



**MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E ANÁLISE
ESTATÍSTICA EM DEZ CIDADES DO ESTADO DO PARÁ – BRASIL**

Alexandre Miguel da Cruz Valente

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Diego Cardoso Estumano

Belém

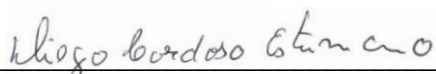
Janeiro de 2022

**MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E ANÁLISE
ESTATÍSTICA EM DEZ CIDADES DO ESTADO DO PARÁ – BRASIL**

Alexandre Miguel da Cruz Valente

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



Prof. Diego Cardoso Estumano, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



Prof. Bruno Marques Viegas, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Prof. Emerson Cardoso Rodrigues, Dr.
(FEQ/ITEC/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

JANEIRO DE 2022

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA**

Valente, Alexandre Miguel da Cruz, 1992-
Modelos de estimativa de radiação solar global e análise
estatística em dez cidades do estado do Pará - Brasil /
Alexandre Miguel da Cruz Valente - 2022.

Orientador: Diego Cardoso Estumano

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade
Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Processos, 2022.

1. Radiação Solar Global 2. Modelos de estimativa 3.
Análise estatística I. Título

CDD 670.42

*Dedico este trabalho a minha família por
todo apoio e motivação.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por me guiar nesta jornada.

As minhas filhas Amanda e Ana Luísa que são minha motivação. A minha esposa Luanna por todo incentivo e apoio para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Gabriela e Miguel, à minha irmã Alessandra, por terem dado todo o suporte necessário na minha formação como pessoa e não mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

Ao Prof. Diego Estumano, meu orientador, a quem tenho muita gratidão por todo o apoio, confiança e contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e professores do PPGEP.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz...”

(Bill Gates)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA EM DEZ CIDADES DO ESTADO DO PARÁ – BRASIL

Alexandre Miguel da Cruz Valente

Janeiro/2022

Orientador: Diego Cardoso Estumano

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Estimar a radiação solar é importante para vários segmentos da sociedade como agricultura, meteorologia e geração de energia elétrica (sistemas fotovoltaicos). Este trabalho tem como objetivo estimar a Radiação Solar Global em dez cidades do estado do Pará - Brasil, por meio de modelos de estimativas, Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell, usando dados meteorológicos fornecidos pelas Estações Meteorológicas Automáticas, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), comparar os valores observados e estimados e analisar qual modelo melhor se adequa à região, através dos parâmetros Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Willmott (d), Coeficiente de correlação de Person (r), Índice de Confiança ou de desempenho (c) e Raiz do Erro Médio Quadrático Relativo ($rRMSE$). Os resultados mostraram que os modelos são satisfatórios e podem ser utilizados para estimar a Radiação Solar Global na região estudada. No entanto para o período menos chuvoso, de junho a novembro, houve uma superestimativa em todas as cidades. A estação de Castanhal foi a que possuiu menor média de radiação solar global em relação às demais estações com média de radiação diária igual $15,06 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}$, enquanto que a cidade de Redenção apresentou a maior média diária, $18,33 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}$. A cidade de Tomé Açu apresentou melhores ajustes dos modelos referentes aos valores observados, visto que para o modelo H-S, o índice de confiança foi considerado muito bom, c igual a $0,78$, e o $rRMSE$ foi considerado excelente, igual a $9,93\%$. Já para o modelo B-C para essa estação, o índice

de confiança e o rRMSE foram considerados bons, com c igual a 0,71 e rRMSE igual 19,14%.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**ESTIMATION MODELS OF GLOBAL SOLAR RADIATION AND
STATISTICAL ANALYSIS IN TEN CITIES IN THE STATE OF PARÁ –
BRAZIL**

Alexandre Miguel da Cruz Valente

January/2022

Advisor: Diego Cardoso Estumano

Research Area: Process Engineering

Estimating solar radiation is important for various segments of society such as agriculture, meteorology and electricity generation (photovoltaic systems). This work aims to estimate the Global Solar Radiation in ten cities in the state of Pará - Brazil, using estimation models, Hargreaves-Samani and Bristow-Campbell, using meteorological data provided by Automatic Meteorological Stations, belonging to the National Institute of Meteorology (INMET), to compare the observed and estimated values and analyze which model best fits the region, through the parameters Coefficient of Determination (R^2), Willmott Index (d), Pearson correlation coefficient (r) and Relative Root Mean Squared Error (rRMSE). The results showed that the models are satisfactory and can be used to estimate the Global Solar Radiation, however for the less rainy period there was an overestimation, between June and November. The Castanhal station had the lowest average global solar radiation compared to the other stations with an average daily radiation equal to 15.06 MJ/m².day, while the city of Redenção had the highest daily average, 18.33 MJ /m².day. The city of Tomé Açu presented better fit of the models referring to the observed values, since for the HS model, the confidence index was considered very good, c equal to 0.78, and the relative RMSE was considered excellent, with rRMSE equal to 9.93%. For the B-C model for this station, the confidence index and the relative RMSE were considered good, c equal to 0.71 and rRMSE equal to 19.14%.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 - OBJETIVOS.....	3
1.2.1 - Objetivo geral.....	3
1.2.2 - Objetivos específicos.....	3
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 - ESTUDOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR.....	6
2.2 - RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA.....	8
2.3 - MODELO DE ESTIMATIVA HARGREAVES-SAMANI.....	9
2.4 - MODELO DE ESTIMATIVA BRISTOW-CAMPBELL.....	10
2.5 - RADIAÇÃO SOLAR E O CLIMA DO ESTADO DO PARÁ.....	11
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Espectro radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.....	6
Figura 3.1	Mapa do estado do Pará com a distribuição geográfica das dez estações estudadas neste trabalho.....	14
Figura 3.2	Fluxograma com tema central do trabalho, desde a obtenção de dados meteorológicos até a análise estatística dos modelos de estimativa utilizados.....	16
Figura 4.1	Média mensal de Radiação Solar Global (RSG) observada e estimada pelos modelos H-S e B-C nas dez cidades estudadas.....	23
Figura 4.2	Relação entre a Radiação Solar Global Observada e Estimada pelo Modelo H-S.....	24
Figura 4.3	Relação entre a Radiação Solar Global Observada e Estimada pelo Modelo B-C.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Municípios do estado do Pará e suas respectivas localizações geográficas e o período estudado.....	14
Tabela 3.2	Relação de número de amostras que apresentaram leituras consistentes de temperaturas nas dez cidades analisadas.....	15
Tabela 3.3	Valores de Radiação Solar Global máximo, mínimo e médios em cada uma das dez cidades estudadas.....	17
Tabela 3.4	Classificação do índice de confiança ou desempenho (c).....	19
Tabela 3.5	Classificação do RMSE relativo (rRMSE).....	20
Tabela 4.1	Média diária da radiação solar global nas cidades estudadas durante o ano de 2020.....	21
Tabela 4.2	Parâmetros estatísticos entre valores observados e estimados pelos modelos H-S e B-C.....	27

NOMENCLATURA

ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
ENOS	EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
INMET	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA.
INPE	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
LI	LINHAS DE INSTABILIDADE
ONS	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO
SIN	SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL
ZCIT	ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a geração de energia elétrica por meio da energia solar tem chamado atenção do meio científico, pois se trata de uma fonte de energia limpa, renovável e sustentável, segundo ALBENUOR *et al.* (2018). O estudo da radiação solar é importante para vários segmentos da sociedade, podendo ser explorado para fins da agricultura, sistemas fotovoltaicos e estudos climatológicos em geral. Para o estudo de tecnologias baseadas em energia solar como energia térmica e sistemas fotovoltaicos, informações da radiação solar em determinadas localidades é de fundamental importância, conforme JAMIL *et al.* (2016). Além das condições climáticas da região, outros fatores importantes para determinação da radiação solar global por meio de modelos de estimativas são a localização (latitude e longitude) e o dia do ano da estimativa, segundo IQBAL (1983).

Em 2017, O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017) publicou a 2ª edição do Atlas Brasileiro da Energia Solar, que destaca o grande potencial solar do país, em todas as regiões do país, o que propicia ao meio científico uma vasta área de estudo de sistemas de energia renovável em prol de desenvolvimento científico, econômico e ambiental no país. O aproveitamento da energia solar no Brasil, em diferentes segmentos, tem sido massivamente estudado por diversos autores como FERNANDES *et al.* (2018), MARTINS *et al.* (2004), SANTOS, *et al.* (2021) e MOREIRA JÚNIOR e SOUZA (2018).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), atualmente o Brasil possui matriz energética com capacidade instalada de 176 Giga Watts, dividida entre fontes renováveis, correspondente a 83,24% da capacidade instalada, e não renováveis, correspondente a 16,76% da capacidade instalada. Dentre as fontes renováveis, destacam-se a geração hídrica, eólica e por biomassa, com valores percentuais de potências instaladas iguais a 61,98%, 10,61% e 8,71%, respectivamente; enquanto que a geração por meio de sistemas fotovoltaicos, que utiliza a energia do sol, representa apenas 1,94% do total. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2021), o Sistema Interligado Nacional (SIN) é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a Norte – esta última com predominância de usinas hidrelétricas. Em tempo de estiagem, principalmente no Sul e

Sudeste, naturalmente as hidrelétricas produzem menos energia, então, para manter equilíbrio de geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional, é aumentada a capacidade de produção de energia por meio das usinas termelétricas – gerando mais custos no processo, valor este que é repassado ao consumidor final por meio de taxas extras referentes às bandeiras tarifárias estipuladas pela ANEEL. Além da geração de energia elétrica ficar mais cara, as usinas termelétricas emitem gases poluentes para a atmosfera, gerando desequilíbrios nos âmbitos econômicos e ambientais.

O desenvolvimento sustentável de um país está diretamente relacionado à sua capacidade de inovação e desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento de recursos energéticos naturais, gerando crescimento econômico diretamente proporcional à crescente demanda de energia. Neste sentido, a energia solar pode ser tratada como uma fonte viável e complementar de energia elétrica, oferecendo produção local ou por meio de grandes sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia, a fim de reduzir a dependência dos tempos de estiagens, no caso das hidrelétricas, e diminuir a poluição da atmosfera e redução de custos no caso da geração de energia pelas termelétricas.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o estado do Pará possui área aproximada de 1.245.000 km², situado na região Norte do Brasil – localizado próximo à linha do Equador, o que eleva as temperaturas no estado. Os ambientes tropicais são caracterizados pela elevada incidência de radiação solar e temperatura, e quanto mais próximo à linha do Equador, maior é a incidência, é o que ocorre nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil (SANTOS *et al.*, 2009; BAYER, 2004; BLEY JR., 1999). Por esse motivo, é importante estimar valores de radiação para futuras análises de potencial da geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos em diferentes cidades do estado. Para tanto, se faz necessário uso de modelos de estimativas, utilizando dados climatológicos do estado do Pará, utilizando como base dados exportados do Instituto Nacional de Meteorologia. Os avanços tecnológicos no mundo impulsionam a busca por fontes de energia renovável e uma das formas mais atrativas hoje é aproveitar a energia do sol, fonte limpa, inesgotável e gratuita.

1.1 - MOTIVAÇÃO

A predição da radiação solar é uma tarefa difícil, visto que em localidades remotas dificilmente há estação meteorológica com informações completas de parâmetros climatológicos devido ao grande custo de implantação e manutenção dessas estações. Dentre os principais desafios para obtenção de dados da radiação solar nas regiões do Brasil é o alto custo de manutenção de estações meteorológicas, a correta instalação dos equipamentos e também a interpretação dos valores obtidos, conforme ANDRADE JÚNIOR *et al.* (2012). Segundo MOHANTY e PATRA (2021), a radiação solar global é medida em vários locais, onde há instrumentos instalados e depois pode ser estimada em regiões próximas onde não há esses equipamentos de medição. Os autores afirmam que conhecendo as técnicas de estimativas e adaptando-as às particularidades das áreas a serem estudadas, com suas condições climatológicas, é possível simular as radiações direta, difusa ou global. Ao redor do mundo, há diversos estudos da estimativa da radiação solar global, como pode ser visto em LURWAN *et al.* (2014), BUDIYANTO e LUBIS (2020), HAI *et al.* (2020), IKOTONI *et al.* (2019) e EDDINE e CHEHADE (2016). Já no Brasil, alguns autores também desenvolveram diferentes pesquisas e tipos de modelagens e parâmetros climatológicos para estimar a radiação solar, tais como BELÚCIO *et al.* (2014), RAMOS *et al.* (2018), LOPES JÚNIOR *et al.* (2021), FERNANDES *et al.* (2018), DOS SANTOS *et al.* (2018) e BERUSKI *et al.* (2015).

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

Estimar a disponibilidade da radiação solar global em dez cidades do estado do Pará: Belém, Castanhal, Novo Repartimento, Redenção, Dom Eliseu, Santana do Araguaia, Óbidos, Tucuruí, Medicilândia e Tomé Açu, tendo como objetivo principal analisar o recurso solar nestas cidades a partir de dados meteorológicos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e analisar estatisticamente os valores preditos pelos modelos de estimativas com os valores observados na estação meteorológica automática.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Parametrizar os modelos de estimativa da radiação solar global para as cidades analisadas, a partir de dados meteorológicos disponibilizados pelo INMET;
- Avaliar o desempenho de modelos de estimativas a partir da comparação com os dados observados, bem como o desempenho entre os modelos;
- Validar os modelos com base em indicativos estatísticos;
- Indicar o melhor modelo entre os analisados para a estimativa da radiação solar global nas cidades estudadas.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

O estudo propõe analisar o comportamento da radiação solar global no estado do Pará, por meio de dados climatológicos obtidos pelas Estações Meteorológicas Automáticas do INMET, utilizando modelos de estimativa de radiação solar global. É possível verificar quais os meses com as maiores e menores incidências de radiação nas localidades estudadas, correlacionando-as com os períodos chuvosos e menos chuvosos na região amazônica. Com análise entre os valores observados e estimados, é possível analisar os modelos estudados a fim de que o modelo que apresentar o melhor desempenho na região possa servir de base para implementação de projetos de usinas fotovoltaicas, na agricultura ou em estudos climatológicos em geral.

Esta proposta de calibração de modelos de estimativa de radiação solar global em cidades do estado do Pará facilitará, confiabilidade e mais assertividades nos projetos de implantação de usinas fotovoltaicas, em sistemas de agricultura que necessitam de energia solar ou em estudos gerais de climatologia na região.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos: introdução, revisão da literatura, materiais e métodos, resultados e discussões e, conclusão.

O capítulo 1 apresenta a motivação, os objetivos, as contribuições da dissertação e a forma de organização do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre estudos da estimativa de radiação solar global, parâmetros estatísticos e técnica Aproximação Bayesiana Computacional.

O capítulo 3 trata dos procedimentos metodológicos utilizados no trabalho: obtenção e tratamento dos dados meteorológicos das cidades em estudo, implementação computacional dos modelos de estimativa, análise de indicadores estatísticos para validação dos modelos.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões das análises estatísticas e validação dos modelos de estimativa.

O capítulo 5 trata das considerações finais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - ESTUDOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

A energia irradiada pelo Sol cobre uma grande faixa do espectro eletromagnético, conforme a Figura 2.1. Em torno de 81% da energia que chega ao Sistema Terra/Atmosfera está em uma faixa de comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho. Essa energia alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos. Dentre os processos naturais, a fotossíntese (a produção de biomassa), o ciclo do hidrogênio (evaporação/precipitação), a dinâmica da atmosfera e oceanos (ventos e correntes oceânicas) são exemplos com os quais estamos interagindo de forma rotineira, conforme PEREIRA *et al.* (2017).

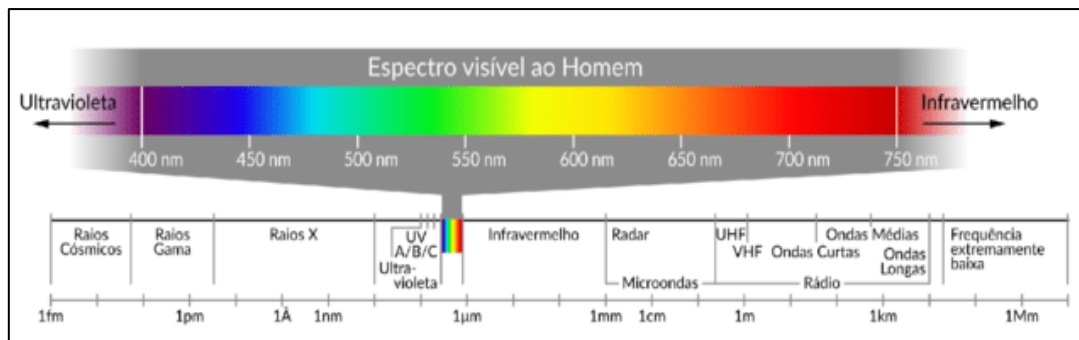


Figura 2.1 – Espectro radiação solar incluindo detalhamento da faixa visível humana.

Fonte: PEREIRA *et al.* (2017).

A fim de obter melhor aproveitamento da energia do Sol, é relevante conhecer a disponibilidade e a variabilidade desta fonte em determinada localidade. Para isto, faz-se necessário o estudo das características do elemento Sol, bem como a trajetória da radiação solar até atingir a superfície do planeta Terra, conhecendo suas componentes de radiação: a global, direta e difusa (ZANG *et al.*, 2020). A radiação solar difusa é a radiação que incide na superfície de forma espelhada, enquanto que a radiação solar direta incide perpendicularmente na superfície, e a radiação solar global ou total é a soma das radiações difusa e direta (GUL KAPLAN e ALPER KAPLAN, 2020). Outro

fator importante para estimativa de radiação solar global é estudar as relações astronômicas Terra-Sol, tais como coordenadas geográficas e coordenadas celestes.

As relações geométricas entre um plano e sua orientação relativa à Terra, e a radiação solar incidente é descrita por meio de ângulos (BENFORD e BOCK, 1939), dentre os quais para este estudo são considerados, basicamente:

Φ – Latitude, posição angular norte ou sul em relação ao Equador, sendo o norte positivo e o sul negativo, estes valores variam entre $-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$. Cada cidade/estação possui uma latitude;

σ – Declinação Solar, representa a posição angular do Sol ao meio-dia solar, ou seja, quando o Sol está sobre o meridiano local, com relação ao plano do Equador. Este valor varia ao longo do ano, entre $-23,45^\circ \leq \sigma \leq 23,45^\circ$. O valor deste ângulo determina a data do Solstício de verão (quando σ é igual a $-23,45^\circ$, no qual o dia é mais longo que a noite), Solstício de inverno (quando σ é igual a $23,45^\circ$, no qual a noite é mais longa que o dia) e os Equinócios (quando σ é igual a 0° , caracterizado pelo dia e a noite possuírem a mesma duração).

H – Ângulo horário, caracterizado pelo ângulo medido no polo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol.

O aproveitamento eficiente do potencial energético solar está relacionado ao conhecimento das variações espaciais e evolução sazonal da radiação solar incidente na superfície terrestre. Os modelos de estimativa são desenvolvidos em razão da necessidade de obter dados de radiação solar global em determinada localidade, por meio de parâmetros climatológicos, tais como dados de insolação, horas de brilho do sol e temperaturas máximas e mínimas, a fim de auxiliar na montagem de séries de informações ou estimar dados “perdidos” em séries já feitas. De acordo com PAES *et al.* (2018), existem muitos modelos estatísticos para estimar radiação solar global, um deles é o modelo de Angstrom-Prescott (A-P), que estima a radiação solar global a partir da medida do brilho do sol. Esse modelo é obtido por regressão linear, porém é necessário o instrumento chamado heliógrafo que além de ter alto custo, possui limitações experimentais, tais como a falta de precisão por elevada umidade relativa do ar em regiões tropicais, fator pelo qual esse modelo é descartado neste trabalho, já que o estado do Pará possui altas temperaturas e umidade relativa do ar elevada.

O trabalho de AL-HAJJ *et al.* (2016), no Reino Unido, utilizou dados climatológicos para implementar um modelo de regressão não-linear e posteriormente otimizar o modelo com a técnica computacional de algoritmo genético. O objetivo dos

autores foi estimar a radiação solar global e validar o modelo que mais se adequou com os dados observáveis e otimizar parâmetros de outros modelos para que suas estimativas ficassem mais próximos dos valores observados. Já o estudo de HAI *et al.* (2020) estimou a radiação solar global com métodos puramente estatísticos, utilizando dados climáticos no país Algeria, região norte do continente africano. O desempenho do modelo de linguagem de programação utilizada pelos autores consiste na avaliação de regressões lineares múltiplas, modelo auto-regressivo integrado de médias móveis, por meio dos quais detalhou e analisou os parâmetros estatísticos encontrados, tais como Raiz do Erro Médio Quadrático e Erro Médio Absoluto.

No Brasil, FERNANDES *et al.* (2018) avaliou o desempenho de modelos de estimativa de radiação solar baseados em dados de temperatura em cidades do estado de Goiás. O desempenho dos modelos na calibração e validação foi avaliado por meio do coeficiente de determinação, erro quadrático médio, erro relativo quadrático médio, erro médio absoluto e pela eficiência do modelo por meio do método de Nash-Stucliff. Já o trabalho de RAMOS *et al.* (2018), avaliou os modelos de Hargreaves & Samani e Bristow-Campbell estudados em diferentes regiões do Brasil, foram analisados parâmetros estatísticos entre os valores observados e estimados, tais como índice estatístico de precisão (r^2), acurácia (d) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

2.2 - RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

A variação da radiação solar no topo da atmosfera (R_0) é atribuída a diversos fatores, tais como presença de partículas de gases na atmosfera (H_2O , O_3 , aerossóis, etc), nebulosidade, e posição aparente do sol, conforme DUFFIE *et al.* (1994). De acordo com IQBAL (1983), a radiação solar no topo da atmosfera (R_0) é definida pela Eq. (2.1), cuja unidade é $MJ/m^2 \cdot d^1$:

$$R_0 = 37,6 E_0 \left(\frac{\pi}{180} H \sin \varphi \sin \sigma + \cos \varphi \cos \sigma \sin H \right) \quad (2.1)$$

Onde:

$$E_0 = 1 + 0,0033 \cos \left(\frac{2 \pi dn}{365} \right) \quad (2.2)$$

$$\sigma = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + dn) \right] \quad (2.3)$$

$$H = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\sigma)) \quad (2.4)$$

Sendo:

R_0 = Radiação Solar no topo da atmosfera [$MJ/m^2 \cdot d^1$];

E_0 = Raio vetor da órbita terrestre, dado em Unidade Astronômica;

φ = Latitude do local, dado Graus decimais;

σ = Declinação solar, dado em Graus, é considerada a latitude em que se encontra o Sol, variando entre $-23,45^\circ C$ e $+23,45^\circ C$ ao longo do ano, calculado pela Eq. (2.3);

H = Ângulo horário, que é medido no polo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol, dado em Graus;

dn = dia Juliano, ou dia do ano.

Na Eq. (2.1), o termo E_0 é o raio vetor da órbita terrestre ou também chamada de distância relativa Terra-Sol média diária que pode ser calculada pela Eq. (2.2), de unidade astronômica. O termo φ da Eq. (2.1) é a latitude do local, em grau. O termo σ é a declinação solar, posição angular do Sol com relação ao plano do Equador, norte positivo, que ao longo do ano varia entre $-23^\circ C$ e $+23^\circ C$, calculada pela eq. (2.3), cuja unidade é grau. O termo dn na Eq. (2.2) é o dia do ano ou dia Juliano. De acordo com FATTORI e CEBALLOS (1997), o ângulo horário (H) é medido no polo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol. O ângulo horário (H), dado em grau, é apresentado pela Eq. (2.4).

2.3 - MODELO DE ESTIMATIVA HARGREAVES e SAMANI (MODELO H-S)

O modelo proposto pelos autores HARGREAVES e SAMANI (1982) é um dos mais citados na literatura mundial, apresentando bom desempenho em todas as regiões estudadas, desde que sejam considerados os fatores climáticos como nebulosidade e umidade capazes de influenciar a amplitude térmica em determinado local. Este modelo assume que a diferença de temperatura diária está diretamente relacionada à fração da radiação solar no topo da atmosfera que atinge a superfície terrestre. Segundo os autores deste modelo, fatores como latitude, altitude, proximidade de grandes massas de água

também podem ser determinantes nos valores da radiação solar global na superfície. Por isso, os autores deste modelo incluíram um fator de ajuste regional (K_t), a fim de reduzir os impactos desses fatores, recomendando para regiões situadas no interior do continente o valor de 0,162 e para localidades próximas de grandes massas de água ou litorânea 0,19.

O modelo de Hargreaves e Samani é descrito pela Eq. (2.5), o qual relaciona o fator de ajuste regional (K_t), a radiação solar no topo da atmosfera e a amplitude térmica diária.

$$R_g = R_0 K_t \sqrt{\Delta T} \quad (2.5)$$

Na Eq. (2.5) o termo R_g é radiação solar global diária na superfície ($MJ/m^2.d^1$), o termo R_0 é a radiação solar no topo da atmosfera ($MJ/m^2.d^1$), esta é calculada em função da latitude e dia do ano, o termo K_t é o fator de ajuste regional (adimensional) e o ΔT é a amplitude térmica diária ($^{\circ}C$).

O estudo de RIVERO *et al.* (2017) fez a estimativa da radiação solar global utilizando o modelo Hargreaves e Samani em regiões do México e, no tratamento dos dados climatológicos trabalhados, filtrou as condições dos dados para evitar inconsistências, observando temperatura com valores condizentes com a região: temperaturas não podem ser superiores a $70^{\circ}C$ nem inferiores a $-50^{\circ}C$, radiação solar não pode exceder a constante solar nem apresentar valores negativos, radiação Solar Global não pode exceder a Radiação Solar Extraterrestre, também chamada de Radiação no Topo da Atmosfera. O modelo de HARGREAVES e SAMANI (1982) é amplamente estudado ao redor do mundo, por diversos autores que trabalham com estimativa da radiação solar global, tais como visto em IHADDADENE *et al.* (2018), OSORNIO *et al.* (2016), RIVERO *et al.* (2017) e RAMOS *et al.* (2018).

2.4 - MODELO DE ESTIMATIVA BRISTOW e CAMPBELL (MODELO B-C)

O modelo proposto pelos autores BRISTOW e CAMPBELL (1984) relaciona a amplitude térmica e a Radiação Solar Global por meio de três parâmetros de ajuste regionais (A, B e C) e a radiação solar extraterrestre, mostrado na Eq. (2.6).

$$R_g = R_0 A [1 - e^{(-B \Delta T)^C}] \quad (2.6)$$

Na Eq. (2.6), o termo R_g é a estimativa da radiação solar global ($MJ/m^2 \cdot d^1$), o termo R_0 é a radiação solar no topo da atmosfera ($MJ/m^2 \cdot d^1$), o ΔT é a amplitude térmica diária ($^{\circ}C$), os coeficientes A, B e C são parâmetros empíricos recomendados pelos autores que devem ser ajustados para cada região e época do ano.

Os valores recomendados por BRISTOW e CAMPBELL (1984) dos parâmetros são A igual 0,7, o valor de B deve ser entre 0,004, para o período de verão, e 0,010 para o período de inverno, e C igual a 2,4. Neste trabalho, serão mantidos os valores de A e C, como recomendados pelos autores, e no parâmetro B será usada a média dos valores dos períodos de verão e inverno, igual a 0,007.

PAN *et al.* (2013) estimaram radiação solar global no Planalto do Tibete – Ásia, por meio da modelagem de Bristow e Campbell, relacionando a transmitância atmosférica, que é a relação entre a radiação solar global e a radiação solar no topo da atmosfera com as variáveis climáticas da região. No estudo de GOLLO *et al.* (2019) no Rio Grande do Sul, os autores constataram pelo modelo Bristow-Campbell que os coeficientes de calibráveis climáticos A, B e C não sofreram muita variação devido ao fato de os três municípios estudados terem latitudes próximas. No estudo de SANTOS *et al.* (2018), realizado na cidade de Humaitá, estado do Amazonas, foi estimada radiação solar global pelo modelo de Bristow & Campbell, e utilizou os parâmetros A e C como recomendados, 0,7 e 2,4, respectivamente, e o parâmetro B foi a média dos valores recomendados entre os períodos de inverno e verão, igual a 0,007. O modelo de BRISTOW e CAMPBELL (1984) também amplamente estudado no mundo, para estimativa de radiação solar global, como visto em PAN *et al.* (2013), GOLLO *et al.* (2019), SANTOS *et al.* (2018) e MEENAL, *et al.* (2016).

2.5 - RADIAÇÃO SOLAR E O CLIMA DO ESTADO DO PARÁ

O estado do Pará possui grande potencial de radiação solar global, com sazonalidade bem definido entre o período de inverno e verão amazônico, com radiação solar bem distribuída durante todos os meses do ano e horários do dia (ALVES *et al.*, 2021). Segundo MAIA *et al.* (2020) a capital Belém é considerada como aquela que detém o melhor potencial para utilização de energia solar das principais cidades da região amazônica brasileira. A altura do sol na região é sempre elevada às doze horas, com menor altura acima de 60° , que acarreta altos valores de radiação.

Quanto ao clima, o estado do Pará é caracterizado como pertencente ao clima da região do tipo “A”, que é para climas tropicais com altos índices pluviométricos e com temperaturas maiores que 18°C, predominantemente quente e úmido e detém grande diversidade de recursos naturais e de recursos hídricos (MENEZES, 2013; LIRA *et al.*, 2020).

Segundo MENEZES *et al.* (2015) o Pará é caracterizado por alta variabilidade pluviométrica devido a atuação de diferentes sistemas e fenômenos atmosféricos que atuam no estado, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Linhas de Instabilidade (LI's) e os fenômenos ENOS (El Niño Oscilação Sul). A precipitação é predominantemente do tipo convectiva, tendem a decrescer do setor costeiro para o interior.

As regiões do estado do Pará apresentam aumento da precipitação a partir de dezembro e fim da estação chuvosa em maio, com picos em março, a precipitação decresce significativamente, sendo o período de junho a novembro o período seco (MENEZES *et al.*, 2015). FERREIRA FILHO *et al.* (2020) as médias de chuvas anuais são próximas de 2000mm, variado entre 1600 a 1900mm. As médias de temperatura do ar variam entre 24 e 26°C, com umidade relativa do ar de aproximadamente 80%.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é o principal órgão no país responsável em prover informações meteorológicas à sociedade brasileira, por meio do monitoramento de parâmetros climatológicos como temperatura, precipitação, umidade, insolação, radiação, velocidade do vento, entre outros. As estações meteorológicas pertencentes ao INMET são distribuídas em todo território brasileiro, e são classificadas em Estações Meteorológicas Convencionais e Estações Meteorológicas Automáticas. As Estações Meteorológicas Convencionais são as estações compostas por sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos, estes são lidos e interpretados pelos observadores *in loco* diariamente. Trata-se de equipamentos mais simples e que coletam informações básicas como temperaturas e nível de precipitação.

Enquanto que as Estações Meteorológicas Automáticas são equipamentos mais complexos, capazes de monitorar inúmeros parâmetros meteorológicos e enviam os dados diretamente para um banco de dados do INMET. Esse tipo de estação de monitoramento é composta por uma Unidade Central de Memória, chamada *datallogger*, que é conectada aos sensores de parâmetros meteorológicos, tais como temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do vento, radiação, entre outros. As medidas das Estações Meteorológicas Automáticas são tomadas de minuto a minuto e integralizadas para o período de uma hora, e entre os parâmetros medidos por esse tipo de estação está a radiação solar global.

De acordo com o INMET (2021), há uma seção própria dentro do órgão responsável pela recepção e tratamento dessas informações obtidas pelas estações meteorológicas. No endereço *website* do órgão é possível obter os dados de acordo com o desejado, podendo optar pelos dados só das estações convencionais ou das estações automáticas, ou de ambas; pode-se escolher informações das estações meteorológicas de determinado estado ou de um grupo de cidades.

A escolha das cidades estudadas neste trabalho levou em consideração o período de dados disponíveis das estações meteorológicas automáticas, visando o estudo estatístico entre valores medidos e estimados, as localizações de cidades em diferentes mesorregiões do estado do Pará, e a consistência e confiabilidade dos dados obtidos pelo *website* do INMET. As cidades estudadas neste trabalho são Belém, Castanhal,

Novo Repartimento, Redenção, Dom Eliseu, Santana do Araguaia, Óbidos, Tucuruí, Medicilândia e Tomé Açu. Na Figura 3.1 é possível visualizar a localização das cidades.

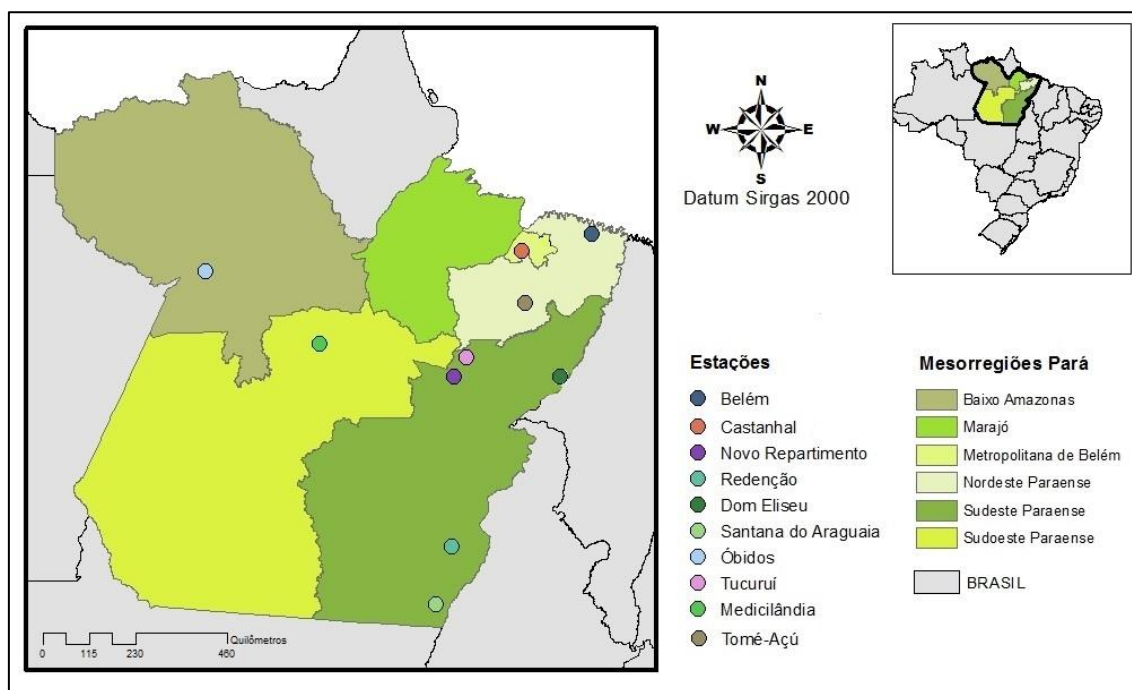


Figura 3.1 - Mapa do estado do Pará com a distribuição geográfica das dez estações estudadas neste trabalho.

Na Tabela 3.1 são detalhadas as localizações geográficas das estações meteorológicas das cidades estudadas e o período da análise de dados. De acordo com a classificação climática de Koppen estudado por MENEZES (2013); LIRA *et al.* (2020), o estado do Pará apresenta clima tropical ao longo do ano.

Tabela 3.1 - Municípios do estado do Pará e suas respectivas localizações geográficas e o período estudado.

Município	Latitude (grau decimal)	Longitude (grau decimal)	Período
Belém	-1.44	-44.48	2020
Castanhal	-1.3	-47.95	2020
Novo repartimento	-4.24	-49.94	2020
Redenção	-8.04	-50.01	2020
Dom Eliseu	-4.28	-47.56	2020
Santana do Araguaia	-9.33	-55.35	2020
Óbidos	-1.88	-55.51	2020
Tucuruí	-3.76	-49.67	2020
Medicilândia	-3.51	-52.96	2020
Tomé Açu	-2.59	-49.36	2020

Os dados de temperatura mínima, temperatura máxima, radiação solar e latitude foram utilizados para parametrizar os modelos de estimativa de radiação solar global. Para implementar computacionalmente os modelos de estimativa de radiação solar global, foi necessário tratar os dados obtidos do *website* do INMET, ou seja, eliminar leituras inconsistentes que representam claramente erros de medição, tais como temperaturas muito elevadas (temperaturas acima de 45°C) ou temperaturas muito baixas (abaixo de 2°C). A Tabela 3.2 detalha o percentual de consistência de dados de temperaturas, do total de 366 dias do ano de 2020 em cada cidade estudada. Ressalta-se que em sete cidades são obtidas 100% de leituras consistentes de temperaturas mínimas e máximas no ano 2020, enquanto que a cidade Belém apresenta 95,63% de consistências de dados, correspondente a 350 leituras do total de 366, e a cidade Tomé Açu, no nordeste paraense, é possível analisar a estimativa de radiação solar global com 353 dados, o que representa 96,45% do total.

Tabela 3.2 - Relação de número de amostras que apresentaram leituras consistentes de temperaturas nas dez cidades analisadas.

Município	Número de amostras	Consistência de dados (%)
Belém	350	95,63%
Castanhal	363	99,18%
Novo repartimento	366	100,00%
Redenção	366	100,00%
Dom Eliseu	366	100,00%
Santana do Araguaia	366	100,00%
Óbidos	366	100,00%
Tucuruí	366	100,00%
Medicilândia	366	100,00%
Tomé Açu	353	96,45%

Os dados de radiação solar foram disponibilizados em dados horários no *website* do INMET. Dessa forma foi necessário integralizar estes dados para dados diários, a fim de analisar estatisticamente estes dados diários medidos com os dados estimados pelos modelos. Devido às estações estudadas estarem próximas à linha do Equador, foi observado que as medições de radiação solar global são consistentes em faixas horárias entre as 7h até às 19h, e é desconsiderada a faixa horária que as medidas eram nulas ou desprezíveis, entre 20h e 6h.

Os dados são tabulados e tratados utilizando recursos do *software* Microsoft Office Excel. A organização das informações obtidas pelas estações meteorológicas, a

modelagem dos valores estimados e análise estatística entre estes e aqueles são realizadas no Excel. A Figura 3.2 apresenta o fluxograma com a ideia central do trabalho, desde a obtenção dos dados meteorológicos até a implementação dos modelos e análise estatística.

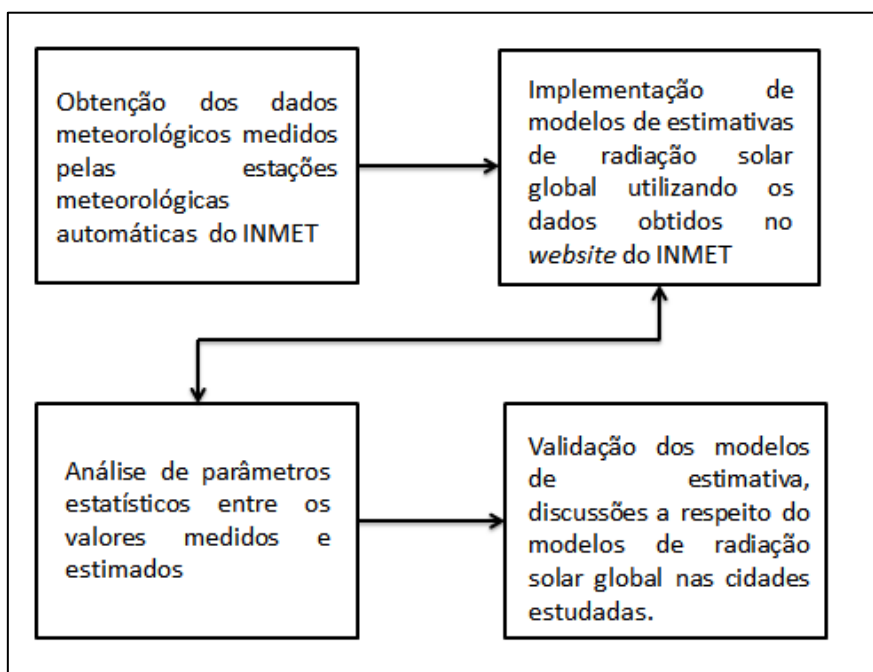


Figura 3.2 - Fluxograma com tema central do trabalho, desde a obtenção de dados meteorológicos até a análise estatística dos modelos de estimativa utilizados.

Com a obtenção dos dados de temperaturas máxima e mínima em uma determinada série de informações, é possível estimar os dados diários de radiação solar global por meio dos modelos de estimativa, a fim de que estes se tornem valiosas ferramentas no planejamento de projetos que envolvam sistemas de geração de energia elétrica, sistemas de evapotranspiração na agricultura ou em estudos climatológicos em geral. A Tabela 3.3 apresenta os valores mínimos, máximos e médios da radiação solar global (RSG) medido pelas estações meteorológicas.

Na Tabela 3.3 os valores médios medidos de radiação solar global, que varia entre os valores de 15,21 MJ/m².dia, em Castanhal, a 18,33 MJ/m².dia, em Redenção, esta cidade que apresentou maior média de radiação solar global nas cidades analisadas no período estudado.

O desempenho de modelos de estimativa é avaliado por meio de parâmetros estatísticos. Nesta etapa do trabalho, um conjunto de valores observados é comparado com outros valores estimados a partir dos registros da amplitude térmica diária, latitudes

locais das estações e mesmo período de análise. Como já comentado, os modelos estimam a radiação solar global a partir da variação térmica diária, estes dados são comparados com dados reais armazenados no banco de dados do INMET.

Tabela 3.3 - Valores de Radiação Solar Global máximo, mínimo e médios em cada uma das dez cidades estudadas.

Cidade	Mínima RSG (MJ/m².dia)	Data de coleta da Mínima RSG	Máxima RSG (MJ/m².dia)	Data de coleta da Máxima RSG	Média RSG medida (MJ/m².dia)
Belém	2,32	07/03/2020	23,95	26/08/2020	15,94
Castanhal	2,95	07/03/2020	22,55	05/03/2020	15,21
Novo Repartimento	4,02	22/11/2020	23,46	17/03/2020	17,38
Redenção	3,07	25/09/2020	26,46	14/01/2020	18,33
Dom Eliseu	2,72	19/11/2020	24,13	07/08/2020	17,72
Santana do Araguaia	3,42	15/03/2020	23,23	14/02/2020	17,21
Óbidos	5,26	07/05/2020	24,91	24/01/2020	16,31
Tucuruí	2,86	03/11/2020	22,74	22/12/2020	16,15
Medicilândia	2,53	03/11/2020	22,74	22/12/2020	15,26
Tomé Açu	3,88	14/04/2020	22,88	04/09/2020	16,70

Os resultados estatísticos entre os valores observados e estimados são utilizados para validar os modelos. Os parâmetros estatísticos analisados neste trabalho são análise de regressão linear através do Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Willmott (d), Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Índice de Confiança ou de desempenho (c) e pela Raiz do Erro Quadrático Médio Relativo (rRMSE), este último classifica o desempenho do modelo em: excelente, bom, razoável, ruim ou sofrível.

O coeficiente de determinação (R^2), mostrada na Eq. (3.1) é um número positivo entre zero e um, quanto maior for o R^2 , melhor será o modelo analisado, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra de dados.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (3.1)$$

Sendo:

R^2 = Coeficiente de determinação;

E_i = Valor estimado;

O_i = Valor observado;

\bar{O} = Média dos valores observados.

Para avaliar o grau de concordância entre as variáveis deve ser utilizado o Índice de Willmott (d), WILLMOTT *et al.* (1985), dada pela Eq. (3.2). Este parâmetro determina a exatidão do modelo e indica o grau de concordância entre os valores estimados e observados. O índice de Willmott varia entre os valores de 0 e 1, onde quanto mais próximo de 1, melhor a concordância dos dados.

$$d=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^n (R_o-R_E)^2}{\sum_{i=1}^n (|R_o-\bar{R}_E|+|R_o-\bar{R}_E|)^2}\right] \quad (3.2)$$

Sendo:

R_o = Radiação solar global observada [$MJ/m^2 \cdot d^1$];

R_E = Radiação solar global estimada [$MJ/m^2 \cdot d^1$];

\bar{R}_E = Média da radiação solar global estimada [$MJ/m^2 \cdot d^1$];

d = Índice de concordância de Willmott [adimensional].

O coeficiente de correlação de Pearson (r) (Eq. 3.3) é utilizado neste trabalho para calcular o coeficiente de confiança ou desempenho dos modelos (c) (Eq.3.4).

$$r = \frac{\sum (E_i - \bar{E}_i)(O_i - \bar{O})}{\sqrt{[\sum (E_i - \bar{E}_i)^2][\sum (O_i - \bar{O})^2]}} \quad (3.3)$$

$$c = d \times r \quad (3.4)$$

Sendo:

r = Coeficiente de correlação de Pearson (adimensional);

d = Índice de concordância de Willmott (adimensional);

c = coeficiente de confiança ou desempenho (adimensional);

E_i = Valor estimado;

\bar{E}_i = Média dos valores estimados;

O_i = Valor observado;

\bar{O} = Média dos valores observados.

O valor do índice de confiança ou desempenho (c) pode ser interpretado a partir de seus valores, podendo ser classificados desde péssimo até excelente como mostra a Tabela 3.4, proposta por CAMARGO e SENTELHAS (1997).

Tabela 3.4 - Classificação do índice de confiança ou desempenho (c).

C	Classificação
Maior que 0,85	Ótimo
De 0,76 a 0,85	Muito bom
De 0,66 a 0,75	Bom
De 0,61 a 0,65	Mediano
De 0,51 a 0,60	Sofrível
De 0,41 a 0,50	Mal
Menor ou igual a 0,40	Péssimo

Fonte: CAMARGO e SENTELHAS (1997).

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – Root Mean Square Error) descreve o desvio médio absoluto entre um modelo individual e os valores observados (IQBAL, 1983). Quanto menor o valor de RMSE, mais preciso é o modelo, ou seja, melhor é a estimativa. Este parâmetro estatístico é descrito pela Eq. (3.3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_o - R_E)^2}{n}} \quad (3.3)$$

Sendo:

RMSE = Raiz do Erro Quadrático Médio [MJ/m².d¹];

R_o = Radiação solar global observada [MJ/m².d¹];

R_E = Radiação solar global estimada [MJ/m².d¹];

n = Número de amostras.

De acordo com IQBAL (1983), dividindo o valor de RMSE pelo valor médio dos dados estimados, obtêm-se os valores relativos em porcentagem. Se o RMSE relativo for menor que 10%, o modelo é considerado excelente; se o RMSE relativo estiver entre 10% e 20%, o modelo é considerado bom; se o RMSE relativo tiver valor entre 20% e 30%, o modelo é considerado ruim; e se o RMSE relativo for maior que

30%, o modelo é considerado sofrível, mostrado na Tabela 3.5. A Raiz do Erro Quadrático Médio relativo (rRMSE) é dada pela Eq. (3.4).

$$\text{rRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Y}} \quad (3.4)$$

Sendo:

rRMSE = Raiz do Erro Quadrático Médio Relativo;

RMSE = Raiz do Erro Quadrático Médio;

\bar{Y} = Valor médio dos dados estimados.

Tabela 3.5 - Classificação do RMSE relativo (rRMSE).

rRMSE	Classificação
Menor ou igual a 10%	Excelente
De 11% a 20%	Bom
De 21% a 30%	Ruim
Maior que 30%	Sofrível

Fonte: IQBAL (1983).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento diário dos valores de radiação observada pelas estações do INMET, em relação aos valores estimados pelos modelos Hargreaves e Samani (H-S) e Bristow e Campbell (B-C) deverão ser comparados graficamente e analisados parâmetros estatísticos como Coeficiente de Determinação (R^2), Índice de Willmott (d), Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Índice de Confiança ou de desempenho (c) e Raiz do Erro Quadrático Médio Relativo (rRMSE).

A radiação solar global média diária durante o ano de 2020 nas estações estudadas foi de 16,60 MJ/m².d, conforme mostrado na Tabela 4.1. Em todas as cidades o valor médio de radiação solar global variou entre 15,06 MJ/m².dia a 18,33 MJ/m².dia, representando pouca variação da radiação solar global na região, podendo estar relacionado também à baixa variação na latitude entre as cidades/estações. Redenção apresentou a maior média diária de radiação solar global, 18,33 MJ/m².dia, enquanto Castanhal a menor, com valor igual a 15,21 MJ/m².dia.

Tabela 4.1 - Média diária da Radiação Solar Global nas cidades estudadas durante o ano de 2020.

Cidade / Estação	Radiação Solar Global Média Diária (MJ/m².dia)
Belém	15,94
Castanhal	15,21
Dom Eliseu	17,72
Medicilândia	15,26
Novo Repartimento	17,38
Tomé Açu	16,70
Redenção	18,33
Santana do Araguaia	17,21
Tucuruí	16,15
Óbidos	16,31
Média = 16,60 MJ/m ² .dia	

Outro fator importante que contribuiu para valores próximos da radiação entre as cidades é a classificação climática de Koppen da região tipo “A”. Apesar de estarem em mesorregiões distintas, os dez municípios possuem a mesma marcha sazonal, o que influencia na incidência da radiação no estado, e a distribuição do período chuvoso e menos chuvoso tem pouca variação entre as mesorregiões.

A estação da cidade de Castanhal possui menor média da radiação, este município está localizado na mesorregião Metropolitana que possui um dos maiores índices pluviométricos, superior a 2.000 mm por ano, de acordo com ALBUQUERQUE *et al.* (2010). A alta pluviosidade é um fator que contribui para essa menor média em relação às outras cidades.

Na Figura 4.1 é possível analisar graficamente o comportamento da Radiação Solar Global observada e entre os valores estimados pelos modelos H-S e B-C durante o ano inteiro, apresentadas pela Radiação Solar Global acumulada mensal e valores estimados. Observa-se que no período menos chuvoso, de junho a novembro, há uma leve superestimativa dos modelos em relação à radiação observada, principalmente o modelo Bristow e Campbell. Ao aplicar este modelo em Humaitá, no Amazonas, DOS SANTOS *et al.* (2018) obteve valores superestimados no mesmo período.

A relação entre os dados mensais da Radiação Solar Global observada e estimada pelos modelos é apresentada na Figura 4.2 (Modelo H-S) e Figura 4.3 (Modelo B-C) para cada estação com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e ajuste linear. Em relação ao Modelo H-S, o melhor coeficiente de determinação, a cidade de Óbidos apresentou o melhor ajuste, com R^2 igual a 0,82, enquanto que a cidade de Dom Eliseu apresentou o pior, com R^2 igual a 0,56.

Em relação ao modelo B-C, a cidade de Castanhal apresentou melhor ajuste, com R^2 igual a 0,86, enquanto a cidade que o pior ajuste desse modelo foi apresentado na cidade Dom Eliseu, com R^2 igual a 0,63.

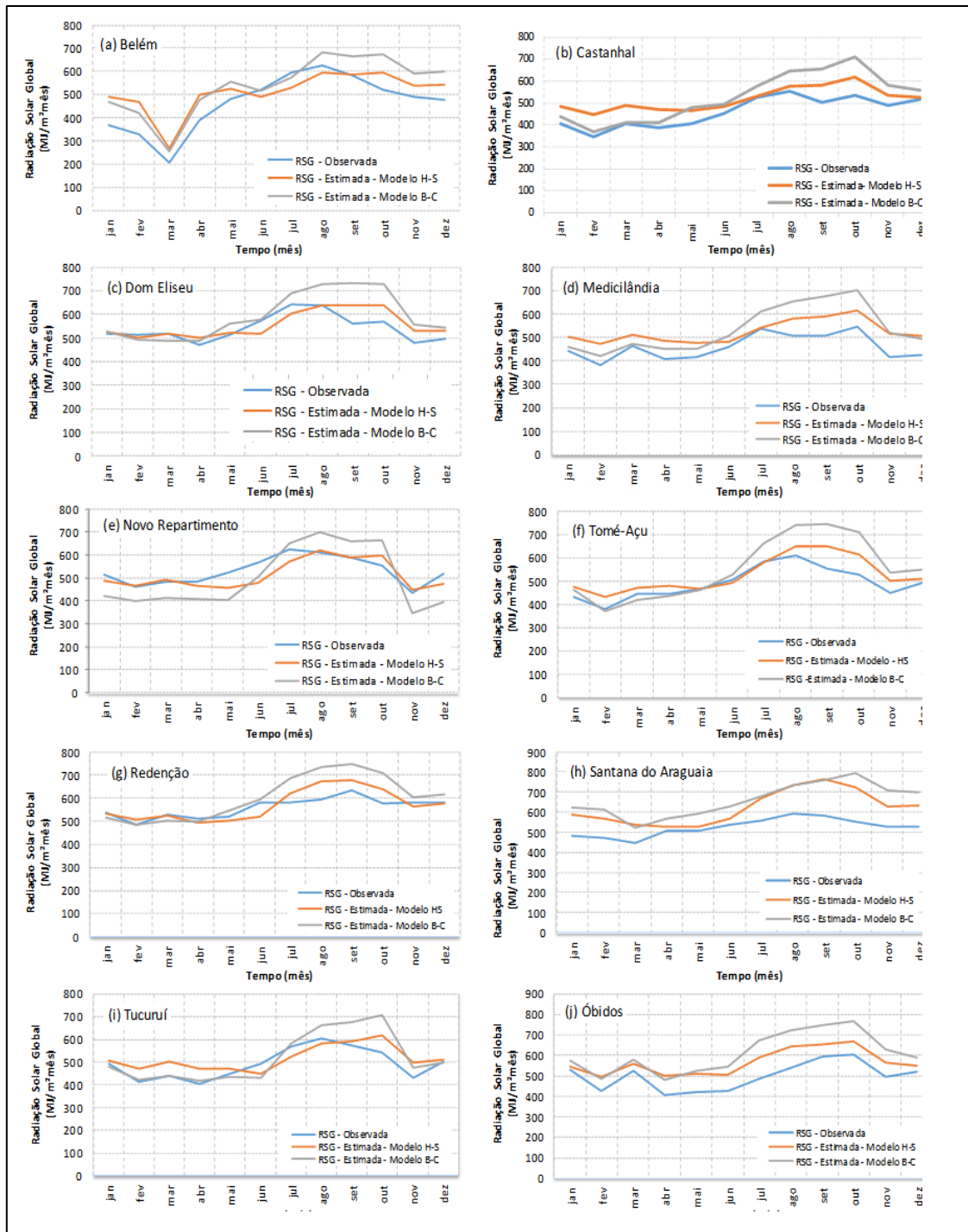


Figura 4.1 - Média mensal de Radiação Solar Global (RSG) observada e estimada pelos modelos H-S e B-C nas dez cidades estudadas.

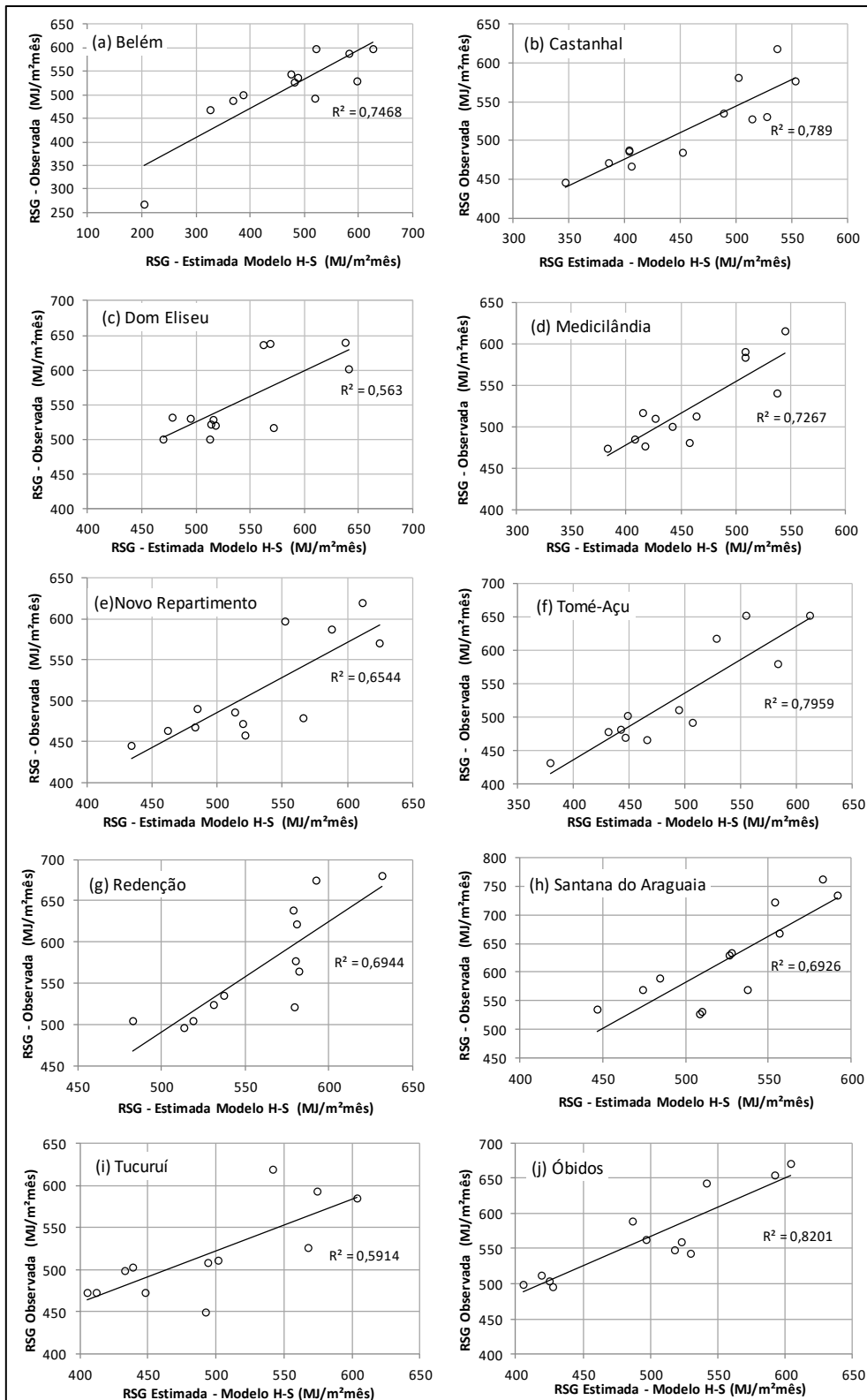


Figura 4.2 - Relação entre a Radiação Solar Global Observada e Estimada pelo Modelo H-S.

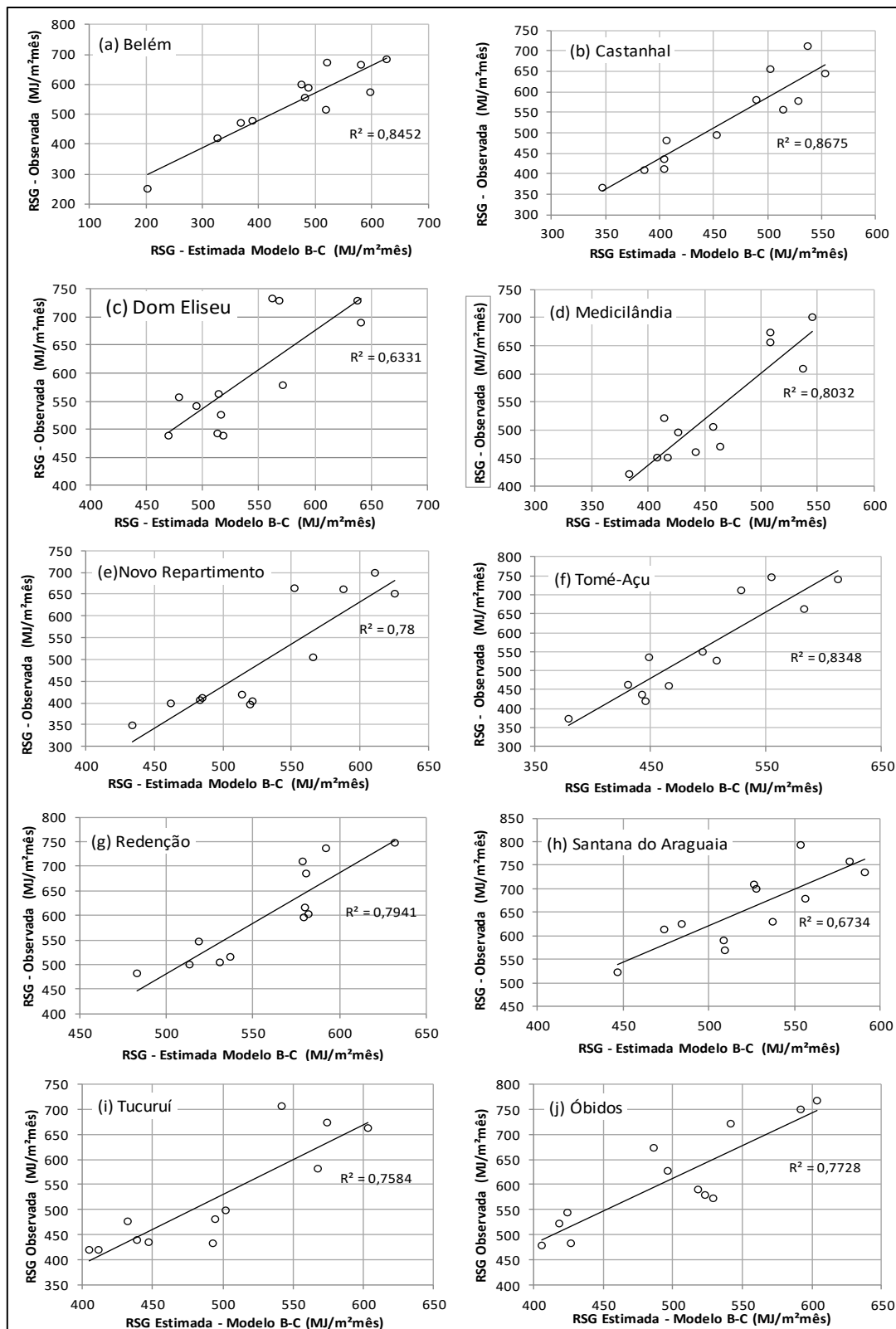


Figura 4.3 - Relação entre a Radiação Solar Global Observada e Estimada pelo Modelo B-C.

Com a observação da dispersão dos pontos e do ajuste linear através do coeficiente de determinação (R^2), nas Figuras 4.2 e 4.3, o modelo B-C apresentou

melhor ajuste com os valores maiores de R^2 em relação ao modelo H-S, resultado semelhante ao obtido por RAMOS *et al.* (2018) ao aplicar os modelos para diversas estações no Brasil. Em contrapartida, a distribuição dos pontos nos dois modelos em relação à radiação observada é bem parecida ao analisar os gráficos, demonstrando que há pouca variação entre os modelos.

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar os modelos são apresentados na Tabela 4.1. O modelo H-S apresenta menores valores de coeficiente de confiança ou desempenho (c) em comparação ao modelo B-C. Enquanto que a classificação referente ao RMSE relativo (rRMSE) está melhor ajustado ao modelo B-C em comparação ao modelo H-S.

A partir da análise dos parâmetros estatísticos na Tabela 4.1, faz-se importante destacar que a classificação considerando o índice de confiança do modelo (c) é melhor quanto mais próximo de 1, enquanto que a classificação da estimativa considerando o RMSE relativo (rRMSE), é melhor quanto menor o valor da raiz do erro médio quadrático relativo – como já discutido.

Em relação às classificações referente ao índice de confiança (c) e ao RMSE relativo (rRMSE), a capital Belém apresentou os seguintes resultados em ambos os modelos: no modelo H-S, o c é igual a 0,74, considerado bom e o rRMSE é igual a 16,56%, considerado bom, já o modelo B-C apresentou o valor de c igual a 0,80, considerado muito bom, e o valor de rRMSE igual a 19,07, que é considerado bom.

A cidade de Tomé Açu apresentou melhores ajustes dos modelos referentes aos valores observados, visto que para o modelo H-S, o índice de confiança foi considerado muito bom, c igual a 0,78 e o RMSE relativo foi considerado excelente, com rRMSE igual a 9,93%,. Já para o modelo B-C para essa estação, o índice de confiança e o RMSE relativo foram considerados bons, c igual a 0,71 e rRMSE igual 19,14%.

Tabela 4.2 - Parâmetros estatísticos entre valores observados e estimados pelos modelos H-S e B-C. Onde: r – coeficiente de correlação de Pearson; R² - coeficiente de determinação; d – índice de Willmott; c – índice de confiança ou desempenho e classificação do modelo; rRMSE (%) – Raiz do Erro Médio Quadrático Relativo em porcentagem e classificação do modelo.

Estações	Modelo H-S					Modelo B-C				
	r	R ²	d	c	rRMSE (%)	r	R ²	d	C	rRMSE (%)
Belém	0,86	0,75	0,86	0,74 Bom	16,56 Bom	0,92	0,85	0,87	0,80 Muito bom	19,07 Bom
Castanhal	0,89	0,79	0,75	0,66 Bom	14,08 Bom	0,93	0,87	0,80	0,74 Bom	18,16 Bom
Dom Eliseu	0,75	0,57	0,84	0,63 Mediano	7,56 Excelente	0,80	0,63	0,74	0,59 Sofrível	14,86 Bom
Medicilândia	0,85	0,73	0,64	0,55 Sofrível	15,11 Bom	0,90	0,80	0,70	0,63 Mediano	20,06 Razoável
Novo Repart.	0,81	0,65	0,88	0,71 Bom	7,73 Excelente	0,88	0,78	,078	0,71 Bom	16,42 Bom
Tomé Açú	0,89	0,80	0,88	0,78 Muito Bom	9,93 Excelente	0,91	0,84	0,78	0,66 Bom	19,14 Bom
Redenção	0,83	0,69	0,85	0,71 Bom	7,09 Excelente	0,89	0,79	0,74	0,44 Mau	13,28 Bom
Santana do Araguaia	0,83	0,69	0,60	0,50 Mau	20,86 Razoável	0,82	0,67	0,54	0,75 Bom	27,45 Razoável
Tucuruí	0,77	0,59	0,82	0,63 Mediano	9,75 Excelente	0,87	0,76	0,86	0,75 Bom	12,69 Bom
Óbidos	0,91	0,82	0,74	0,67 Bom	14,6 Bom	0,88	0,78	0,65	0,57 Sofrível	24,6 Razoável

Considerando os valores de c e rRMSE das cidades estudadas, pode-se inferir que existe uma grande associação entre o observado e estimado pelos dois modelos, indicando que há uma certa precisão nos modelos aplicados. Mesmo sem a otimização dos parâmetros empíricos dos modelos, Kt no modelo H-S e coeficiente B no modelo B-C, ambos os modelos se mostraram satisfatórios para estimar a Radiação Solar Global, que é de extrema importância para manutenção da série de dados para servir como base para estudos de implantação de sistemas fotovoltaicos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados apresentados é possível destacar algumas conclusões, tais como: os dois modelos de estimativa de radiação solar global implementados nas dez cidades do estado do Pará, em diferentes mesorregiões, apresentaram valores satisfatórios em relação aos valores observados.

Em todos os casos, houve uma leve superestimativa dos valores de radiação solar global no período menos chuvoso, entre os meses de junho e novembro. Apesar disso, pode-se concluir que o comportamento da radiação solar na região é uniforme, variando bem pouco ao longo do ano, o que assegura bons valores de radiação ao longo do ano, garantindo confiança em projetos que utilizem a fonte solar.

Os modelos estudados nesta pesquisa podem ser utilizados para análises históricas de radiação solar, na região das cidades analisadas, podendo servir, dessa forma, para contribuir para entender o comportamento e a disponibilidade deste recurso energético.

Como sugestão para trabalhos futuros, é possível calibrar os parâmetros empíricos dos modelos de estimativa de acordo com as particularidades do clima do estado do Pará, considerando o período mais chuvoso e o menos chuvoso. Outro estudo interessante seria a implantação de usinas fotovoltaica nas regiões estudadas, considerando as especificidades do recurso energético solar ao longo do ano no estado do Pará.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUELNUOR, A., OMARA, A., SAQR, K., ELHAG, I. "Improving indoor thermal comfort by using phase change materials: A review," **International Journal of Energy Research**, vol. 42, pp. 2084-2103, 2018.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)**. 2021. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 10 de outubro de 2021, 20h35min.

ANDRADE JÚNIOR, A.; NOLETO, H.; SILVA, E.; BRAGA, L.; BASTOS, A. Coeficientes da equação de Angstrom-PreScott para Parnaíba, Piauí. **Comunicata Scientiae**, v.3 (1): 50-54, 2012.

AL-HAJJ, R.; ASSI, A.; BATCH, F. An evolutionary computing approach for estimating global solar radiation, 2016. **2016 IEEE – 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**.

ALBUQUERQUE, M. F.; DE SOUZA, E. B.; DE OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A. Precipitação nas Mesorregiões do Estado do Pará: Climatologia, Variabilidade e Tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6 (6), 2010.

ALVES, A. R. da C.; FRANCO, J. R.; MOURA, E. R.; NAGATA, K. M. R.; SANTOS, I. I.; OLIVEIRA, L. L. A radiação solar é efetiva o ano inteiro para geração de energia solar fotovoltaica em Santarém-PA, Amazônia Brasil? **Conjecturas**, v. 21 (5), 2021.

BAYER, C. **Manejando os solos agrícolas para alta qualidade em ambientes tropicais e subtropicais**. FERTBIO, 26., 2004, Lages. Anais. Lages: UDESC e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

BELUCIO, L.; DA SILVA, A.; MOURA, G. Radiação Solar Global Estimada a partir da insolação para Macapá – AP, 2014. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, 494 – 504, 2014.

BENFORD F.; BOCK J. E. Transaction of the Illumination. **Engineering Society**, v. 34, p.200-203 (1939).

BERUSKI, G., PEREIRA, A., SENTELHAS, P. Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, Paraná. 2015. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, 205-213, 2015.

BLEY JR., C. Erosão Solar: riscos para a agricultura nos trópicos. **Ciência Hoje**. V. 25, n. 148, p. 24-29, abr. 1999.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S.; 1984. **On the Relationship between incoming Solar Radiation and Daily Maximum and Minimum Temperature**. 31:159-166.

BUDIYANTO, M., LUBIS, M. Comparison Result of Hourly Solar Radiation Under The Clear Sky Condition Based on of Solar Radiation Model and Measured Data Experiment. 2020. **First International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering**, 2020.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

DOS SANTOS, P.; QUERINO, C.; ARAUJO, V. Radiação Solar Global Diária para o município de Humaitá-AM estimada pelo modelo de Bristow e Campbell. **Revista Educamazônia**, ano 10, Vol XX Número 1, Jan-Jun, 2018, pág. 173-185.

DUFFIE, W. BECKMAN AND W.M. WOREK (fourth ed.), **Solar Engineering of Thermal Processes**, vol. 116, Wiley (2013), 10.1115/1.2930068.

EDDINE, A., CHEHADE, I. Estimation Model for global solar radiation in Lebanon, 2016. **Third International Conference on Renewable Energies for Developing Countries**. 2016.

FATTORI, P.A.; CEBALLOS, J. C., **Glossário de termos técnicos em radiação atmosférica**, 1997. Disponível em: <<http://tucupi.cptec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/gloss/capa.htm>>. Acesso em: 11 de novembro de 2021, 12h04min

FERNANDES, D. S; HEINEMANN, A. B; AMORIM, A.O; FEITOSA DA PAZ, R. L: Estimativa da Radiação Solar Global com Base em Observações de Temperatura para o Estado de Goiás, 2018. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, 558-566, 2018.

FERREIRA FILHO, D.; LIRA, B.; CRISPIM, D.; PESSOA, F.; FERNANDES, L. Análise pluviométrica no estado do Pará: comparação entre dados obtidos de estações pluviométricas e do satélite GPCP. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.

GOLLO, E. A; PEITER, M; ROBAINA, A; CHAIBEN NETO, M: Estimativa da radiação solar global para a região fronteira oeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 2019. DOI: 10.7127/RBAI.V12N7001027

GUL KAPLAN, A., ALPER KAPLAN, Y., 2020. **Developing of the new models in solar radiation estimation with curve fitting based on moving least-squares approximation**. *Renew. Energy* 146, 2462e2471.

HAI, T.; SHARAFATI, A.; MOHAMMED, A.; SALIH, S.; DEO, R.; AL-ANSARI, N., YASEEN, Z. **Global Solar Radiation Estimation and Climatic Variability Analysis Using Extreme Learning Machine Based Predictive Model**, 2020. *IEEE Access* (Volume: 8).

HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A. **Reference crop evapotranspiration from temperature**, *Appl. Eng. Agric.* 1 (2) (1985) 96e99. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>>. Acesso em: 16 de março de 2021.

IBGE [INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA] **Área territorial de estados e municípios**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa.html>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2022, 22h34min.

IHADDADENE, R.; IHADDADENE, N.; SALEMI, M.; BEGHIDJA, A. New model to estimate monthly global solar radiation from air temperature in Algeria. 2018. **The 9th Internation Renewable Energy Congress**.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation. Includes index**. 1. Solar radiation. I. Title. QC911.I63, 1983.

IKOTONI, B.; IBRAHIM, H., JATTO, I.; OLUTADE, I. Solar Radiation Potential Using Surface Meteorological Data (A case study of Lokoja City, Kogi State). **2019 IEEE PES/IAS Power Africa (Postgraduate Forum)**.

JAMIL, B.; SIDDIQUI, A.; AKHTAR, N. **Engineering Science and Technology, an International Journal Estimation of solar radiation and optimum tilt angles for south-facing surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India**. *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 4, pp. 1826–1835, 2016.

LIRA, B. R. P.; CRISPIM, D. L.; FERREIRA FILHO, D. F.; FERNANDES, L. L.; PESSOA, F. C. L. Agrupamento de precipitação no estado do Pará, Brasil. **Revista Gestão da Água na América Latina**, v. 17, e19, 2020.

LOPES JÚNIOR, J., MOURA, M.; DA COSTA, N.; FERREIRA JÚNIOR, R.; CARVALHO, A.; QUERINO, C. Frequência e probabilidade de ocorrência de transmitância atmosférica global para a região de Maceió-Alagoas. 2021. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.2, p. 14685-14700 feb. 2021.

LURWAN, S., MARIUN, N., HIZAM, H., RADZI, M., ZAKARIA, A. Prediction Power Output of Photovoltaic Systems with Solar Radiation Model. 2014. **IEEE International Conference Power & Energy (PECON)**, 2014.

MAIA, A. L. A.; BLASQUES, L. C. M.; MONTEIRO, M. M. M. Análise da morfologia para geração de energia solar fotovoltaica em Belém-PA. **Anais do II Conara** - Congresso Araguaense de Ciências Exata, Tecnológica e social aplicada, Santana do Araguaia, 2020.

MARTINS, F.; PEREIRA, E.; ECHER, M. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o projeto Swera, 2004. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145 – 159, (2004).

MEENAL, R., SELVAKUMAR, I., BRIGHTA, K., JOICE, S., RICHERD, C. Solar Radiation Resource Assessment using WEKA. **Second International Conference on Inventive Systems and Control**. 2018.

MENEZES, F. P. **Avaliação espacial e sazonal da Precipitação no Estado do Pará**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2013.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. O uso da estatística para regionalização da precipitação no estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2015.

MOREIRA JÚNIOR, O; SOUZA, C. **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha**. 2018.

MOHANTY, S., PATRA, P. K. **“Prediction of Global Solar Radiation using Nonlinear auto Regressive Network with Exogenous inputs (narx)**, 2021.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – **Sistema Interligado Nacional (SIN)**, 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/páginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 16 de setembro de 2021, 10h04min.

OSORNIO, R.; RAMÍREZ, R.; PEÑA, M.; BUSTAMANTE, W. 2016. **Revista Mexicana de Ciências Agrícolas**, Vol. 7, n. 5, 2016, p. 1029-1042.

PAES, A. C.; DA SILVA, M. B. P.; GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J. F.; DOS SANTOS, C. M. Estimativa da Irradiação Solar Global pelos modelos de Hargreaves-Samani e Aprendizado de Máquina SVM e ANN em Botucatu-São Paulo – Brasil, 2018. **Revista de Meteorologia**, 2018.

PAN, T; WU, S; DAI, E; LIU, Y: Estimating the daily global solar radiation spatial distribution from diurnal temperature ranges over the Tibetan Plateau in China. **Revista: Elsevier: Energy applied**, 2013.

PEREIRA, E.; GONÇALVES, A.; MARTINS, F.; COSTA, R.; LIMA F.; RUTHER, R.; ABREU, S.; TIEPOLO, G.; PEREIRA, S.; SOUZA, J. **Atlas Brasileiro da Energia Solar**, 2ª edição; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

RAMOS, J.; VIANNA, M.; MARIN, F. Estimativa da radiação solar global baseada na amplitude térmica para o Brasil. **Revista da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia**, 2018.

RIVERO, M.; OROZCO, S.; SELLSCHOPP, F. S.; LOERA-PALOMO, R. A new methodology to extend the validity of the Hargreaves-Samani model to estimate global solar radiation in different climates: Case study México. 2017. **Revista Elsevier**, 2017.

SAMANI, Z. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation). **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.126, n.4, p.265-267, 2000.

SANTOS, A.; SOUZA, J.; ROSA, S. Evapotranspiração de referência horária e diária pelo modelo ASCE-PM para o estado do Paraná, Brasil, 2021. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2021.

SANTOS, D.; ARAÚJO, S.; ARAUJO, K.; ROSA, P.; PAZERA JR., E. Variabilidade temporal da radiação solar e insolação no município de Araguaína-TO. **R. RA'E GA, Curitiba**, n. 18, p. 35-40, 2009. Editora UFPR.

WILLMOTT, C. J. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. International Journal of Climatology, v.5, p.589- 606, 1985.

ZANG, H.; CHENG, L.; DING, T.; CHEUNG, K. W.; WANG, M.; WEI, Z.; SUN, G., 2020. Application of functional deep belief network for estimating daily global solar radiation: a case study in China. Energy 191, 116502.