as funções ainda podem ter amplitudes diferentes mas com o auxílio do desvio padrão é possível considerar também a amplitudes das funções permitindo análises mais detalhadas. Idealmente um modelo deve ter seu desvio igual ou próximo do desvio padrão dos dados reais.

5.3.3 Erro Médio Quadrático

O erro médio quadrático é uma medida que compara dois conjuntos ordenados de dados, ela mede a diferença absoluta entre cada par de elementos dos conjuntos. Isso a torna uma medida útil da discrepância entre dois conjuntos de dados contanto que se considere que ela é uma medida quadrática então ela cresce mais rapidamente que a diferença real entre os conjuntos, realçando erros maiores.

Para os conjuntos O dos dados observado e E dos valores estimados o erro médio quadrático EMQ é calculado pela Equação 5.8.

$$EMQ = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n} \quad (5.8)$$

Assim, neste trabalho ele é utilizado para avaliar quanto as previsões diferem dos valores reais considerando apenas o valor absoluto do erro. Idealmente, o erro médio quadrático entre os dados reais e os resultados de um dado modelo seria próximo de zero indicando que o modelo é preciso enquanto valores maiores indicam que o modelo é impreciso mas não indicando se o modelo erra por estimar valores maiores ou menores que os dados reais, sendo necessário utilizar outras métricas para determinar a natureza do erro.

5.3.4 Índice de concordância de Willmott

O índice de concordância de Willmott é uma medida utilizada para avaliar a concordância entre dados reais e valores estimados que foi criado como uma alternativa ao coeficiente de determinação pois ele pode ser impreciso em certas circunstâncias, Willmott (1982) e Legates e Junior (1999).

Essa métrica está contida em $[0,1]$ onde 1 indica que o modelo replicou perfeitamente os dados reais, 0 que o modelo está em total discordância com os dados reais, (WILLMOTT, 1981).

Assim ela é útil para indicar a semelhança entre duas curvas e neste trabalho pode indicar quão preciso um dado modelo é para a cidade dos dados reais utilizados. O índice de Willmott d é calculado

pela Equação 5.9.

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right) \quad (5.9)$$

5.3.5 Coeficiente de determinação

Apesar da motivação de Willmott estar correta, o coeficiente de determinação é impreciso em certas circunstâncias ele ainda pode ser útil na análise da efetividade de modelos numéricos. Isso porque o coeficiente de determinação não avalia apenas a correlação entre as variáveis mas também a proximidade delas a uma reta o que pode ser interpretado como a dispersão dessa variáveis no plano, (MORETTIN; BUSSAB, 2010).

Isto é, o coeficiente de determinação está no intervalo $[0, 1]$ com 1 indicando que o modelo explica toda a variação dos dados reais (WILLMOTT, 1981) e que eles estão pouco dispersos no plano cartesiano, enquanto o coeficiente de determinação 0 indica que o modelo e os dados reais discordam ou que estão dispersos pelo plano.

O coeficiente de determinação R é calculado pela Equação 5.10.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (5.10)$$

Neste trabalho, o coeficiente de determinação é utilizado para duas coisas: avaliar a precisão do modelo, assim como o índice de Willmott mas também avaliar a dispersão dos dados.

6 RESULTADOS

Os resultados das medidas estatísticas e estocásticas para os resultados dos modelos numéricos para estimativa da irradiação solar incidente para cada cidade estão registrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados iniciais dos modelos estudados

Cidade	Irradiação	$\bar{C}$	σ	EMQ	d	R^2
Avaré	Real	18.015	5.867			
	Weiss e Hays	11.670	6.044	74.452	0.556	0.268
	Hargreaves e Samani	16.365	5.479	30.431	0.715	0.326
	Thornton e Running	21.281	7.812	57.202	0.661	0.284
Barra Bonita	Real	15.635	6.585			
	Weiss e Hays	14.448	5.472	40.404	0.663	0.226
	Hargreaves e Samani	18.177	4.889	34.830	0.722	0.364
	Thornton e Running	22.504	6.349	80.824	0.622	0.358
Bauru	Real	16.119	5.752			
	Weiss e Hays	13.144	6.451	41.967	0.678	0.314
	Hargreaves e Samani	17.100	5.729	24.626	0.783	0.410
	Thornton e Running	21.461	7.994	71.761	0.642	0.341
Ibitinga	Real	19.342	6.103			
	Weiss e Hays	15.577	5.977	42.927	0.699	0.367
	Hargreaves e Samani	18.879	4.973	16.868	0.845	0.557
	Thornton e Running	22.547	6.765	33.933	0.791	0.516
Lins	Real	18.759	5.872			
	Weiss e Hays	14.399	5.702	44.122	0.685	0.391
	Hargreaves e Samani	18.127	4.863	16.852	0.835	0.532
	Thornton e Running	22.409	6.764	38.486	0.760	0.480
Piracicaba	Real	18.540	5.770			
	Weiss e Hays	13.330	6.626	63.471	0.595	0.285
	Hargreaves e Samani	17.253	5.613	27.190	0.747	0.367
	Thornton e Running	21.230	8.055	53.756	0.683	0.308
São Carlos	Real	17.744	5.544			
	Weiss e Hays	12.509	5.758	53.403	0.627	0.352
	Hargreaves e Samani	16.876	5.001	20.630	0.781	0.418
	Thornton e Running	21.783	7.367	51.842	0.687	0.366

Fonte: Produzido pelo autor

Estes resultados indicam que o modelo mais eficaz para todas as cidades estudadas é o modelo de Hargreaves e Samani porque em todos os casos ele apresentou média e desvio padrão próximos dos reais, e os maiores índices de concordância de Willmott e coeficientes de determinação.

Para o modelo de Thornton e Running, ele apresentou o segundo melhor índice de concordância de Willmott em todas as cidades mas suas médias e desvios padrões foram maiores que as reais então ele tende a estimar valores de irradiação solar maiores que os reais para toda a região e a primeiro momento não é um modelo adequado.

O modelo de Weiss e Hays por sua vez, apresentou o pior desempenho dos três modelos tendo

média menor que a real em todos os casos e apresentando os menores valores para o índice de concordância de Willmott e o coeficiente de determinação.

Analisando os resultados dos modelos para cada cidade nas Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, e Figura 9 percebe-se que os comportamentos e erros dos modelos são regulares para todas as cidades. Com o modelo de Weiss e Hays (2004) estimando valores que acompanham as variações nos valores reais mas menores que os reais em todas as cidades, o modelo de Thornton e Running (1999) também acompanha as variações dos valores reais mas maiores que os reais. Enquanto o modelo de Hargreaves e Samani (1982) apresentou o melhor desempenho porém não é capaz de acompanhar grandes variações nos valores reais, o que pode ser observado na 2 onde ele apresenta desvios padrões menores que os reais em todas as cidades.

Figura 3 – Resultados dos modelos para a cidade de Avaré

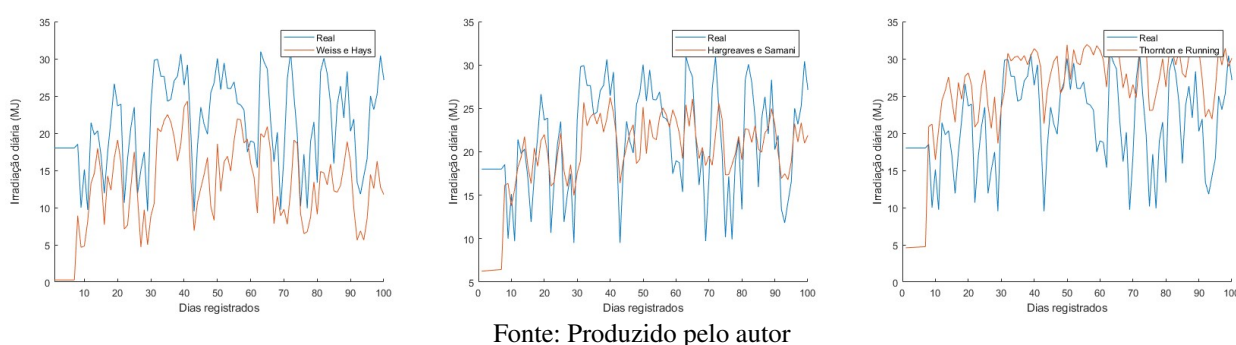


Figura 4 – Resultados dos modelos para a cidade de Barra Bonita

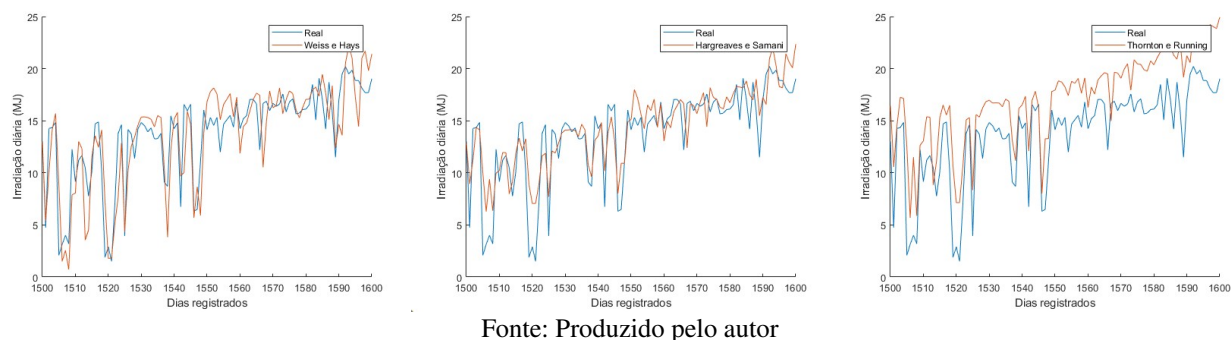


Figura 5 – Resultados dos modelos para a cidade de Bauri

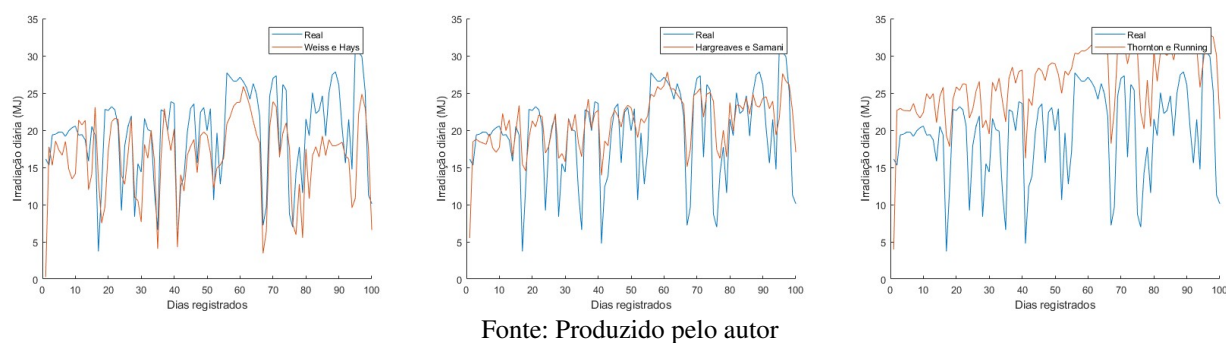


Figura 6 – Resultados dos modelos para a cidade de Ibitinga

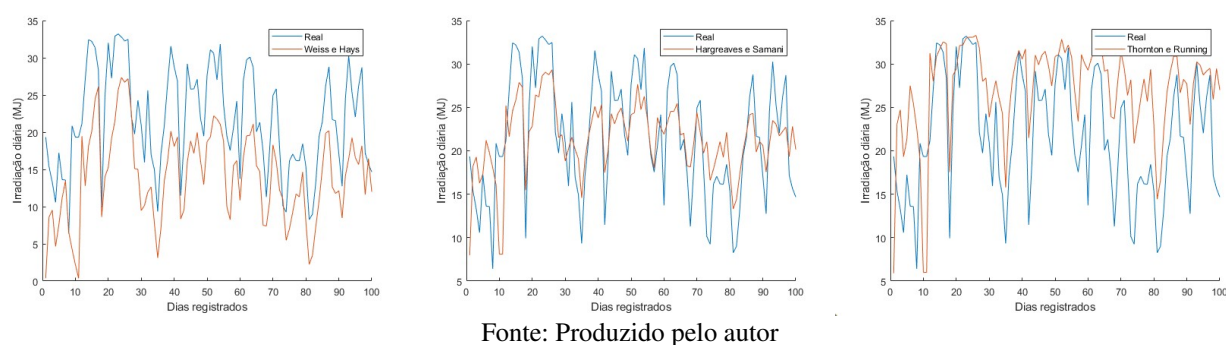


Figura 7 – Resultados dos modelos para a cidade de Lins

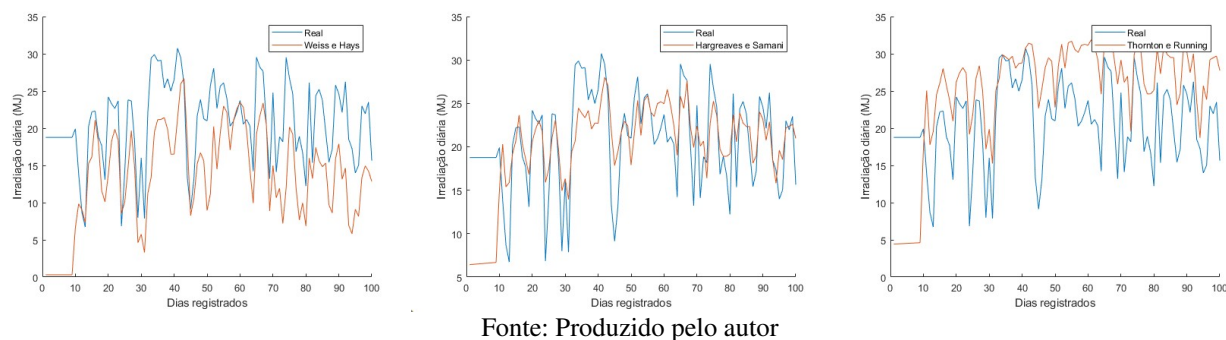


Figura 8 – Resultados dos modelos para a cidade de Piracicaba

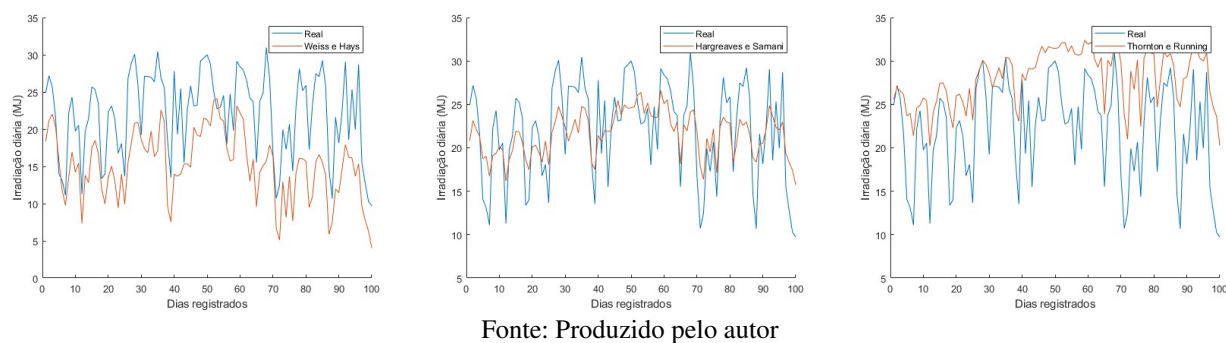
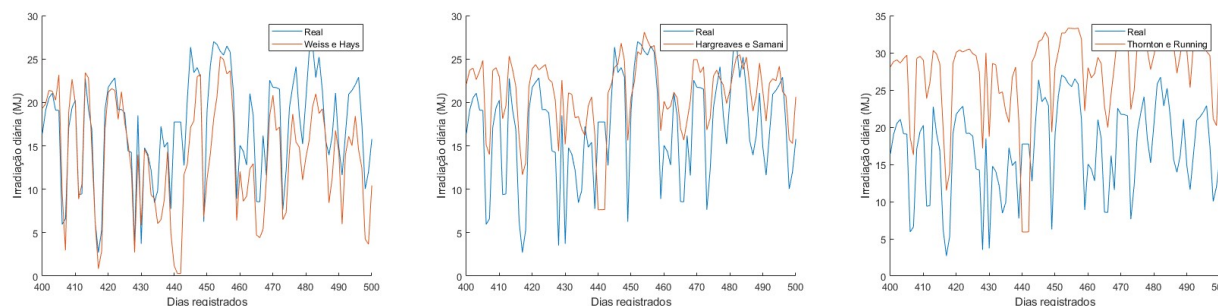


Figura 9 – Resultados dos modelos para a cidade de Sao Carlos



Fonte: Produzido pelo autor

Então, conclui-se que os modelos são adequados, isto é, os seus resultados acompanham os valores reais de irradiação solar incidente apenas deslocados no eixo das ordenadas.

Modelos numéricos podem ser ajustados para se adequar aos dados reais, assim é possível corrigir o deslocamento no eixo das ordenadas observado adicionando um coeficiente de ajuste aos modelos. Neste trabalho o coeficiente de ajuste escolhido foi a diferença entre as médias reais e a média de cada modelo, isto é dessa forma os resultados dos modelos serão deslocados de forma a se alinhar com os resultados dos dados reais.

Os resultados dos modelos ajustados estão registrados na Tabela 3, foram emitidas as médias dos modelos porque com os ajustes realizados os três modelos tem a mesma média para uma dada cidade e em seu lugar foi adicionado o ajuste de cada modelo.

Tabela 3 – Resultados dos modelos ajustados

Cidade	Irradiação	Ajuste	σ	<i>EMQ</i>	<i>d</i>	R^2
Avaré	Weiss e Hays	6.344	6.044	34.200	0.703	0.268
	Hargreaves e Samani	1.649	5.479	27.710	0.737	0.326
	Thornton e Running	-3.266	7.808	46.480	0.692	0.284
Barra Bonita	Weiss e Hays	1.187	5.472	38.995	0.673	0.226
	Hargreaves e Samani	-2.542	4.889	28.367	0.750	0.364
	Thornton e Running	-6.869	6.281	32.883	0.770	0.364
Bauru	Weiss e Hays	2.975	6.451	33.114	0.729	0.314
	Hargreaves e Samani	-0.980	5.729	23.664	0.787	0.410
	Thornton e Running	-5.342	7.813	40.406	0.736	0.357
Ibitinga	Weiss e Hays	3.764	5.977	28.752	0.767	0.367
	Hargreaves e Samani	0.463	4.973	16.653	0.847	0.557
	Thornton e Running	-3.205	6.764	23.657	0.838	0.516
Lins	Weiss e Hays	4.359	5.702	25.114	0.780	0.391
	Hargreaves e Samani	0.631	4.863	16.453	0.839	0.532
	Thornton e Running	-3.650	6.763	25.1584	0.820	0.480
Piracicaba	Weiss e Hays	5.209	6.626	36.330	0.709	0.285
	Hargreaves e Samani	1.286	5.613	25.533	0.761	0.367
	Thornton e Running	-2.690	8.055	46.519	0.702	0.308
São Carlos	Weiss e Hays	5.234	5.758	25.998	0.756	0.352
	Hargreaves e Samani	0.868	5.001	19.877	0.789	0.418
	Thornton e Running	-4.038	7.345	35.207	0.748	0.369

Fonte: Produzido pelo autor

Comparando os resultados dos modelos ajustados com os modelos inalterados nota-se que o ajuste aumentou a precisão de todos os modelos, isto é que os valores do índice de concordância de Willmott e do coeficiente de determinação aumentaram enquanto o erro médio quadrático diminuiu. Mas isso ocorreu desigualmente entre os modelos com os modelos de Weiss e Hays e Thornton e Running apresentando melhoria mais significativa que o modelo de Hargreaves e Samani.

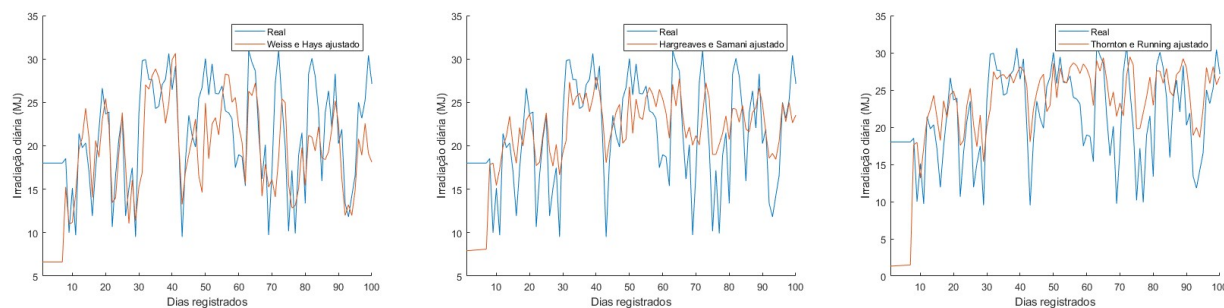
Nos resultados ajustados o modelo de Hargreaves e Samani continua sendo o mais preciso para todas as cidades, com exceção da cidade de Barra Bonita onde o modelo de Thornton e Running apresentou melhor desempenho com valor do coeficiente de determinação igual mas um índice de concordância de Willmott maior que o do modelo de Hargreaves e Samani. Enquanto os modelos de Weiss e Hays, e Thornton e Running apresentaram desempenho variado dependendo da cidade estudada com o modelo de Weiss e Hays apresentando melhor desempenho que o modelo de Thornton e Running para as cidade de Avaré, Piracicaba e São Carlos enquanto o modelo de Thornton e Running apresentou melhor resultado nas cidades de Barra Bonita, Bauru, Ibitinga e Lins.

Os resultados dos modelos alterados para cada cidade estão registrados nas Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

De acordo com os dados da Tabela 3 todos os modelos apresentaram melhoria em seu desempenho e observando as Figura 12, Figura 13 e Figura 14 os resultados dos modelos foram alinhados com os valores reais de irradiação solar mas o modelo de Hargreaves e Samani não acompanhou as maiores variações nos valores reais. Enquanto as Figura 10, Figura 11, Figura 15 e Figura 16 apresentam

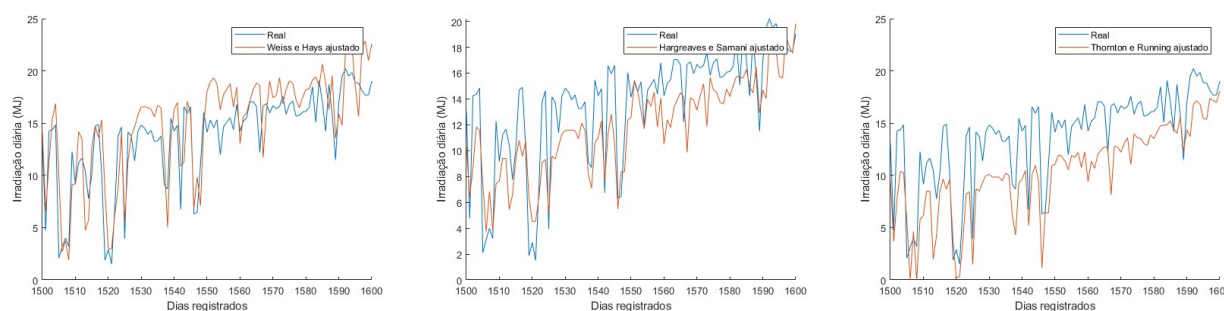
resultados desalinhados para os valores observados na tabela, como os resultados da Tabela 3 indicam melhoria no desempenho dos modelos isso significa que os modelos apresentam variações em seus desempenhos ao longo do período registrado.

Figura 10 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Avaré



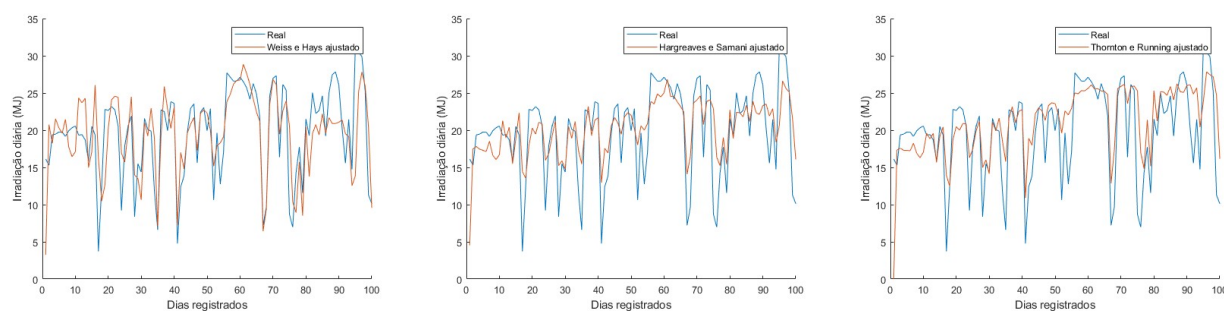
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 11 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Barra Bonita



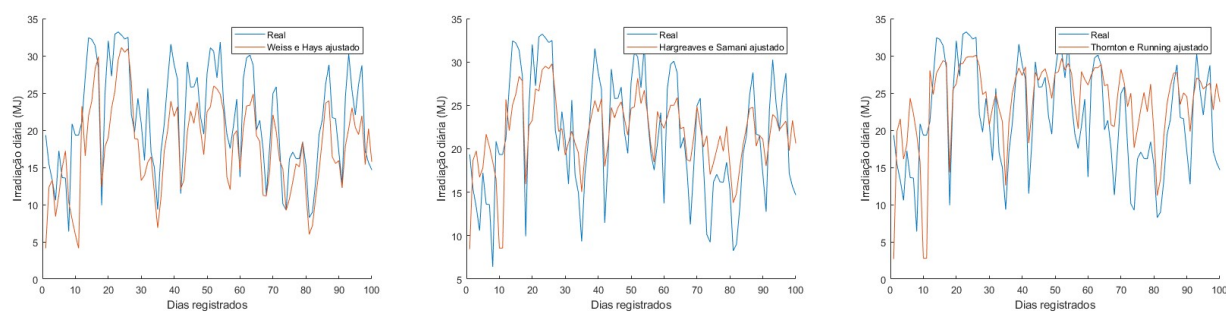
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 12 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Bauru



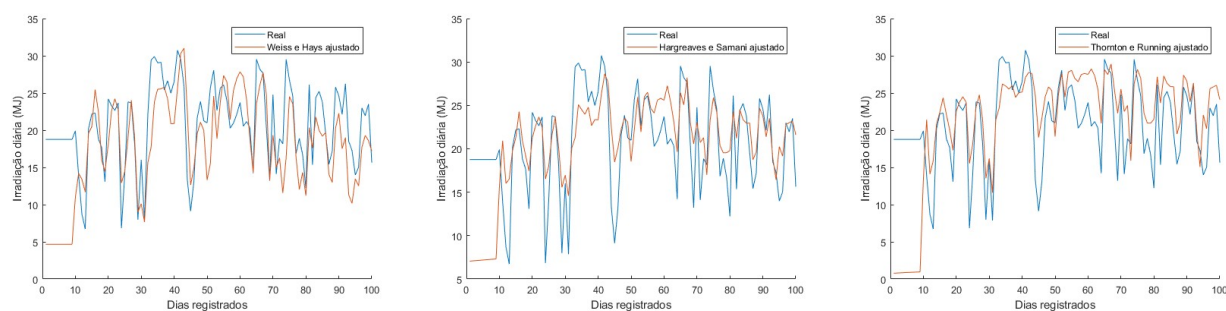
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 13 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Ibitinga



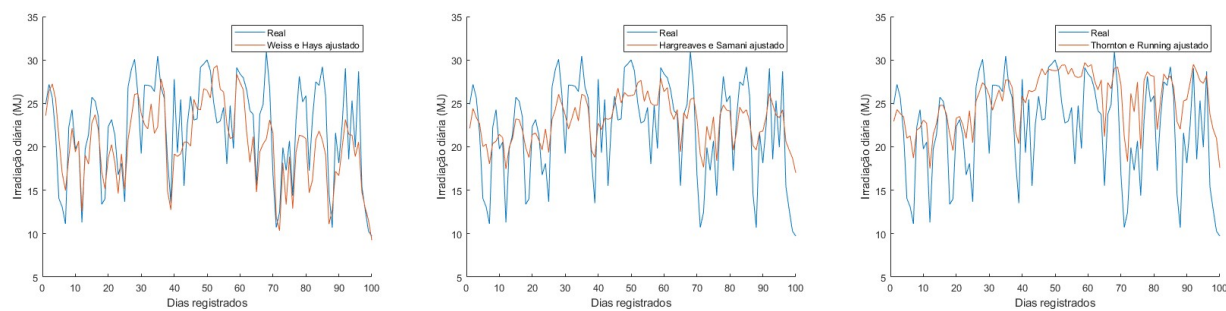
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 14 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Lins



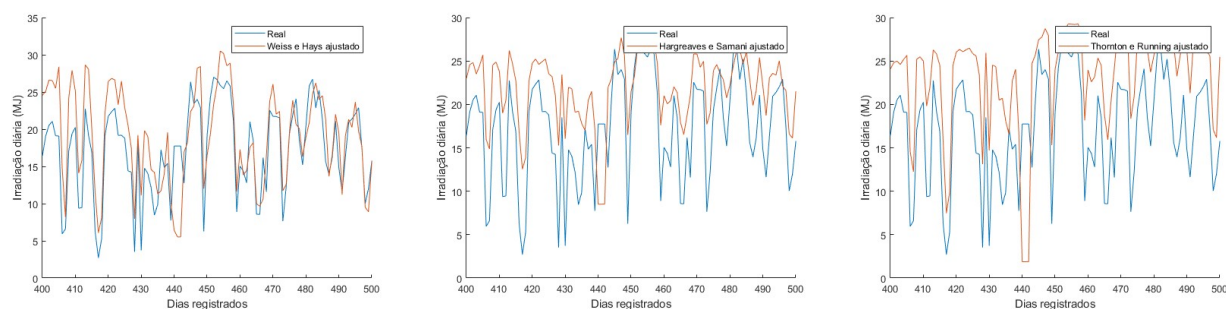
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 15 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de Piracicaba



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 16 – Resultado dos modelos ajustados para a cidade de São Carlos



Fonte: Produzido pelo autor

7 CONCLUSÃO

A estimativa da irradiação solar incidente é necessária para diversas aplicações pois a cobertura das estações meteorológicas que medem a irradiação solar é menor do que a das estações que medem apenas variáveis atmosféricas da região e também porque oferece a capacidade de prever futuros valores da irradiação solar na região.

Assim técnicas efetivas de estimar a irradiação solar se fazem necessárias e entre as diversas técnicas os modelos numéricos se destacam pela sua simplicidade e facilidade de uso, necessitando de menor poder computacional e dados de treinamento do que outras técnicas como as de aprendizado de máquina. Porém, modelos numéricos não são efetivos em toda a superfície terrestre e devem ser avaliados para cada região justificando assim a avaliação da efetividade de modelos numéricos para estimativa da irradiação solar incidente na região do centro do estado de São Paulo.

Isto foi feito utilizando dados meteorológicos históricos de sete cidades do estado de São Paulo disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, que foram utilizados na execução de três modelos numéricos: o modelo de Weiss e Hays, o modelo Hargreaves e Samani, e o modelo Thornton e Running. Inicialmente, apenas o modelo de Hargreaves e Samani apresentou bom desempenho enquanto os modelos de Weiss e Hays, e Thornton e Running apresentaram desempenhos piores com o modelo de Weiss e Hays estimando valores menores que os reais enquanto o modelo de Thornton e Running estimava valores maiores. Porém, uma análise mais aprofundada indicou que todos os modelos geraram resultados adequados, resultados que acompanham as variações dos valores reais, apenas deslocados dos valores reais no eixo das ordenadas. Para melhorar o desempenho dos modelos foi adicionado a cada modelo um coeficiente de ajuste relativo a cada cidade estudada e com a adição desses coeficientes todos os modelos tiveram suas precisões melhoradas, suas estimativas se aproximaram dos valores reais de irradiação solar.

As medidas de avaliação utilizadas indicaram que todos os modelos ajustados tiveram bom desempenho, com altos valores do índice de concordância de Willmott e do coeficiente de determinação indicando boa concordância entre os valores reais e estimados, e que o modelo de Hargreaves e Samani tem a maior precisão para todas as cidades exceto Barra Bonita, onde o modelo de Thornton e Running o supera. Porém, enquanto o modelo de Hargreaves e Samani é o mais preciso para a região do centro do estado de São Paulo ele não acompanha grandes variações nos valores reais de irradiação solar, e o modelo de Weiss e Hays e o modelo de Thornton e Running apresentam efetividade variada para o período estudado.

Assim, concluiu-se que os modelos numéricos estudados neste trabalho são capazes de estimar a irradiação solar na região central do estado de São Paulo já que apresentam altos valores do índice de concordância de Willmott e do coeficiente de determinação. Contudo, nenhum modelo é ideal já que todos possuem desempenho variado ao longo dos dados utilizados para validação.

Assim, em trabalhos futuros sobre a estimativa da irradiação solar para a região do estado de São Paulo os modelos estudados podem ter variáveis atmosféricas, como a cobertura de nuvens, adicionadas para aumentar a precisão sua precisão porque assim eles poderiam acompanhar as variações nos dados

reais causados por mudanças atmosféricas que os modelos estudados não acompanham. Também, trabalhos futuros devem utilizar técnicas de ajuste mais refinadas que a utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AKINOGLU, B. G.; ECEVIT, A. A further comparison and discussion of sunshine-based models to estimate global solar radiation. **Energy**, Elsevier, Ankara, Turkey, v. 15, n. 10, p. 865–872, 1990. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/036054429090068D>> Acessado em: 19/11/2023.
- ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, American Society of Civil Engineers, Logan, Utah, v. 122, n. 2, 1996. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/245508337_Assessing_Integrity_of_Weather_Data_for_Use_in_Reference_Evapotranspiration_Estimation> Acesso em: 22/08/2023.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C.; BENITO, M. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in madrid (spain). **Applied Energy**, Elsevier, Madri, Espanha, v. 88, n. 5, p. 1703–1709, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910004666>> Acessado em: 28/10/2023.
- AMPRATWUM, D. B.; DORVLO, A. S. S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. **Applied Energy**, Elsevier, Al-khod, Omã, v. 63, n. 3, p. 161–167, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261999000252>> Acessado em: 19/11/2023.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society**, Royal Meteorological Society, Reino Unido, v. 50, n. 210, p. 121–126, 1924. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49705021008>> Acessado em: 19/11/2023.
- BELUCIO, L. P.; DA SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. d. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para macapá (ap). **Revista Brasileira de Meteorologia**, Scientific Electronic Library Online, Macapá, Amapá, v. 29, n. 4, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/pD8ZJN9LPWZjxyg9Nn7KSYQ/#>> Acessado em: 22/10/2023.
- BERUSKI, G. C.; PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em ponta grossa, pr, brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Scientific Electronic Library Online, v. 30, n. 2, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/DffWSTtL9mTjm7N57sqy5HG/#>> Acessado em: 16/10/2023.
- BORGES, V. P.; DE OLIVEIRA, A. S.; FILHO, M. A. C.; DA SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em cruz das almas, bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, v. 14, n. 1, p. 74–81, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/jBFvhD6zLNKbDTPQ4wzJQ8N/?lang=pt&format=html#>> Acesso em: 22/08/2023.
- BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, Amesterdã, Holanda, v. 31, n. 1, p. 159–166, 1984. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192384900170>> Acesso em: 22/08/2023.
- 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**, Elsevier, Lanzhou, China, v. 45, n. 11-12, p. 1759–1769, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040300270X>> Acessado em: 19/11/2023.

DOS SANTOS, C. M.; DE SOUZA, J. L.; JUNIOR, R. A. F.; TIBA, C.; DE MELO R, O.; LYRA, G. B. a.; TEODORO, I.; LYRA, G. B. b.; LEMES, M. A. M. On modeling global solar irradiation using air temperature for alagoas state, northeastern brazil. **Energy**, Elsevier, Maceió, Alagoas, v. 71, n. 1, p. 388–398, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214005507?via%3Dihub>> Acessado em: 29/10/2023.

ELAGIB, N. A.; MANSELL, M. G. New approaches for estimating global solar radiation across sudan. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, Paisley, Escócia, Reino Unido, v. 41, n. 5, p. 419–434, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001235>> Acessado em: 19/11/2023.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for antalya (turkey). **Energy Conversion Management**, Elsevier, Antalya, Turquia, v. 41, n. 4, p. 311–330, 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001272>> Acessado em: 19/11/2023.

GOMEZ, J. M. R.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; DA SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, v. 40, n. 3, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/DfZGpdWH53yHvvj9kwjMqqt/?lang=pt#>> Acesso em: 22/08/2023.

GOODIN, D. G.; HUTCHINSON, J. M. S.; VANDERLIP, R. L.; KNAPP, M. C. Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**, Wiley, Kansas, EUA, v. 91, n. 5, p. 845–851, 1999. Disponível em: <<https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj1999.915845x>> Acessado em: 19/11/2023.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the irrigation and Drainage Division**, American Society of Civil Engineers, Missoula, USA, v. 108, n. 3, p. 225–230, 1982. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JRCEA4.0001390>> Acesso em: 22/08/2023.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H. Irrigation water requirements for senegal river basin. **Journal of the irrigation and Drainage Division**, Royal Meteorological Society, Reino Unido, v. 111, n. 3, p. 265–275, 1985. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%281985%29111%3A3%28265%29>> Acessado em: 19/11/2023.

HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, Ontário, Canadá, v. 91, n. 3-4, p. 293–300, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192398000550>> Acessado em: 19/11/2023.

JONG, R. D.; STEWART, D. W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western canada. **Canadian Journal of Plant Science**, Canadian Science Publishing, Ontário, Canadá, v. 73, n. 2, p. 509–518, 1993. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjps93-068>> Acessado em: 19/11/2023.

LEGATES, D. R.; JUNIOR, G. J. M. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, American Geophysical Union, Louisiana, EUA, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1998WR900018>> Acessado em: 15/09/2023.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B. Global solar radiation models in minas gerais, southeastern brazil. **Advances in Meteorology**, Hindawi, Itajubá, Minas Gerais, v. 2019, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/amete/2019/9515430/>> Acessado em: 16/10/2023.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. d. O. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo, SP: Saraiva, 2010. Disponível em: <<https://libgen.is/book/index.php?md5=057E0E80811AF8A60739FF773D7015D0>> Acessado em: 23/10/2023.

NEWLAND, F. J. A study of solar radiation models for the coastal region of south china. **Solar Energy**, Elsevier, Hong Kong, v. 43, n. 4, p. 227–235, 1989. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X89900224>> Acessado em: 19/11/2023.

SUPIT, I.; KAPPEL, R. R. V. A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, Elsevier, Haia, Holanda, v. 63, n. 3, p. 147–160, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X98000681>> Acessado em: 29/10/2023.

THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. **Agricultural and forest meteorology**, Elsevier, Missoula, USA, v. 93, n. 4, p. 211–228, 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192398001269>> Acesso em: 22/08/2023.

WEISS, A.; HAYS, C. J. Simulation of daily solar irradiance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, Nebraska, USA, v. 123, n. 3-4, p. 187–199, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192303002946?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7fc6f32d0afd6055> Acesso em: 22/08/2023.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; HU, Q.; EASTERLING, W. E. Incorporating bias error in calculating solar irradiance. **Agronomy Journal**, Wiley, Nebraska, EUA, v. 93, n. 6, p. 1321–1326, 2001. Disponível em: <<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2001.1321>> Acessado em: 19/11/2023.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Center for Climatic Research, University of Delaware, Delaware, EUA, v. 2, n. 2, 1981. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/Suman-Maity-3/post/Query-regarding-Index-of-Agreement-Calculation/attachment/5d471fe7cfe4a7968dbccac6/AS%3A788239338205184%401564942311802/download/wilmott1981.pdf>> Acessado em: 31/10/2023.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **American Meteorological Society**, Center for Climatic Research, University of Delaware, v. 63, n. 11, 1982. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/63/11/1520-0477_1982_063_1309_scoteo_2_0_co_2.xml> Acessado em: 22/10/2023.