

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO BRILHO SOLAR NO ESTADO DO ACRE ENTRE OS ANOS DE 1991 E 2015 PARA DETERMINAÇÃO DE NORMAIS CLIMATOLÓGICAS PROVISÓRIAS DE INSOLAÇÃO

Helmut Muniz da Silva – helmut.silva@inpe.br
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Resumo. *No intuito de contribuir com a compreensão sobre a variabilidade temporal da insolação (brilho solar ou horas de sol) e o aprofundamento do tema, o presente trabalho realizou uma análise estatística sobre as médias diárias mensais das horas de sol dos dados diários coletados por estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nas cidades de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul, estado do Acre, entre os anos de 1991 e 2015 para apresentar Normais Climatológicas Provisórias para o referido parâmetro. Para tanto, foram determinadas as medidas de tendência central, de dispersão, de assimetria e curtose dos dados de cada estação, bem como os resultados para os indicadores estatísticos do erro médio (MBE), do desvio médio absoluto (MAD) e do erro médio quadrático (RMSE). Os resultados mostraram que as curvas de insolação média mensal para as três estações demonstraram um comportamento muito semelhante ao longo do ano com disponibilidades do brilho solar com valores maiores no período do inverno local, provavelmente, devido às características do clima local. Foram obtidas ainda correlações lineares entre essas medidas, originando fatores de proporcionalidade e coeficientes de correlações. Finalmente, promoveram-se comparações com os registros descritos por outros autores e com as Normais Climatológicas para os períodos de 1961 a 1990 e de 1981 a 2010. Nesse caso, as curvas de insolação média mensal para as três estações demonstraram um comportamento muito semelhantes ao longo do ano com valores maiores quando comparados com os dados da literatura escolhidos e com as Normais Provisórias de Insolação.*

Palavras-chave: *Análise Estatística, Insolação (Brilho Solar ou Horas de Sol), Normais Provisórias de Insolação.*

1. INTRODUÇÃO.

Desde o princípio da humanidade, compreender o dia e a noite, bem como os seus efeitos sobre os diferentes sistemas do Planeta, tem sido uma atividade constante em diferentes sociedades. Nesse sentido, o primeiro passo é quantificá-los o mais precisamente possível para que se tenha uma interpretação adequada das informações, conforme relata Suehrch et al (2013), pois tais medidas são de fundamental importância em diversos ramos das Ciências, conforme descrevem Alves (2015) e Mbiaké (2018).

Para tanto, faz-se necessário conhecer detalhes do movimento aparente do Sol em torno da Terra, principalmente, durante o tempo em que ele ilumina uma determinada região. Diversos autores como Duffie & Beckman (2020), Rabl (1987), Muneer (2004), entre outros, descrevem a geometria solar através dos devidos parâmetros pertinentes ao tema como o dia angular (Γ), o ângulo zenital (θ_z), a elevação solar (α), a hora angular do pôr do sol (ω_s), a declinação solar (δ) e a latitude (λ) do ponto de observação.

No estudo das Ciências Atmosféricas, o máximo valor admissível para a duração do dia é denominado de fotoperíodo e sua determinação é feita de acordo com o dia do ano e a localização do observador em relação à Linha do Equador, ou seja, sua latitude. Todavia, nem sempre, devido às condições climáticas ou a obstáculos (sombreamento), consegue-se enxergar o Sol da superfície terrestre (IQBAL, 1983). Diante desse problema, estabeleceu-se outro parâmetro que descreve o tempo de sua observação efetiva e que se denomina brilho solar, insolação, ou ainda, horas de sol (MUNEER, 2004).

Dessa forma, a insolação representa o número de horas entre o nascimento e o pôr do sol nas quais o disco solar não esteve oculto por nuvens ou fenômenos atmosféricos de qualquer natureza, sendo visível para um observador situado à superfície terrestre sempre menor ou (no máximo) igual ao fotoperíodo, em um local com horizonte desobstruído, conforme descreve Duffie & Beckman (2020). Seus dados são coletados através de heliógrafos ou registradores de brilho solar Campbell – Stokes e de medidores de radiação direta (pireliômetros) ou de radiação global (piranômetros) (WMO, 2018).

Uma definição quantitativa foi estabelecida pela Organização Meteorológica Mundial (2010), especificando o valor de 120 W/m^2 para a radiação solar direta observada no local de obtenção da medida. Além disso, descrevem-se suas unidades, escalas, bem como seus requisitos de incerteza e resolução, e suas denominações alternativas para aplicações meteorológicas (WMO, 2018).

A associação entre as horas de sol e a radiação solar é tão intuitiva que a abordagem do tema é universal. Podem ser mencionados estudos sobre essa relação em diferentes lugares como, por exemplo, Arábia Saudita (MOHANDES, 2013), Camarões (MBAKÉ, 2018), Turquia (KALLIOĞLU, 2015), Alemanha (NESKE, 2014), Estados Unidos (HAMON, 1954; COLLARES-PEREIRA, 1979), Holanda (HINSSEN, 2008), Irã (RAHIMZADEH, 2014), Argélia e Espanha (CHEGAAR, 1998), Tunísia (CHELBI, 2015), Grécia (MATZARAKIS, 2004), entre outros.

No Brasil, o tema também é bastante explorado por pesquisadores em diversos estados de norte a sul. Vale mencionar o Atlas Solarimétrico do Brasil desenvolvido por Tiba (2000) e a segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA, 2017), além da análise de séries temporais mensais de radiação solar e horas de sol em climas tropicais (TIBA, 2004), da análise da tendência da irradiação solar e temperatura ambiente no agreste nordestino empregando dados medidos de longo prazo por Pedrosa (2018), da determinação dos coeficientes de Angström-Prescott para estimar a radiação solar no Rio Grande do Sul (BEXAIRA, 2018) e do monitoramento via satélite feito por Ceballos (2008).

Na região norte do país, Andrade (2021) realizou estimativas da radiação de onda longa incidente para todas as condições do céu na Amazônia Central. Pinto (2020) estimou a radiação solar através das horas de sol e das temperaturas máximas e mínimas de seis localidades no Oeste do Pará. Especificamente, no estado do Acre, podem ser citados os valores de insolação, medidos em Rio Branco - AC, como contribuição para o Atlas Solarimétrico da Amazônia (DUARTE, 2004) e os aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971 – 2000 (DUARTE, 2006).

Sendo assim, com o intuito de contribuir com o aprofundamento da compreensão sobre esse fenômeno, este trabalho teve como finalidade promover uma avaliação estatística temporal do brilho solar no Estado do Acre, a partir dos dados diários disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), através de seu Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), das três estações meteorológicas convencionais instaladas nos municípios de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul, entre os anos de 1991 e 2015 (INMET, 2020).

2. METODOLOGIA.

As estações meteorológicas convencionais são compostas de vários sensores isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos (brilho solar, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc.), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo e este os envia a um centro coletor por um meio de comunicação qualquer (INMET, 2020).

Foram propostas as seguintes etapas no desenvolvimento do estudo: coletar, tratar, organizar e analisar os dados os dados diários de horas de sol junto ao BDMEP; calcular os valores médios mensais de horas de sol para cada estação meteorológica no período; determinar os parâmetros estatísticos da distribuição de frequência dos valores médios mensais de horas de sol para as três estações meteorológicas em conjunto; originar Curvas Normais Meteorológicas Provisórias de Insolação para cada uma das estações avaliadas; e, por último, determinar, a partir do fotoperíodo médio das localidades, os percentuais de disponibilidade de brilho solar ao longo do ano.

2.1 Contextualização Espaço-Temporal do Estudo.

Até o início do século passado, o Estado do Acre havia sido território pertencente à Bolívia e ao Peru. Em 1903, com a assinatura do Tratado de Petrópolis, foi anexado ao Brasil. Sua localização está situada no extremo sudoeste da Amazônia brasileira, entre as latitudes de $07^{\circ} 07' S$ e $11^{\circ} 08' S$, e as longitudes de $66^{\circ} 30' W$ e $74^{\circ} W$, sendo formado por vinte e dois municípios que estão agrupados em sete regiões de desenvolvimento (Acre, 2010).

A Figura 1 a seguir mostra uma adaptação do mapa político do Estado, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no qual aparecem, em destaque, as cidades de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul. São nelas que estão localizadas as três estações meteorológicas convencionais do INMET das quais foram obtidos os valores diários de insolação para o desenvolvimento deste trabalho (IBGE, 2020).

Essas estações possuem uma codificação específica estabelecida pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) que identifica unicamente cada uma delas. A Tabela 1 a seguir apresenta as características geográficas de latitude (Lat.), longitude (Long.) e altitude (Alt.), junto com seus respectivos códigos (Cód.) estabelecidos pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) para cada uma das cidades em que estão localizadas as estações.

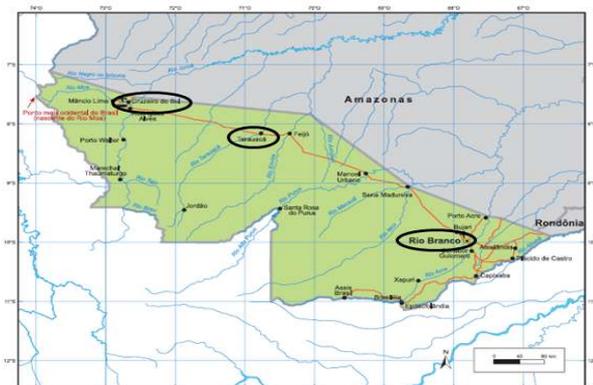


Figura 1 - Mapa político do Estado do Acre (Fonte: IBGE, adaptado).

Tabela 1 - Características Geográficas e Código da WMO para as Estações Meteorológicas Convencionais no Estado do Acre.

<i>Cidade</i>	<i>Cód. (WMO)</i>	<i>Lat. (°)</i>	<i>Long. (°)</i>	<i>Alt. (m)</i>
Rio Branco	82915	- 9,96	- 67,80	160
Tarauacá	82807	- 8,16	- 70,76	190
Cruzeiro do Sul	82704	- 7,60	- 72,66	170

Normais Climatológicas Provisórias necessitam de tempo de avaliação mínimo de dez anos, por isso, a intenção inicial era estabelecer a análise dos dados entre os anos de 1991 até 2010. Entretanto, devido à ausência de alguns

resultados da estação de Tarauacá, em prazos maiores do que três meses no início desse período, prorrogou-se a avaliação até o ano de 2015 para se empregar a máxima quantidade igual de dados em forma contínua possível de cada uma das estações para um período de vinte anos.

Além disso, para a indisponibilidades de dados diários em prazos menores ou iguais a três meses, os valores médios mensais assumidos para a análise estatística indisponíveis nesse período pela ausência de dados, foram aqueles valores apresentados pelas Normais Climatológicas de Insolação entre os anos de 1961 e 1990, uma vez que entre os anos 1981 e 2010 essas informações ainda não estavam disponíveis no momento da coleta e do tratamento dos dados.

2.2 Coleta, Tratamento e Organização dos Dados do INMET.

Os acessos ao BDMEP, através do site do Instituto Nacional de Meteorologia para coleta dos valores históricos de brilho solar das estações meteorológicas convencionais no Estado do Acre, foram realizados durante os meses de março a maio do ano de 2020, começando por Rio Branco, depois Tarauacá e, por último, Cruzeiro do Sul, separadamente (INMET, 2020). A seguir, apresentam-se, respectivamente, nas Figuras 2-a, 2-b e 2-c, os resultados brutos decorrentes das coletas dos dados de insolação em horas diárias para as estações de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul de forma contínua em cada um de seus intervalos temporais em meses.

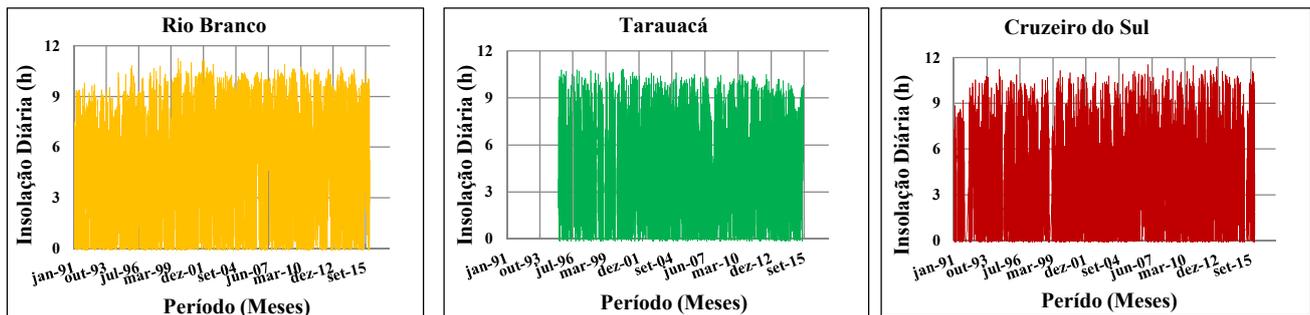


Figura 2-a - Insolação em Rio Branco entre 1991 e 2015.

Figura 2-b - Insolação em Tarauacá entre 1995 e 2015.

Figura 2-c - Insolação em Cruzeiro do Sul entre 1991 e 2015.

Suehrch et al (2013) relata que os conjuntos de dados coletados junto ao *World Radiation Data Centre* para desenvolvimento de sua pesquisa, assim como qualquer outro banco de dados, possuem discrepâncias e inconsistências que devem ser dirimidas antes de qualquer análise plausível. Da mesma forma, os dados coletados junto ao BDMEP demandam considerações nesse sentido para que sejam descritos resultados confiáveis.

Com os dados coletados, deu-se início ao seu tratamento para o cálculo das médias mensais. Nessa etapa, foram verificadas suas qualidade e integridade. Fora os períodos de ausência de valores já mencionados, poucos dados espúrios foram detectados. A estação de Rio Branco apresentou apenas três dias com resultados de insolação maior do que o fotoperíodo em todo intervalo temporal avaliado e que, por conseguinte, foram desconsiderados da análise. As estações de Tarauacá e de Cruzeiro do Sul não apresentaram resultados dessa natureza.

Dessa forma, para o referido período deveriam estar disponíveis, aproximadamente, 9130 dados diários de insolação para cada estação. Todavia, constatou-se a indisponibilidade dessas informações nas três estações. O cálculo dos valores médios mensais de insolação foi feito para os meses que apresentaram, pelo menos, dados diários disponíveis em 50 % dos dias para o referido mês.

Assim, cada uma delas apresentou um conjunto de trezentos valores de médias diárias mensais de horas de brilho solar. Quando da indisponibilidade de um percentual maior do que 50 % dos dias, as médias mensais empregadas no estudo foram as que constam nas Normais Climatológicas de 1961 a 1990 para a respectiva estação. Esses dados foram organizados separadamente por estação, de acordo com a preconização da medida, ou seja, horas e décimos de hora (WMO, 2018).

2.3 Determinação e Análise dos Indicadores Estatísticos.

Para cada um desses conjuntos de valores de insolação foram obtidas as distribuições de frequências absolutas e relativas acumuladas, com as mesmas quantidades de dados, intervalos e amplitudes de classes, bem como determinadas as medidas de tendência central e de dispersão para a obtenção da caracterização da estatística descritiva dos dados, de acordo com os conceitos apresentados em Montgomery (2003) e Morettin (2010).

Além dos parâmetros descritivos da análise estatística dos dados de insolação das estações meteorológicas convencionais do estado do Acre, também foram calculados os indicadores estatísticos do erro médio (MBE), o desvio médio absoluto (MAD) e a erro médio quadrático (RMSE) para cada uma delas ao longo do ano com o intuito de se obter uma avaliação mais detalhada da análise, conforme propõe Muneer (2004).

A avaliação por meio do indicador MBE sugere superestimação ($MBE > 0$) ou subestimação ($MBE < 0$). No caso do MAD, avalia de forma absoluta a distância de uma medida à média. Já no RMSE, o intuito é apresentar a magnitude do erro numa estimativa específica (ANDRADE, 2021).

2.4 Normais Climatológicas Provisórias de Insolação.

Determinados os parâmetros estatísticos das médias diárias mensais dos dados de horas de sol, o passo seguinte do estudo foi estabelecer as Normais Climatológicas Provisórias para a insolação no período apresentado anteriormente, ou seja, entre janeiro de 1991 e dezembro de 2015.

Dessa forma, promoveu-se a comparação dos resultados obtidos para as Normais Climatológicas Provisórias de Insolação para cada uma das estações entre si, bem como em relação ao fotoperíodo médio entre as três localidades, determinando-se a razão entre cada uma delas e fotoperíodo para caracterizar, assim, o percentual efetivo do brilho solar ao longo do ano para as estações solarimétricas de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul.

Determinados os parâmetros estatísticos das médias diárias mensais dos dados de horas de sol, o passo seguinte do estudo foi estabelecer correlações lineares entre as medidas de insolação das estações para determinar fatores de proporcionalidade entre as medidas e seus respectivos coeficientes de correlação. Os fatores de proporcionalidade foram determinados entre as medidas da estação que apresentou uma média diária mensal menor em relação à outra. Eles sugerem o percentual para uma correspondência linear entre esses resultados, caracterizados pelo coeficiente de correlação cuja interpretação permite sua classificação de acordo com o exposto em Agunbiade (2013).

A última etapa do trabalho promoveu a comparação dos resultados obtidos para as Normais Climatológicas Provisórias de Insolação com as Normais Climatológicas disponibilizadas pelo INMET para os períodos de 1961 a 1990 e de 1981 a 2010 (INMET, 2021) para as mesmas estações, bem como com os dados apresentados para a cidade de Rio Branco por Duarte (2006) e no Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA, 2000). Para tanto, foram montadas tabelas e gráficos comparativos que apresentam os resultados obtidos, estabelecendo uma avaliação comparativa imediata entre essas medidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

O primeiro resultado obtido na análise foi o da disponibilidade dos dados de insolação nas três estações meteorológicas para o desenvolvimento do estudo. A estação de Rio Branco, com um percentual de 99,0 %, foi a que apresentou a melhor disponibilidade de dados. Já em Tarauacá, apenas 79,0 % dos dados estavam disponíveis, enquanto em Cruzeiro do Sul, esse valor foi de 95,3 %, aproximadamente.

Após a coleta, tratamento e organização dos dados diários de brilho solar, foram obtidas as distribuições de frequência absoluta e relativa para as médias diárias mensais, perfazendo um total de 900 valores para as três estações no período. A Figura 3 apresenta os dados absolutos das médias diárias dos dados para cada uma delas. Relativizando esses dados quanto à sua quantidade, foram determinadas as distribuições de frequência relativa acumulada das três estações. A Figura 4 mostra o comportamento gráfico para cada uma delas.

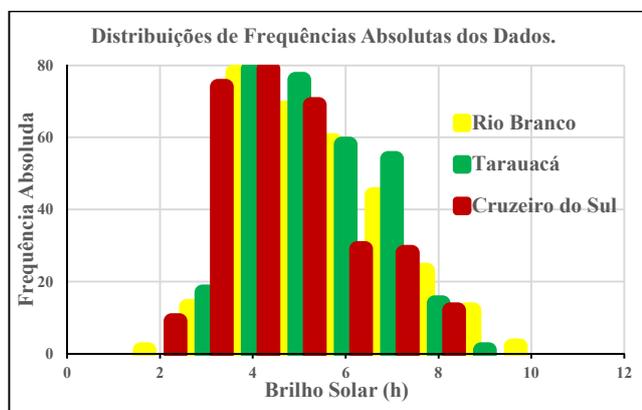


Figura 3 - Frequência Absoluta das Médias Diárias dos Dados das Três Estações.

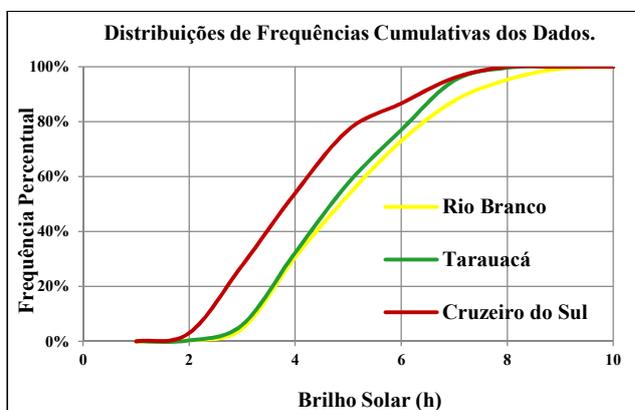


Figura 4 - Frequência Relativa Acumulada nas Três Estações.

As três estações já estão com a mesma quantidade de dados devido a inserção dos dados das Normais Climatológicas para o período de 1961 até 1990, conforme mencionado anteriormente. Pode-se constatar ainda que a maior parte dos dados estão distribuídos entre 3,5 e 7,5 horas de insolação diária, não sendo observados valores menores do que 1,5 horas e a ocorrência de poucos valores maiores do que 10 horas.

Conforme se verifica nessas curvas, a ocorrência de valores de insolação menores se dá em Cruzeiro do Sul, enquanto Rio Branco e Tarauacá diferem, praticamente, apenas no intervalo entre 6,5 horas e 7,5 horas, quando a incidência é maior em na segunda estação. Nos três casos, mais de 99,0 % dos dados são menores do que 9,0 horas de brilho solar e mais de 97,0 % deles são maiores ou iguais a 2,0 horas de brilho solar.

A partir da metodologia aplicada ao estudo dos dados de insolação nas estações meteorológicas convencionais do estado do Acre entre os anos de 1991 e 2015, coletados do BDMEP, constatou-se o comportamento oscilatório esperado da variação anual das médias diárias mensais do brilho solar, conforme se apresenta na Figura 5 a seguir.

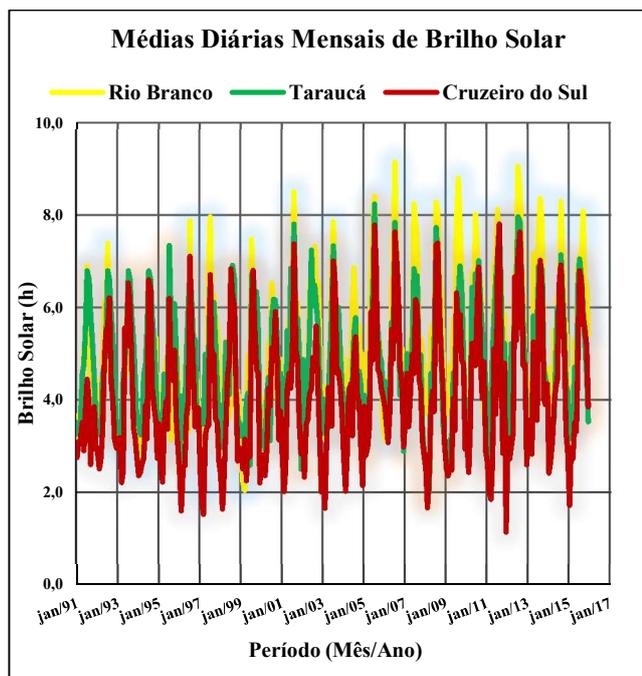


Figura 5 - Médias Diárias de Brilho Solar nas Estações do Acre entre 1991 e 2015.

Tabela 2: Parâmetros da Análise Estatística das Médias Diárias de Insolação.

Parâmetro Estatístico	Rio Branco	Tarauacá	Cruzeiro do Sul
Média	5,0	4,8	4,1
Erro padrão	0,1	0,1	0,1
Mediana	4,9	4,6	3,9
Moda	3,7	3,2	3,0
Desvio Padrão	1,5	1,4	1,4
Variância	2,4	1,8	2,1
Curtose	-0,5	-0,8	-0,4
Assimetria	0,5	0,3	0,6
Amplitude	7,2	6,4	6,7
Mínimo	2,0	1,8	1,1
Máximo	9,1	8,2	7,8
Nível de Confiança (95%)	0,2	0,2	0,2
Coefficiente de Variação	0,3	0,3	0,4

Pode-se observar que a estação meteorológica de Rio Branco apresentou a maioria dos maiores valores de insolação no período, enquanto que a maioria dos menores valores foram apresentados pela estação de Cruzeiro do Sul. Além disso, observa-se também que a média diária máxima ocorreu em julho de 2006 na estação de Rio Branco com 9,1 horas e que a mínima foi de 1,1 horas, observada em dezembro de 2011 em Cruzeiro do Sul.

Para cada mês, então, determinaram-se suas médias. Sobre esses valores, promoveu-se, então, a determinação dos parâmetros estatísticos de tendência central e de dispersão, conforme terminologia descrita na Norma ABNT NBR ISO 3534-1 (2010). A Tabela 2 apresenta os resultados dos parâmetros estatísticos fundamentais de uma distribuição de frequência agrupados para as três estações. Nela constam médias, modas, medianas, erros e desvios padrões, assimetrias e curtoses, máximos, mínimos e amplitudes, além do nível de confiança e o coeficiente de variação.

Dessa Tabela, infere-se que a média diária mensal de insolação em Tarauacá e em Cruzeiro do Sul correspondem, respectivamente a, 95,2 % e 80,7 % do valor apresentado em Rio Branco. Essa estação também registrou a maior amplitude de insolação para o período. Os erros padrões são idênticos para os dados das três estações. Quanto à curtose, os três conjuntos de dados indicam que as curvas são mais agudas em sua parte superior do que a distribuição normal, ou seja, são leptocúrticas.

As três distribuições indicaram uma assimetria moderada e positiva, ou seja, à esquerda da média, sendo mais acentuada para os dados da estação de Cruzeiro do Sul. A distribuição dos valores da média diária mensal para a estação de Tarauacá demonstrou resultados melhores para a simetria e para o nível de confiança da curva, enquanto o conjunto de dados da estação de Cruzeiro do Sul apresentou maior variabilidade e assimetria, bem como a menor amplitude.

Os indicadores estatísticos do erro médio (MBE), do desvio médio absoluto (MAD) e do erro médio quadrático (RMSE) das médias mensais ao longo do ano para as estações de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul medidos em horas de sol, respectivamente, estão relacionados nas Tabelas 3, apresentada a seguir.

Tabela 3: Indicadores Estatísticos MBE, MAD e RMSE das Medidas das Médias Diárias de Insolação.

Estação	Rio Branco			Tarauacá			Cruzeiro do Sul		
	MBE	MAD	RMSE	MBE	MAD	RMSE	MBE	MAD	RMSE
Mês									
Jan	-0,2	0,5	0,6	0,0	0,4	0,6	0,0	0,4	0,5
Fev	-0,2	0,4	0,5	0,0	0,4	0,6	0,0	0,5	0,7
Mar	-0,5	0,7	0,7	0,0	0,3	0,5	0,0	0,4	0,5
Abr	-0,7	0,9	1,1	0,0	0,5	0,7	0,0	0,6	0,8
Mai	-0,5	0,7	0,9	0,0	0,5	0,6	0,0	0,7	0,9
Jun	-1,0	1,3	1,6	0,0	0,9	1,2	0,0	0,7	0,7
Jul	-0,5	0,9	1,1	0,0	0,5	0,7	0,0	0,7	0,9
Ago	-1,4	1,7	2,1	0,0	0,5	0,6	0,0	0,8	1,0

Set	-1,0	1,3	1,7	0,0	0,5	0,7	0,0	0,7	0,9
Out	-0,5	0,8	1,0	0,0	0,4	0,6	0,0	0,5	0,6
Nov	-0,4	0,8	0,9	0,0	0,4	0,5	0,0	0,6	0,7
Dez	0,0	0,6	0,7	0,0	0,4	0,5	0,0	0,5	0,7

Os percentuais desses indicadores em relação às suas medidas indicam valores que vão de zero como, por exemplo, no erro médio de todas as medidas para as estações de Tarauacá e Cruzeiro do Sul, até 32,6 % para o erro quadrático médio em agosto na estação de Rio Branco. Os resultados do indicador MBE sugerem estimativas adequadas para os dados de Tarauacá e Cruzeiro do Sul e a subestimação para o caso de Rio Branco, cujo valor mais discrepante em termos absolutos ocorreu para o mês de agosto.

Para o indicador MAD as maiores distâncias das médias ocorrem em agosto para Rio Branco e Cruzeiro do Sul e em junho para Tarauacá, quando os valores das horas do brilho solar encontram-se acima da média mensal. Esse comportamento se repete ao se empregar o indicador RMSE como parâmetro de estimativa para o tamanho do erro em relação aos valores específicos das médias mensais como, por exemplo, no mês de agosto em Rio Branco quando discrepância chega a atingir 31,3 % da medida.

Assim, foram determinados os comportamentos das médias mensais de brilho solar ao longo do ano para as três estações comparada ao fotoperíodo para a latitude média das estações, conforme descreve Reboita (2018) e se pode observar na Figura 6 a seguir.

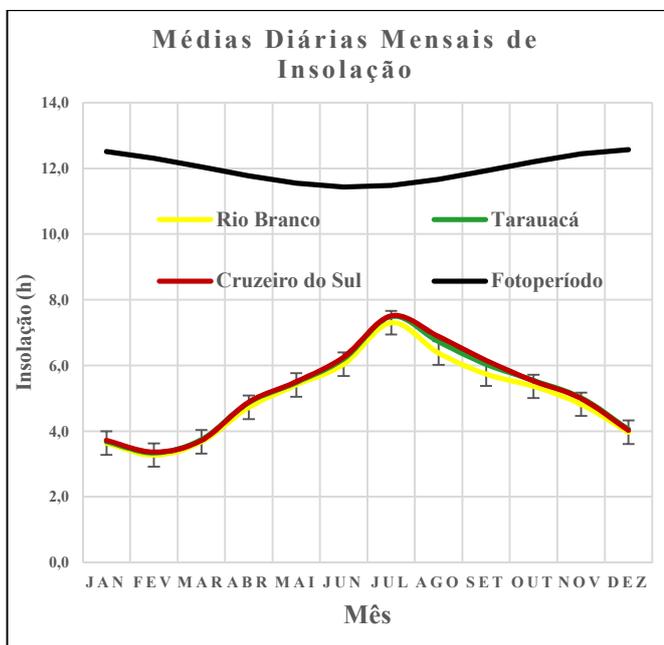


Figura 6: Médias Diárias Mensais de Insolação ao Longo do Ano.

Tabela 4: Valores Percentuais de Disponibilidade do Brilho Solar ao Longo do Ano nas Três Estações.

Mês/Estação	Rio Branco	Tarauacá	Cruzeiro do Sul
Jan	29,1 %	29,4 %	29,7 %
Fev	26,6 %	27,1 %	27,3 %
Mar	30,5 %	31,1 %	30,8 %
Abr	40,1 %	41,3 %	41,5 %
Mai	46,8 %	47,5 %	47,7 %
Jun	52,8 %	54,3 %	54,7 %
Jul	63,6 %	65,3 %	65,4 %
Ago	54,7 %	57,6 %	58,9 %
Set	48,1 %	50,6 %	51,6 %
Out	43,9 %	45,4 %	45,3 %
Nov	38,7 %	40,3 %	40,1 %
Dez	31,6 %	32,3 %	32,0 %

Comparadas ao fotoperíodo, essas curvas apresentam variação de 26,6 % em fevereiro até 65,4 % em julho, demonstrando, assim, a disponibilidade maior de horas de sol no período do meio do ano que corresponde ao inverno no hemisfério sul. Desses resultados, foram determinados os percentuais de disponibilidade do brilho solar em relação ao fotoperíodo ao longo do ano nas estações, cujos valores estão apresentados na Tabela 4 acima.

Estes resultados demonstram uma disponibilidade maior do brilho solar na estação do inverno, e menor no verão, para essas latitudes, o que representa uma característica climática da região, posicionando os valores máximos no mês de julho e os valores mínimos nos meses de fevereiro.

Em seguida foram verificadas as correspondências entre as medidas de insolação das estações meteorológicas convencionais no estado do Acre, tomando como referência a estação que apresentou a maior média diária mensal em relação à outra. A Figura 7 mostra as correlações das médias diárias mensais de horas de sol entre as cidades de Rio Branco e Tarauacá, Rio Branco e Cruzeiro do Sul, e Tarauacá e Cruzeiro do Sul.

Para confrontar os resultados obtidos com outros da literatura específica, devido ao comportamento praticamente coincidente das medidas de médias diárias mensais das três estações apresentadas na Figura 6, tomou-se a média aritmética simples entre elas para compará-la aos resultados apresentados por Duarte (2006) e por Tiba (2000), conforme se pode observar na Figura 8 a seguir.

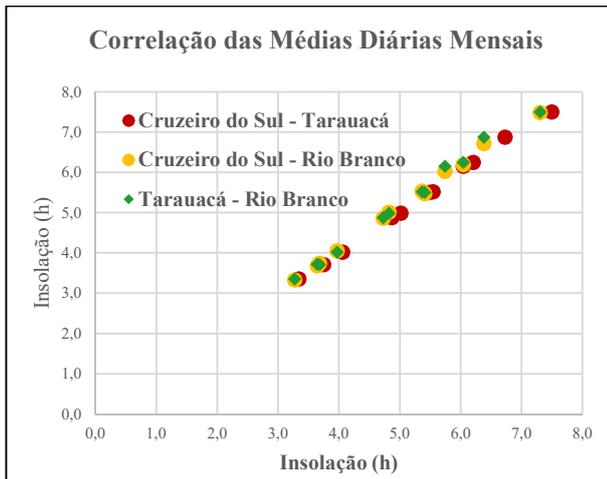


Figura 7: Correlações entre médias diárias mensais das estações.

De acordo com resultados das correlações entre as médias diárias mensais apresentados na Figura 7, estimaram-se os fatores de proporcionalidade e os coeficientes de correlação percentuais entre as medidas das médias diárias mensais das horas de sol entre as estações. A Tabela 5 a seguir mostra esses parâmetros para cada uma das correlações obtidas pelas comparações realizadas.

Tabela 5: Correlação, Fator de Proporcionalidade e Coeficiente de Correlação (%).

Correlação	Fator de Proporcionalidade	Coeficiente de Correlação (%)
Tarauacá – Rio Branco	1,032	99,84
Cruzeiro do Sul – Rio Branco	1,039	99,62
Cruzeiro do Sul – Tarauacá	1,007	99,92

O coeficiente de correlação descreve o nível e o sinal da correlação entre as duas medidas. Assim, nos três casos, de acordo com os resultados obtidos para esse parâmetro, pode-se observar que o fator de proporcionalidade entre as médias diárias mensais calculadas demonstra uma correspondência bastante forte entre suas medidas. Os resultados obtidos para os fatores de proporcionalidade entre as médias mensais de insolação nas três estações indicam comportamentos praticamente idênticos, pois as diferenças entre eles podem variar de 0,7 % até 3,9 %.

Na Figura 9, a comparação da média de insolação diária mensal entre as três estações com os dados do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA, 2000) mostra divergências principalmente nos meses de março, abril, julho, setembro, novembro e dezembro, sendo maior ao longo de todo o ano. Em relação a Duarte (2006), esse resultado também se mostra superior em todos os meses, mas apresenta uma melhor concordância entre suas tendências, mesmo com discrepâncias significativas nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e novembro.

Finalmente, as Normais Provisórias de Insolação obtidas nesse estudo para o período de 1991 até 2015 foram comparadas com as informações disponibilizadas pelo INMET referentes aos períodos de 1961 a 1990 e de 1981 a 2010. Dessa forma, as médias diárias mensais foram convertidas em médias mensais de insolação através da multiplicação pelo número de dias do respectivo mês. As Figuras 9-a, 9-b e 9-c apresentam essas comparações para as estações de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul, respectivamente.

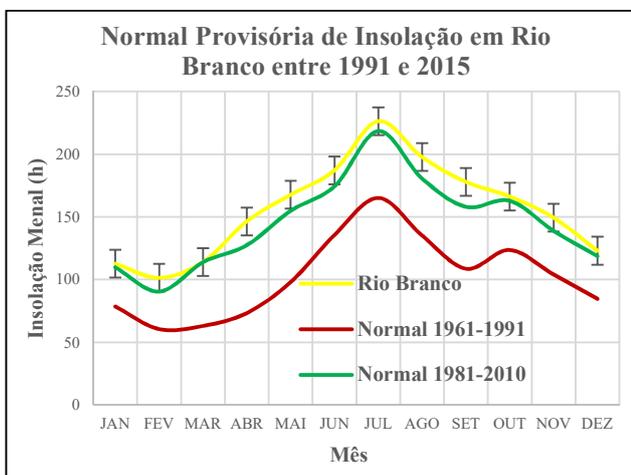


Figura 9-a: Comparação da Normal Provisória de Insolação em Rio Branco.

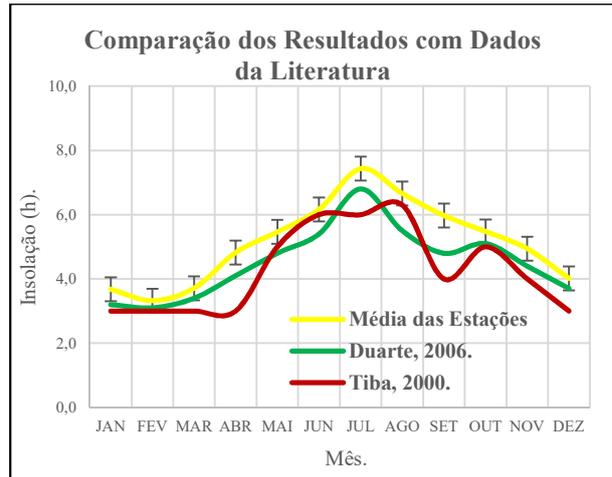


Figura 8: Comparação dos resultados com dados da literatura.

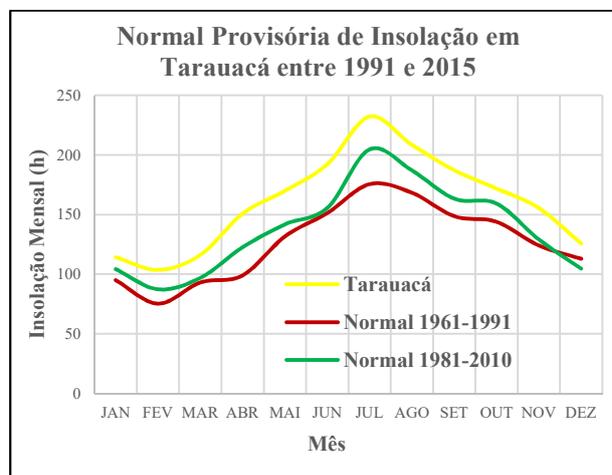


Figura 9-b: Comparação da Normal Provisória de Insolação em Tarauacá.

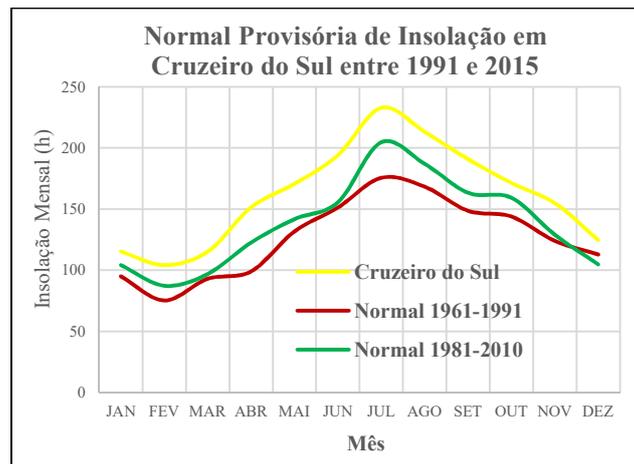


Figura 9-c: Comparação da Normal Provisória de Insolação em Cruzeiro do Sul.

Para os dados da estação de Rio Branco, considerando o erro padrão dessas medidas, pode-se constatar a equivalência estatística entre a Normal Provisória proposta por esse estudo e a Normal Climatológica de 1981 a 2010, exceto nos meses de abril, agosto e setembro. Já em relação à Normal Climatológica de 1961 a 1990 as discrepâncias são bem acentuadas e ao longo de todo o ano. Em Tarauacá, só houve equivalência estatística entre as medidas das Normais Climatológicas Provisórias desse estudo e as Normais Climatológicas de 1981 a 2010 nos meses de janeiro e outubro, enquanto em relação às Normais Climatológicas de 1961 a 1990 apenas para o mês de janeiro. Por último, em Cruzeiro do Sul, só houve equivalência dos resultados desse estudo nos meses de janeiro e outubro com a Normal de 1981 a 2010 e em dezembro com a Normal de 1961 a 1991. Nos três casos apresentados anteriormente, as comparações indicam uma ampliação dos valores das médias diárias mensais para as Normais Provisórias de Insolação obtidas no desenvolvimento dessa pesquisa em relação às Normais de 1961 a 1990 e de 1981 a 2010.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.

De acordo com a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos pelo presente trabalho, constatou-se que a ausência dos dados nas estações para o referido período não implicou em discrepâncias significativas nos valores das médias diárias mensais de horas de sol no estado do Acre.

As medidas de tendência central e de dispersão das médias diárias mensais obtidas da análise estatística aplicada indicaram uma maior variabilidade dos resultados para a estação meteorológica de Cruzeiro do Sul, e idênticas para Rio Branco e Tarauacá.

As curvas de insolação média mensal para as três estações demonstraram um comportamento muito semelhante ao longo do ano, com valores máximos ocorrendo no mês de julho e mínimos em fevereiro, os quais também podem ser observados nas correlações lineares obtidas entre elas.

A análise das médias mensais de insolação através do indicador MBE indicou subestimação dos resultados para a estação de Rio Branco e o adequado ajustamento das medidas nos casos de Tarauacá e Cruzeiro do Sul. Por meio do indicador MAD, verificaram-se as maiores diferenças entre as medidas mensais e suas respectivas médias no mês de agosto para Rio Branco e Cruzeiro do Sul e, em junho, para Tarauacá. Através do indicador RMSE, os desvios em relação às médias mensais específicas de cada estação também ocorreram em agosto para Rio Branco e Cruzeiro do Sul e em junho para Tarauacá.

As três correspondências determinadas a partir das médias mensais calculadas para cada estação indicaram correlações extremamente fortes, bem como fatores de proporcionalidade distintos, justificando a quase superposição das curvas de insolação, já que as diferenças entre elas variam de 0,7 % a 3,9 %. A disponibilidade percentual do brilho solar para as três estações varia de 26,6 % em fevereiro na estação de Rio Branco até 65,4 % em julho na estação de Cruzeiro do Sul, caracterizado, assim, provavelmente devido ao clima específico da região.

As comparações entre as curvas de insolação média mensal ao longo do ano e alguns resultados das referências bibliográficas apresentaram, em todos os casos, resultados maiores para os valores obtidos nesse estudo, bem como em relação às Normais Provisórias de Insolação quando comparadas às informações referentes aos períodos de 1961 a 1990 e de 1981 a 2010, disponibilizadas pelo INMET.

Como possibilidades de continuação da pesquisa, sugere-se sua ampliação do banco de dados aqui empregado através da utilização das estações meteorológicas automáticas na região e/ou a compilação dos dados de outras regiões. Além disso, o passo mais imediato é a validação dos resultados aqui apresentados para modelagem da disponibilidade temporal ao longo do ano da radiação solar na região, uma vez que sua determinação pode ser feita a partir das informações sobre as horas de sol no local.

Dessa forma, espera-se ter contribuído para o aprofundamento do estudo sobre o comportamento da variabilidade anual da insolação através da análise estatística realizada, em específico no caso do estado do Acre, alcançando-se, assim, o objetivo principal proposto neste trabalho.

Agradecimentos

O autor agradece ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados utilizados nesse estudo através de seu Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3534-1:2010. “Estatística- Vocabulário e símbolos Parte 1: Termos estatísticos gerais e termos usados em probabilidade”, Rio de Janeiro, 2010. 69 p.
- Acre. Governo do Estado do Acre. Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese. 2. Ed. Rio Branco: SEMA, 2010. 356 p.
- Alves, J. F. C. et al. Duração do brilho solar obtido por diferentes sensores. XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Minas Gerais, 2015.
- Agunbiade, D. A.; Ogunyinka, P. I. Effect of Correlation Level on the Use of Auxiliary Variable in Double Sampling for Regression Estimation. *Open Journal of Statistics*, vol.3, p. 312-318, 2013.
- Andrade, A. M. D. et al Downward longwave radiation estimates for clear and all sky conditions in Central Amazonia. *Revista Brasileira de Climatologia*, ano 17, vol. 28, p. 602-618, JAN/JUN 2021.
- Bexaira K. P. et al. Coeficientes de Angström-Prescott para estimar a radiação solar no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 33, n. 3, p. 401-411, 2018.
- Ceballos, J. C.; Rodrigues, M. L. Estimativa de insolação mediante satélite geostacionário: Resultados preliminares. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008.
- Chegaar, M.; Lamri A.; Chibani A. Estimating Global Solar Radiation Using Sunshine Hours. *Energy Renewable: Physique Energétique*, pp. 7-11, 1998.
- Collares-Pereira, M.; Rabl, A. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values *Solar Energy* Vol. 22, pp. 155-164. Pergamon Press Ltd., 1979.
- Duarte, A. F. Aspectos da climatologia do acre, brasil, com base no intervalo 1971 – 2000. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3b, p. 308-317, 2006.
- Duarte, A. F. Valores de insolação, medidos em rio branco - ac, como contribuição para o atlas solarimétrico da Amazônia. *Anais do X Congresso Brasileiro de Energia*. RJ: COPPE / UFRJ. V.I. p.385-390, 2004.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A.; Blair, N. *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2020.
- Hamon, R. W.; Leonard L. W.; Wilson, W. T. Insolation as an Empirical Function of Daily Sunshine Duration. *Monthly Weather Review*, vol. 82, n. 6, 1954.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acessado em: out/2020.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: www.portal.inmet.gov.br.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. *Academic Express*, 1983.
- Kallioğlu, M. Analysis Of Sunshine Hours And Global Solar Radiation For Mardin Of Turkey. *Third International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Valencia- Spain, vol. 2, 2015.
- Matzarakis, A. P.; Katsoulis, V. D. Sunshine duration hours over the Greek region. *Theoretical and Applied Climatological*. Vol. 83, p. 107–120, 2006.
- Mbiaké, R. et al. The Relationship between Global Solar Radiation and Sunshine Durations in Cameroon. *Open Journal of Air Pollution*, vol.7, p. 107-119, 2018.
- Mohandes, M. A.; Rehman S. Estimation of sunshine duration in Saudi Arabia. *Journal Renewable Sustainable Energy*. Vol. 5, n. 033128, 2013.
- Montgomery, D. C.; Runger, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. EUA, 2004.
- Morettin, P. A.; Bussab W. O., *Estatística Básica – 6. ed. – São Paulo: Saraiva*, 2010.
- Muneer, T. *Solar radiation and daylight models*. Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.
- Neske S. About the Relation between Sunshine duration and cloudiness on the basis of data from Hamburg. *Journal of Solar Energy* Volume 2014, Article ID 306871, 7 pages.
- Pedrosa, M. H. O.; Mariano, V. Análise da tendência da irradiação solar e temperatura ambiente no agreste nordestino empregando dados medidos de longo prazo. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, abril de 2018
- Pereira, E.B. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
- Pereira, L. H.; Nascimento, P. S. S. Avaliação das normais climatológicas em municípios do Nordeste brasileiro no período de 1961 a 2010. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 13-27, jan 2020.
- Pinto, J. V. N. et al. Calibration of methods to estimate solar irradiance in Northeastern Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 2, p. 345 355, 2020.
- Rabl, A. *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York, Oxford University Press, 1985.
- Rahimzadeh, F.; Pedrama, M.; Kruk, M. C. An examination of the trends in sunshine hours over Iran, *Meteorological Applications*. Vol. 21, p. 309–315, 2014.
- Reboita, M. S.; Kruche, N. Normais Climatológicas Provisórias de 1991 a 2010 para Rio Grande, RS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 33, n. 1, p. 165-179, 2018.

- Suehrcke, H.; Bowden, R. S.; Hollands, K.G.T. Relationship between sunshine duration and solar radiation. *Solar Energy*, vol.92, p. 160-171, 2013.
- Tiba, C. Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife, Editora Universitária da UFPE. Ed. 2000.
- Tiba, C.; Fraidenraich, N. Analysis of monthly time series of solar radiation and sunshine hours in tropical climates. *Renewable Energy*, vol. 29, n. 7, p. 1147-1160, 2004.
- WMO-Nº 8. Guide to Instruments and Methods of Observation Volume I – Measurement of Meteorological Variables. World Meteorological Organization, 2018.

STATISTICAL ANALYSIS OF SOLAR BRIGHTNESS IN ACRE STATE BETWEEN 1991 AND 2015 FOR INSOLATION PROVISIONAL CLIMATOLOGICAL NORMALS DETERMINATION

Abstract. *In order to contribute to the understanding of the temporal variability of insolation and the deepening of the theme, this work carried out a statistical analysis on the monthly daily averages of hours of sunshine from the daily data collected by conventional meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET) in the state of Acre between 1991 and 2015 to present Provisional Climatological Normals for that parameter. For this purpose, measures of central tendency, dispersion, asymmetry and kurtosis for each station were determined, as well as the results for the statistical indicators of mean error (MBE), mean absolute deviation (MAD) and mean square error (RMSE). The results showed that the monthly mean insolation curves for the three seasons showed a very similar behavior throughout the year, with availability of sunlight in the higher values in the local winter period, probably due to the characteristics of the local climate. Linear correlations between these measures were also obtained, giving rise to proportionality factors and correlation coefficients. Finally, comparisons were made with the records described by other authors and with the Climatological Normals for the periods 1961 to 1990 and 1981 to 2010. The results showed that the monthly average insolation curves for the three seasons showed a very similar behavior throughout the year with higher values when compared to the literature, as well as for the Provisional Insolation Normals.*

Key words: *Statistical Analysis, Insolation (Sunshine Brightness or Hours of Sunshine), Provisional Insolation Normals.*