




## SAZONALIDADE DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM SUPERFÍCIE VERTICAL

*Seasonality of global solar radiation on vertical surface*

*Estacionalidad de la radiación solar global en superficie  
vertical*

Camila Piacitelli Tieghi  

Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São  
Paulo, Brasil  
camila.piacitelli@unesp.br

Alexandre Dal Pai  

Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São  
Paulo, Brasil  
dal.pai@unesp.br

### Resumo

A radiação solar é fonte energética vital de todos processos existentes na Terra. Além disso, atualmente, com uma preocupação crescente em relação à utilização de fontes alternativas e sustentáveis de energia, seu uso tem sido utilizado como uma boa solução para conversão energética, controle de temperatura de água e conforto térmico. Em superfícies inclinadas, a orientação e o ângulo da inclinação da superfície alteram os níveis energéticos recebidos se comparados com uma superfície horizontal. Medidas da irradiação solar em superfícies verticais podem contribuir para planejamentos de instalações de painéis solares nas fachadas de construções, conforto térmico e iluminação natural. Este trabalho teve como objetivo avaliar os dados da irradiação solar global em superfície vertical orientada ao Norte medidos durante o ano de 2010 na Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu. Foi comparada as medidas da radiação solar global em superfície vertical com superfície horizontal, a fim de se analisar os níveis quantitativos de irradiação solar global em superfície vertical no decorrer do ano para Botucatu–SP. Verificou-se também diferenças sazonais significativas entre as radiações solares global vertical e horizontal. Nos meses de verão, a irradiação medida na superfície vertical é composta basicamente das parcelas difusa e refletida. Para uso da irradiação solar durante o ano, recomenda-se a superfície vertical para os meses de maio a julho. Nos demais meses, recomenda-se a superfície horizontal.

**Palavras-chave:** Energia solar. Inclinada. Irradiação solar global. Vertical

### Abstract

Solar radiation is a vital source of all processes on Earth. Besides that, currently, with a growing concern in relation to the use of alternative and sustainable sources of energy, its use has been used as a good

solution for energy conversion, water temperature control and thermal comfort. On inclined surfaces, an orientation and the angle of inclination of the surface alter the energy levels received compared to a horizontal surface. The measures of solar irradiation on vertical surfaces can contribute to the planning of installations of solar panels on building facades, thermal comfort and natural lighting. This work aimed to evaluate the data of global solar irradiation on the vertical vertical surface, oriented to the north measured during 2010 at the Faculty of Agronomic Sciences at UNESP in Botucatu. It was compared as measures of global solar radiation on the vertical surface with horizontal surface, in order to analyze the quantitative levels of global solar radiation on the vertical surface during the year for Botucatu-SP. There were also seasonal differences applicable between global vertical and horizontal solar radiation. In the summer months, the irradiation measured on the vertical surface is basically composed of the diffuse and reflected portions. For the use of solar irradiation during the year, a vertical surface is recommended for the months of May to July. In the other months, the horizontal surface is recommended.

**Keywords:** Inclined. Global solar radiation. Solar Energy. Vertical.

### **Resumen**

La radiación solar es una fuente de energía vital de todos los procesos en la Tierra. Además, hoy en día, con una preocupación creciente en relación con el uso de fuentes de energía alternativas y sostenibles, su uso se ha utilizado como una buena solución para la conversión de energía, el control de la temperatura del agua y el confort térmico. En superficies inclinadas, la orientación y el ángulo de la pendiente de la superficie cambia los niveles de energía recibidos en comparación con una superficie horizontal. Las medidas de irradiación solar en superficies verticales pueden contribuir a la planificación de instalaciones de paneles solares en fachadas de edificios, confort térmico e iluminación natural. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar los datos globales de irradiación solar en una superficie vertical orientada hacia el Norte, medidos durante 2010 en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la UNESP en Botucatu. Las mediciones de la radiación solar global en una superficie vertical con una superficie horizontal se compararon para analizar los niveles cuantitativos de la radiación solar global en una superficie vertical durante el año para Botucatu - SP. También hubo diferencias estacionales significativas entre la radiación solar global vertical y horizontal. En los meses de verano, la irradiación medida en la superficie vertical se compone básicamente de las porciones difusas y reflejadas. Para el uso de irradiación solar durante el año, se recomienda la superficie vertical para los meses de mayo a julio. En los otros meses, se recomienda la superficie horizontal.

**Palabras clave:** Energía solar. Inclinada. Radiación solar global. Vertical.

Submetido em: 12/11/2020

Aceito para publicação em: 27/01/2022

Publicado em: 16/02/2022

## 1. INTRODUÇÃO

Diferentemente da matriz de combustíveis fósseis, a energia solar é uma energia renovável e limpa e utilizada em diversos processos físicos, biológicos e químicos, tais como evapotranspiração e balanço hídrico (GONG et al, 2019), fotossíntese (produção de biomassa Vegetal) (AMORESANO, LANGELLA & SABINO, 2015; LU et al, 2018), secagem de grãos (BADAoui et al, 2019; SINGH ; SHRIVASTAVA; KUMAR, 2019), derretimento de gelo (PENG, CHEN & ZHENG, 2019), produção de biodiesel (GUPTA & VIRENDRA, 2019), conforto térmico (KAASALAINEN et al,2020), iluminação passiva (LI et al, 2008), entre outros.

O conhecimento da distribuição de seus níveis quantitativos permite a parametrização de modelos de simulação hidrológica (FRANÇOIS & BORGA, 2017), de prevenção de incêndios (CHAPARRO et al, 2014), de processos de conversão de energia (BANTIKATLA et al, 2019). Dessa forma, a criação de um banco de dados de das medidas precisas da radiação solar permitiria o uso mais assertivo dessa forma de energia, com impactos diretos em engenharia (HUANG et al., 2019; PEREIRA et al., 2019), arquitetura (GONG et al., 2019; MORENO & HERNÁNDEZ, 2018), meteorologia (SUN et al., 2015), agronomia (EDREIRA et al., 2020), medicina (CESTARI & BUSTER, 2017; SWAMINATHAN et al., 2019), dentre outros.

No entanto, a radiação solar ainda não é medida de forma adequada na superfície terrestre devido aos elevados custos operacionais (treinamento de recursos humanos), instrumentais (sensores e aparelhos de medidas) e à falta de uma política pública apropriada. Há poucos centros/instituições que monitoram, de rotina, as radiações solares global, difusa e direta em superfície. Portanto, na ausência de um banco de dados de qualidade de medidas da radiação solar, inúmeros trabalhos sobre modelagem de radiação solar em função de outros parâmetros meteorológicos mais facilmente medidos (insolação, temperatura do ar, umidade relativa, etc) são encontrados na literatura especializada: modelos matemáticos (TAO et al., 2018), estocásticos (BANKO et al.,2019; DONG et al.,2020), físicos (SCARPA; BIANCO; TAGLIAFICO, 2018), estatísticos (ZHANG et al., 2019), de inteligência artificial (KHOSRAVI et al., 2018), dentre outros.

A grande maioria desses trabalhos está voltada para estudos da radiação solar em superfície horizontal. No entanto, aplicações como design, avaliação de desempenho e otimização em sistemas de conversão fotovoltaica e fototérmica requerem informações da radiação solar em superfícies inclinadas (DESPOTOVIC & NEDIC, 2015; OTHMAN; BELKILANI;

BESBES, 2018) ou até mesmo em superfícies verticais (BAUMANN et al.,2019; CUCE, 2016; DÍEZ-MEDIAVILLA et al.,2019), as quais são menos frequentes na literatura especializada (SCOLAR, 2003; SOUZA, 2009).

Além das dificuldades financeiras e operacionais já citadas, medidas da radiação solar em superfícies inclinadas são influenciadas pelo albedo (superfícies circunvizinhas), que depende da orientação e do ângulo de inclinação da superfície, além da cor e rugosidade da superfície refletora (GUEYMARD et al., 2019), aumentando assim o grau de complexidade do seu processo de medida.

Pensando no consumo responsável de energia, setores como engenharia civil e arquitetura têm se interessado nos últimos anos por informações da radiação solar em superfícies verticais visando, principalmente, aplicações em conforto térmico (YANG et al., 2020; Zhang et al.,2018) e em iluminação ativa (MACHETE et al., 2018; PENG et al., 2019) e passiva (YEH, 2019). Com tais informações, processos construtivos de prédios e de ambientes inteligentes poderão ser aprimorados. Nesse sentido, o objetivo do trabalho é apresentar as medidas da radiação solar global em superfície vertical, analisar sua sazonalidade e compará-la com os valores da radiação solar global medida em superfície horizontal. Dessa forma será possível se determinar as melhores épocas do ano para fins de seu aproveitamento energético.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo é baseado em medidas da irradiação global em planos horizontal e vertical orientado ao Norte geográfico, situado na estação de radiometria do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP de Botucatu (latitude 22° 54' S, longitude 48° 27' O e altitude 716 m). Foram utilizados os dados medidos no ano de 2010.

A cidade de Botucatu tem cerca de 130.000 habitantes e é rodeada por uma formação de relevo assimétrico denominada Cuesta de Botucatu e pelas bacias hidrográficas do Tietê e do Paranapanema. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima local é o Cwa (clima subtropical úmido), com verão quente, úmido e chuvoso e inverno seco e de temperaturas amenas.

Os valores de temperatura e umidade relativa seguem as variações astronômicas, com valores máximos de temperatura e umidade relativa em fevereiro (23,12 °C e 78,25% respectivamente) e valores mínimos de temperatura em julho (17,10 °C) e umidade relativa em agosto (63,97%). A estação chuvosa ocorre no verão e primavera, acompanhada de elevada nebulosidade. Cerca de 80% da precipitação anual ocorre nesse período, com máxima no mês de janeiro (246,2 mm). Nas estações do inverno e outono, a precipitação média é inferior a 100 mm mensais, com mínima em agosto (36,1 mm) (CODATO et al., 2008).

Para os procedimentos da coleta de dados, os valores das irradiâncias solares foram monitorados por um sistema de aquisição de dados automático modelo Datalogger 23X da empresa Campbell Scientific Inc com frequência de varredura de 0,2Hz. Para a obtenção dos valores das irradiâncias solares diárias foram calculados os valores médios a cada 5 minutos e armazenados no formato W/m<sup>2</sup>.

A irradiância solar global em superfície horizontal foi medida com piranômetro Eppley-PSP. A irradiância solar global no plano vertical foi medida com piranômetro Kipp-Zonen – CM3. Para medir a irradiância global em superfície vertical, o piranômetro foi posicionado sobre plano inclinado à 90° com a face voltada para o Norte.

## 2.1. Controle de Qualidade e Avaliação de Medidas

O procedimento de controle de qualidade foi aplicado para avaliar a confiabilidade das medidas, uma vez que podem ter sido afetadas por problemas causados pela instrumentação (efeito do cosseno, seletividade espectral) ou por eventos externos (excremento de aves ou orvalho sobre o sensor e rompimento do cabeamento) no local de medição (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007). Portanto, foram impostas condições para identificar e rejeitar valores incorretos (acima ou abaixo do esperado) para cada componente das irradiâncias solares (Tabela 1).

**Tabela 1** - Condições de rejeição de medidas do procedimento de controle de qualidade. E (elevação solar)  $I_G$  (irradiação solar global horizontal),  $I_{GV}$  (irradiação solar global vertical),  $I_D$  (irradiação solar difusa horizontal),  $I_{DV}$  (irradiação solar difusa vertical).

Nº da Avaliação	Condição de Rejeição	Medida Avaliada
1	$E < 5^\circ$	$I_G, I_{GV}, I_D, I_{DV}$
2	$I_G \leq 0$	$I_G$
3	$I_{GV} \leq 0$	$I_{GV}$
4	$I_D \leq 0$	$I_D$
5	$I_{DV} \leq 0$	$I_{DV}$
6	$I_D/I_G < 1.05$ (quando $E > 15^\circ$ e $I_G > 50 \text{ W/m}^2$ )	$I_G, I_D$
7	$I_D/I_G < 1.10$ (quando $E \leq 15^\circ$ e $I_G > 50 \text{ W/m}^2$ )	$I_G, I_D$
8	$I_{DV}/I_{GV} < 1.05$ (quando $E > 15^\circ$ e $I_{GV} > 50 \text{ W/m}^2$ )	$I_{GV}, I_{DV}$
9	$I_{DV}/I_{GV} < 1.10$ (quando $E \leq 15^\circ$ e $I_{GV} > 50 \text{ W/m}^2$ )	$I_{GV}, I_{DV}$

**Fonte:** Elaborado pelos autores (2020).

O efeito do cosseno, ângulo em que a radiação solar atinge o sensor, é o problema mais recorrente em piranômetros (MUNEER; YOUNES; MUNAWWAR, 2007). Pois quanto mais agudo for, geralmente ao nascer e pôr do sol, maior é a inexactidão do valor mensurado. Neste sentido, medidas adquiridas em elevação solar menores que  $5^\circ$  (momentos após o nascer e antes do pôr do sol) foram rejeitadas para este estudo. Valores de irradiância solar menores ou iguais a zero foram, igualmente, rejeitados, uma vez que podem ser produtos de problemas no cabeamento ou no sensor do instrumento. Por fim, uma série de avaliações foi aplicada para identificar adversidades a presença de algo que estivesse obstruindo o sensor, rejeitando medições da irradiância difusa 5% ou 10% acima dos valores obtidos para a irradiância global (LONG; DUTTON, 2002). Para a filtragem dos dados da irradiação solar global vertical, foram utilizadas as medidas da irradiação solar difusa em superfície horizontal.

**Tabela 2** - Resultado da aplicação do procedimento de controle de qualidade

Irradiância Solar	Quantidade de Medidas			Filtradas
	Sem Filtragem	Menores que Zero	Maiores que as Comparações	
$I_G$	244643 (100%)	319 (0,13%)	3866 (1,58%)	240458 (98,30%)
$I_{GV}$	246600 (100%)	857 (0,35%)	7589 (3,08%)	238154 (96,57%)

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Após o procedimento de filtragem, os valores das irradiâncias solares global nas superfícies horizontal e vertical foram integrados para as partições energéticas de tempo diárias. Os dados passaram por uma análise de consistência e os valores discrepantes provenientes de erros de leitura dos sensores foram removidos.

Para caracterização da evolução temporal das irradiações solares horárias, diárias e mensais foram adotadas medidas estatísticas de posição (Média ( $\mu$ )) e de dispersão em torno da média (Desvio-padrão ( $\sigma$ )), dadas pelas equações (1) e (2), além dos valores máximos, mínimos e soma.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2)$$

Onde  $x_i$  representa cada um dos dados observados de irradiância e  $N$  é quantidade total de dados avaliados.

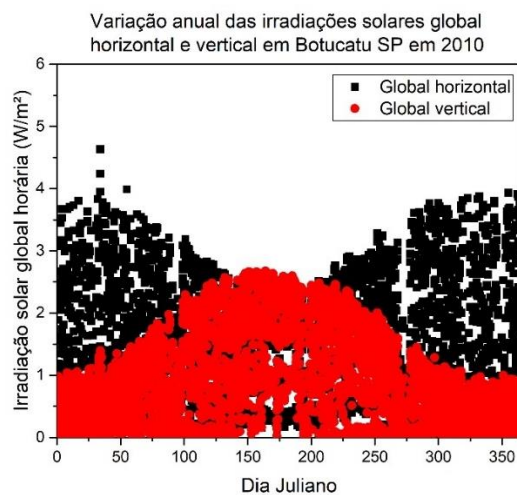
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Evolução anual das medidas da irradiação solar em superfície vertical e horizontal

A seguir, na figura 1, são apresentados os valores medidos da irradiação solar global horaria nas superfícies horizontal e vertical (90°) ao Norte, em relação aos dias do ano nos anos de 2010 medidas em Botucatu-SP. Observa-se que existe um padrão de comportamento

inverso entre a radiação solar global horizontal e a irradiação solar global vertical. Também há uma grande oscilação dos valores ao longo do ano, principalmente devido a dinâmica atmosférica das nuvens, que tem sua distribuição e concentração diferentes ao longo do ano (POLO; BALLESTRÍN; CARRA, 2016).

**Figura 1** - Variação anual das radiações solares globais horizontal e vertical (90°) ao Norte (valores diários) em Botucatu SP no ano de 2010



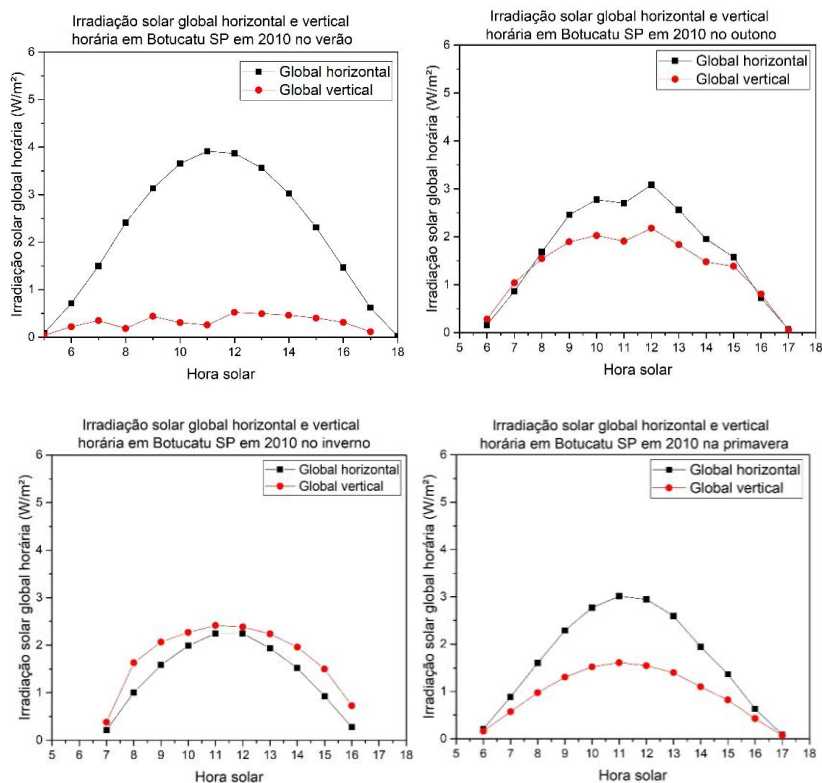
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

### 3.2. Evolução diária das medidas da irradiação solar em superfície vertical e horizontal

Informações sobre valores horários da radiação solar são essenciais tanto para conversão energética, e aproveitamento térmico da radiação solar. A figura 2 mostra a variação horária das irradiações globais horizontal e vertical ao Norte (90°) medidas nas quatro estações do ano. Foram selecionados dias de céu aberto para cada estação do ano, a fim de verificar maiores valores medidos de irradiação solar. Para o verão, o dia selecionado foi 29/12, para o outono, 9/4, para o inverno, 11/7 e para primavera 22/9.



**Figura 2 -** Variação horária das irradiações globais horizontal e vertical ao Norte (90°) medidas nas quatro estações do ano em Botucatu SP em 2010



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Para a irradiação solar global horizontal, o ganho energético é maior que para a superfície vertical ao longo de todo o ano, ficando com valores menores apenas no período do inverno. O comportamento das medidas é similar, com picos de ganhos energéticos das 10 às 14 horas. No verão, a soma total da irradiação solar global horizontal diária chega há 30,2749 W/m<sup>2</sup>, e já para o inverno, incidiu 13,9276 W/m<sup>2</sup>. Durante o outono, para o dia selecionado, houve aumento da nebulosidade as 11 e as 14 horas, causando uma diminuição das medidas nestes horários.

Para a irradiação solar vertical (90°), seus maiores ganhos energéticos são nos meses de inverno. Isso se dá pelo fato de que, estando no hemisfério Sul, ao inclinar uma superfície ao Norte, simula-se que a superfície inclinada esteja em uma superfície horizontal, em uma latitude maior (mais ao Norte). Para uso de placas solares (térmicas ou fotovoltaicas), indica-se a fixação das placas na face Norte dos telhados, devido à declinação solar, nos meses de inverno a posição do sol está mais ao Norte. Por este motivo, a incidência da irradiação solar no período de inverno incidiu um total diário de 17,5658 W/m<sup>2</sup> e já para o período do verão, apenas 4,1075 W/m<sup>2</sup> em superfície vertical. No período do verão, com a declinação solar

atingindo seus limites mínimos, o sol não incide no sensor, visto que nesta época o sol percorre sua trajetória atrás do sensor de medida (piranômetro). Assim sendo, no período do verão, a irradiação solar global vertical é composta apenas pelas porções difusa e refletida do solo.

A tabela 3 mostra os valores de mínimo, de máximo, os valores médios ( $\mu$ ) e soma das irradiações solares globais horizontal e vertical ao Norte horárias medidas dos dias escolhidos para as quatro estações do ano em Botucatu SP no ano de 2010.

**Tabela 3** - Valores de mínimo, de máximo, os valores médios ( $\mu$ ) e soma (em  $W/m^2$ ) das irradiações solares globais horizontal e vertical ao Norte horárias medidas nas quatro estações do ano em Botucatu SP no ano de 2010

<b>Irradiação Solar global</b>	<b>Estação</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Soma</b>
Horizontal	Verão	0,018	3,912	2,162	30,274
Vertical		0,038	0,522	0,315	4,107
Horizontal	Outono	0,070	3,084	1,716	20,595
Vertical		0,053	2,177	1,368	16,421
Horizontal	Inverno	0,213	2,247	1,392	13,927
Vertical		0,380	2,415	1,756	17,565
Horizontal	Primavera	0,088	3,013	1,694	20,333
Vertical		0,071	1,608	0,957	11,494

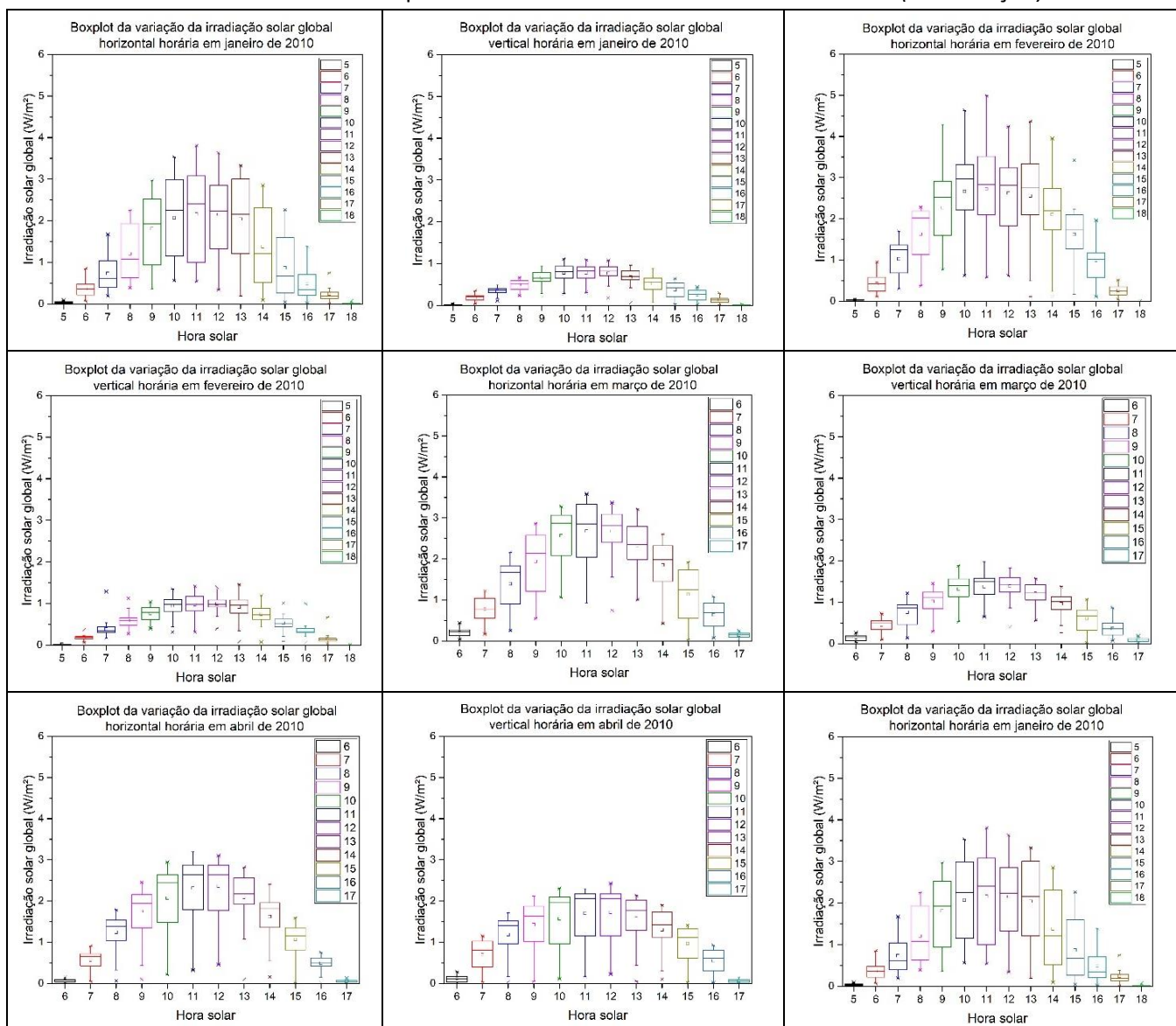
**Fonte:** Elaborado pelos autores (2020).

Para aplicações que demandam partição de tempo horárias, os dados horários das irradiações solares nas superfícies horizontal e vertical foram convertidos para valores médio-mensais medidos para cada hora do dia. A figura 3 mostra em *boxplots* os valores médio-horários das irradiações solares nas superfícies horizontal e vertical, enquanto que a Tabela 4 mostra os valores de mínimo, de máximo, os valores médios ( $\mu$ ) e soma horária das irradiações solares globais horizontal e vertical ao Norte medidas para cada mês em Botucatu SP no ano de 2010.

### 3.3. Evolução mensal das medidas da irradiação solar em superfície vertical e horizontal

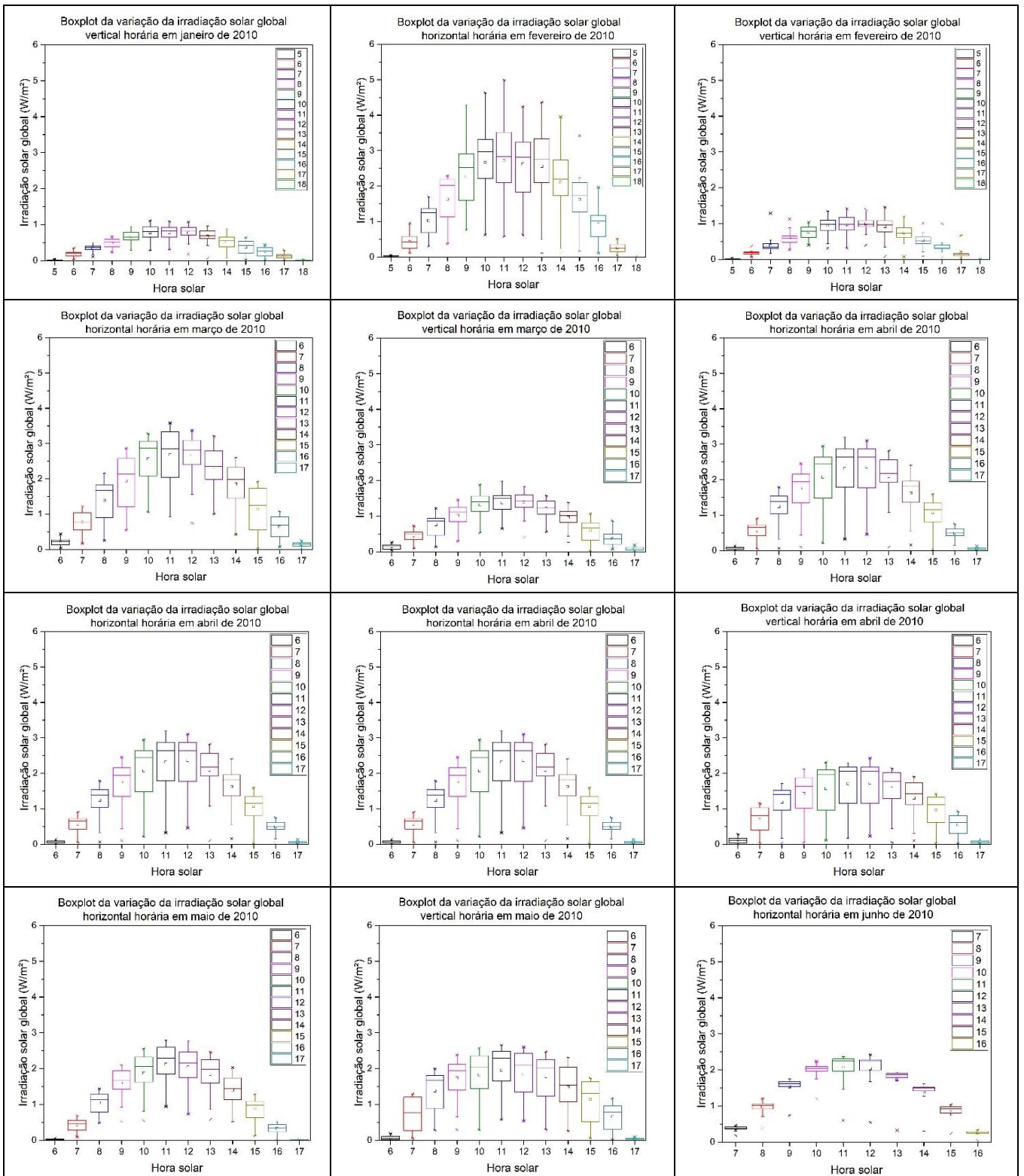
No sentido de analisar estatisticamente os dados horários mensais, foi escolhido o *boxplot* (gráfico de caixa) para visualizar com maiores detalhes as variações das medidas. O *boxplot* fornece, além dos dados médios, os *outliers* (valores atípicos), mínimo, máximo, desvio-padrão e quartis. Na Figura 3 mostra, ao lado esquerdo, a variação horária da irradiação solar global horizontal para cada mês. Ao lado direito, a variação horária da irradiação solar global vertical para cada mês.

**Figura 3 - Boxplots dos valores médio-horários das irradiações solares globais em superfícies horizontal e vertical para Botucatu SP em cada mês do ano de 2010 (continuação)**



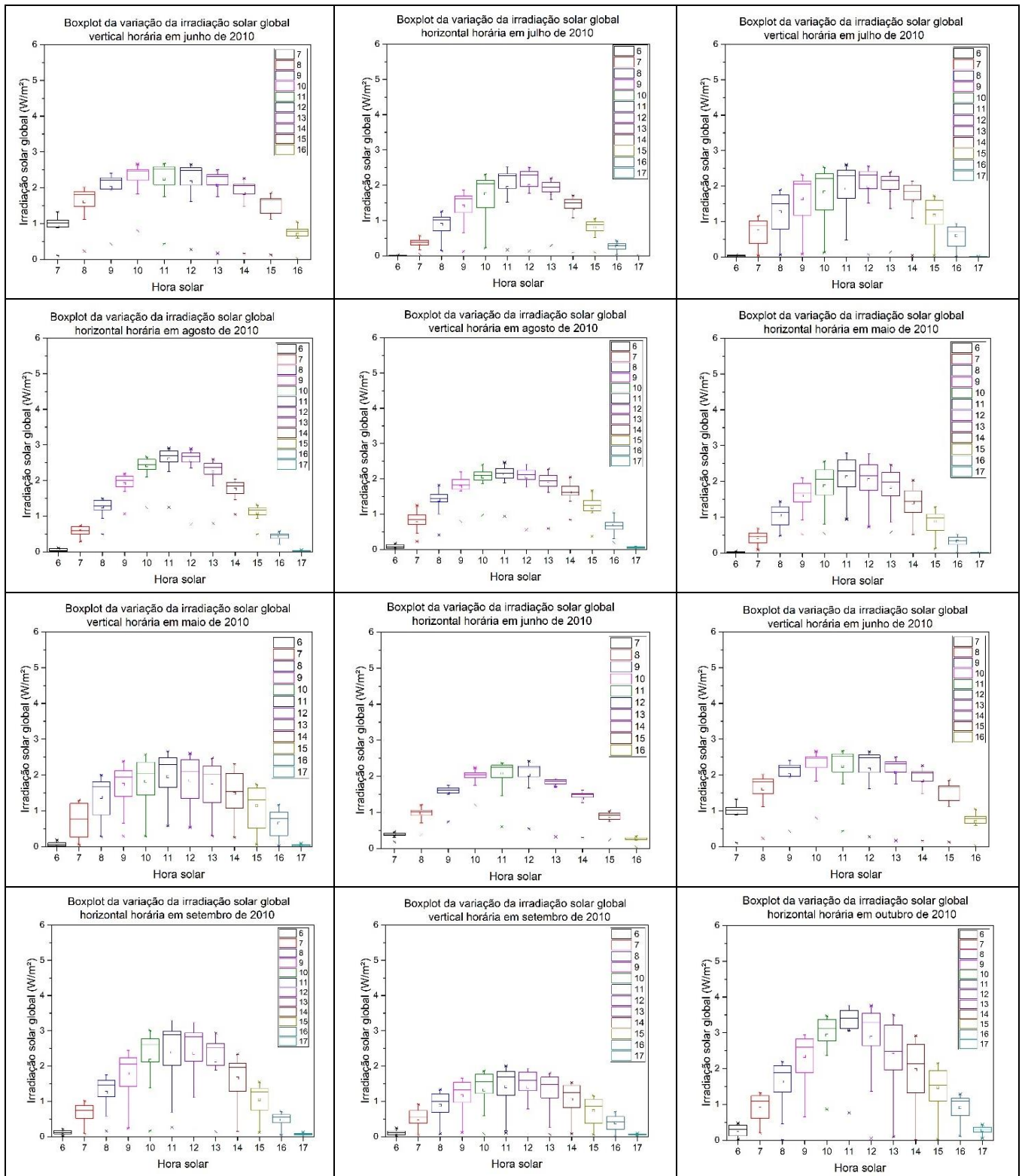
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

**Figura 3 - Boxplots dos valores médio-horários das irradiações solares globais em superfícies horizontal e vertical para Botucatu SP em cada mês do ano de 2010 (continuação)**



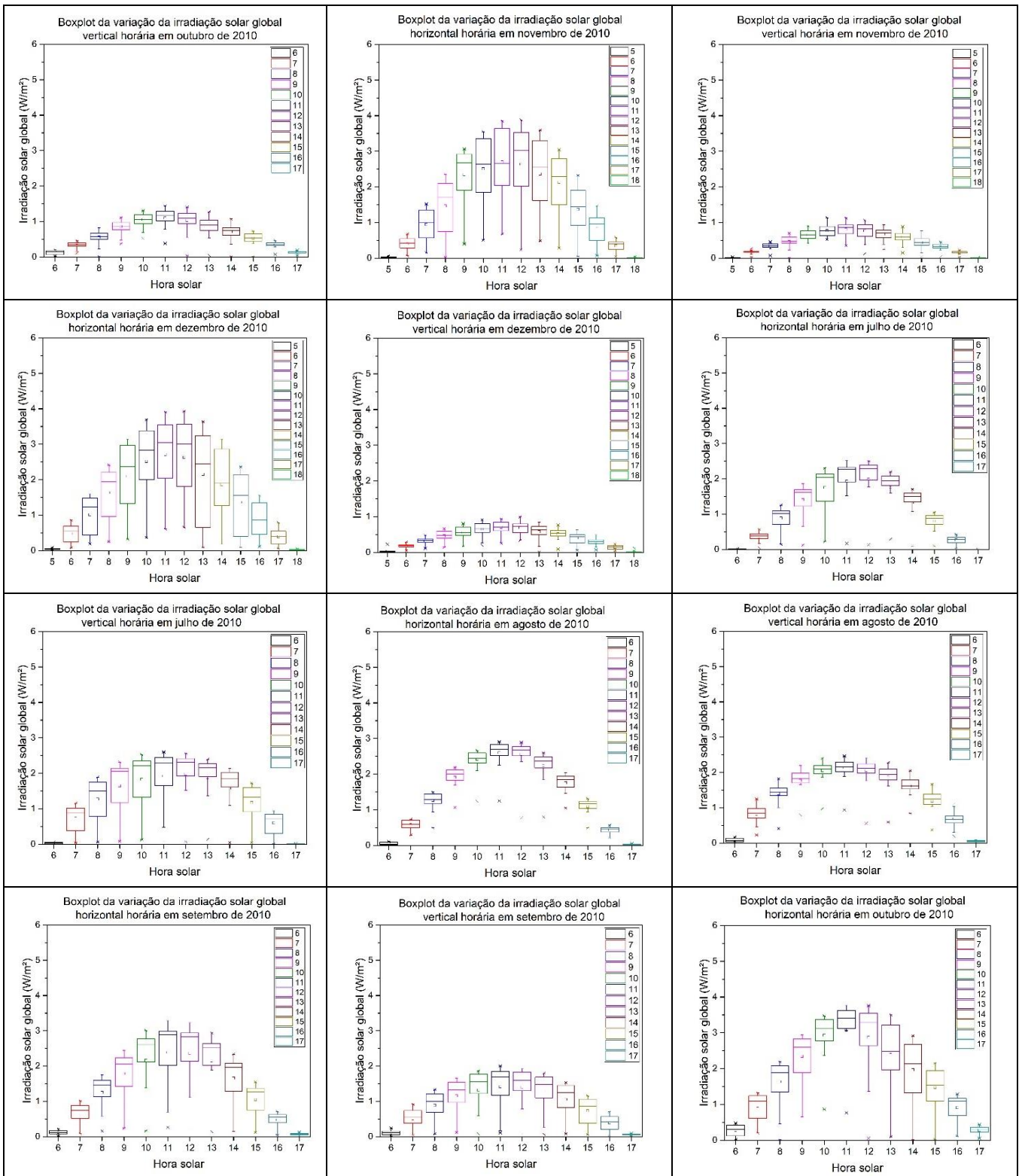
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

**Figura 3 -** Boxplots dos valores médio-horários das irradiações solares globais em superfícies horizontal e vertical para Botucatu SP em cada mês do ano de 2010 (*continuação*)



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

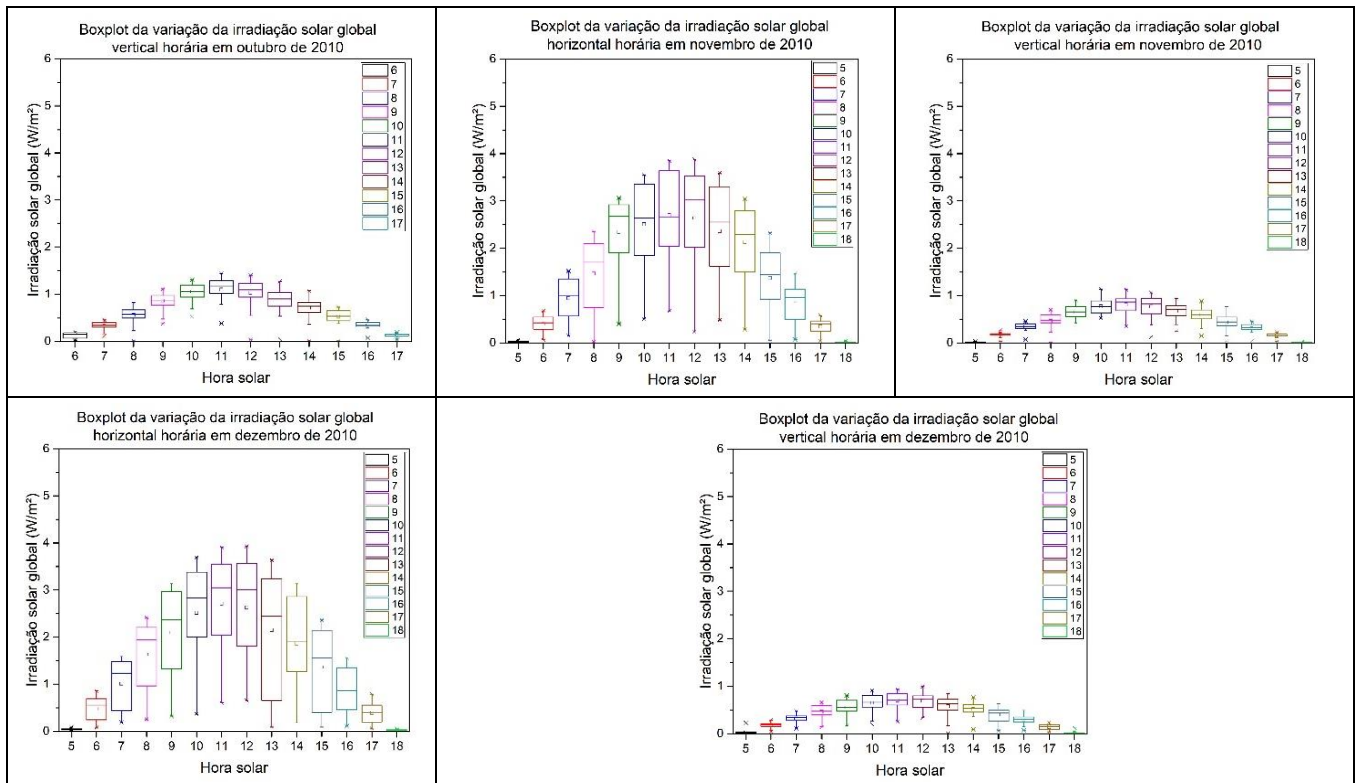
**Figura 3 -** Boxplots dos valores médio-horários das irradiações solares globais em superfícies horizontal e vertical para Botucatu SP em cada mês do ano de 2010 (continuação)



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).



**Figura 3 -** Boxplots dos valores médio-horários das irradiações solares globais em superfícies horizontal e vertical para Botucatu SP em cada mês do ano de 2010 (*continuação*)



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Para as irradiações solares global e vertical, a dispersão dos valores é maior em função da interferência da atmosfera, com seus gases, aerossóis, vapor d'água e nuvens, que são fatores que causam a atenuação dos níveis de irradiação solar na superfície terrestre, promovendo maior variabilidade (KOVADLO et al., 2018 ; OBREGÓN et al., 2018).

A amplitude observada deve-se à dinâmica atmosférica, que é diferente para cada época do ano. Verão, com maior nebulosidade, apresenta maior dispersão dos pontos, porém, para a irradiação solar global vertical, a maior dispersão dos pontos ocorreu no inverno, apesar do verão apresentar condições atmosféricas mais complexas devido à nebulosidade, o sensor posicionado na superfície vertical tem dificuldade de captar a incidência direta da irradiação, Neste período, os raios solares incidentes na superfície horizontal são mais perpendiculares por causa da declinação solar, o que compromete o ângulo de visão do sensor posicionado em uma superfície vertical, portanto, a irradiação medida na superfície vertical é composta basicamente das parcelas difusa e refletida, as quais são mais uniformes, justificando a menor variabilidade para esta época do ano.

Para a irradiação solar global horizontal, os maiores valores ocorreram às 11 horas no mês de fevereiro, incidindo  $4,9911 \text{ W/m}^2$  por hora. Para superfície vertical, os maiores valores medidos foram às 11 horas no mês de junho, incidiu  $2,6749 \text{ W/m}^2$ . Já os menores valores medidos da irradiação solar global horizontal foram às 6 horas da manhã em fevereiro, incidiu  $0,0004 \text{ W/m}^2$ . Para a superfície vertical, às 17 horas em maio, medindo  $0,0006 \text{ W/m}^2$ .

Para os valores médios em superfície horizontal, os maiores valores ocorreram no mês de outubro, às 11 horas, incidindo em média  $3,0749 \text{ W/m}^2$ . A maior média horaria para superfície vertical ocorreu no mês de junho que incidiu uma média  $2,2511 \text{ W/m}^2$  às 10 horas da manhã, as menores médias incidentes de radiação solar global para superfície horizontal e vertical ocorreram em fevereiro, incidindo  $0,0022 \text{ W/m}^2$  na horizontal a superfície vertical  $0,0035 \text{ W/m}^2$ , às 18 horas para ambas superfícies.

Em maio, das 6 às 9 horas e das 14 às 17 horas a irradiação solar global vertical é maior que em superfície horizontal. Nos meses de junho e julho, os valores da irradiação solar global vertical são maiores que em superfície horizontal do amanhecer ao pôr do Sol, principalmente no início e no final do dia, onde as diferenças de valores se intensificam. Em agosto, das 6 às 8 e das 15 às 17 a irradiação solar vertical permanece superior em comparação com superfície horizontal.

Para fins que necessitam de valores mensais da irradiação solar global, os valores das irradiâncias horárias foram integrados para partição mensal de tempo. A Tabela 4 mostra os valores medidos das irradiações solares globais em superfície horizontal e vertical ao Norte para cada mês e o percentual comparativo entre ambas.



**Tabela 4** - Valores mensais da irradiação solar global horizontal e vertical (90°) ao Norte medidos em Botucatu SP no ano de 2010

Mês	Horizontal (W/m <sup>2</sup> )	Vertical (W/m <sup>2</sup> )	Porcentagem comparativa (Vertical/Horizontal)
Jan	528,98	200,90	38%
Fev	570,50	210,80	37%
Mar	605,16	321,23	53%
Abr	515,26	423,62	82%
Maio	420,66	450,43	107%
Jun	430,21	561,65	131%
Jul	386,67	452,74	117%
Ago	524,09	486,94	93%
Set	483,08	309,21	64%
Out	579,01	209,26	36%
Nov	543,12	166,34	31%
Dez	581,28	162,19	28%

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Ao integrar a irradiação horária para irradiação solar mensal incidente para cada superfície, nota-se que nos meses de maio, junho e julho, a superfície vertical ao norte (90°) recebe maior quantidade de irradiação solar comparado com a superfície horizontal. Em maio, incidiu 420,66 W/m<sup>2</sup> em superfície horizontal e 450,42 W/m<sup>2</sup> em superfície vertical, equivalente à 107% mais que na horizontal. Em junho, 430,20 W/m<sup>2</sup> em superfície horizontal e 561,65 W/m<sup>2</sup> na vertical (131% a mais). Em julho, 386,67 W/m<sup>2</sup> na horizontal e 452,73 W/m<sup>2</sup> na vertical (117% a mais para vertical).

Nos meses de maio, junho e julho, a incidência de radiação solar global horizontal diminui, enquanto para a superfície vertical os valores aumentam, devido a declinação solar neste período do ano. Neste sentido, para o aproveitamento da irradiação solar durante o ano, entre os meses de maio a julho, a melhor inclinação da superfície é na vertical, enquanto para o restante dos meses do ano, a melhor inclinação da superfície é a horizontal.

## 4. CONCLUSÕES

A partir desse estudo, obtivemos as seguintes conclusões:

- ✓ Para uso da irradiação solar durante o ano, recomenda-se a superfície vertical para os meses de maio a julho. Nos demais meses, recomenda-se a superfície horizontal;
- ✓ Nos meses de verão, a irradiação medida na superfície vertical é composta basicamente das parcelas difusa e refletida;
- ✓ Foi verificada a diferença na sazonalidade entre as radiações solares nas superfícies horizontal e vertical.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado durante uma bolsa de estudos de doutorado apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES da Faculdade de Ciências Agrônomicas FCA UNESP de Botucatu-SP.

## REFERÊNCIAS

AMORESANO, A., LANGELLA, G. SABINO, S. Optimization of Solar Integration in Biomass Fuelled Steam Plants. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 81, p. 390-398, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215027575#!>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BADAOUI, Ouassila. HANINI, Salah; JEBLI, Ahmed ; HADDAD, Brahim; BENHAMOU, Amina. Experimental and modelling study of tomato pomace waste drying in a new solar greenhouse: Evaluation of new drying models. **Renewable Energy**, Schenectady, v. 133, p. 144-155, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118312047>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BANKO, Andrew. J.; VILLAFANE, Laura; KIM, Ji Hoon.; ESMAILY, Mahdi.; EATON, John K. Stochastic modeling of direct radiation transmission in particle-laden turbulent flow. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, Oxford, v. 226, p. 1-18, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022407318306216>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BANTIKATLA, Himabindu; NULU, Latha Devi S.M.P.; BHOGOJU, Rajinikanth; NARLANKA, Pradyumn; SIDDI, Vinay Reddy; ROYAL, Kranthi Kiran; HYMAVATHI, A. Design and fabrication of hybrid solar silicon PV system. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 19, p. 761-766, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478531933113X>. Acesso em: 15 fev. 2022.

BAUMANN, Thomas; NUSSBAUMER, Hartmut; KLENK, Markus; DREISIEBNERB, Andeas; CARIGIETA, Fabian; BAUMGARTNERA, Franz. Photovoltaic systems with vertically mounted bifacial PV modules in combination with green roofs. **Solar Energy**, Oxford, v. 190, p. 139-146,

2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X19307844>. Acesso em: 15 fev. 2022.

CALCA, Marcus Vinícius Contes, RANIERO, Matheus Rodrigues; FERNANDO, Domingos Mário Zeca; Rodrigues, Sérgio Augusto; DAL PAI, Alexandre. Outliers Detection in a Quality Control Procedure for Measurements of Solar Radiation. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 17, n. 11, p. 1815-1822, 2019. Disponível em: <https://www.inaoe.mx/~IEEElat/index.php/transactions/article/view/1490>. Acesso em: 15 fev. 2022.

CESTARI, Tania; BUSTER, Keshia. Photoprotection in specific populations: Children and people of color. **Journal of the American Academy of Dermatology**, Philadelphia, v. 76, n. 3, p. S110-S121, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0190962216308817>. Acesso em: 15 fev. 2022.

CHAPARRO, David ;VAYREDA, Jordy ; MARTINEZ-VILALTA, Jordi;VALL-LLOSSERA. Mercè; BANQUE, M.; CAMPS, Adriano; PILES, Maria. SMOS and climate data applicability for analyzing forest decline and forest fires (2014) **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, Piscataway, Art. No. 6946613. Pp. 1069-1072.

CHEN, Zhen; ZHU, Linxiao; WEI, Li; FAN, Shanhui. Simultaneously and Synergistically Harvest Energy from the Sun and Outer Space. **Joule**, Hertogenbosch, v. 3, n. 1, p. 101-110, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118304719#!>. Acesso em: 15 fev. 2022.

CODATO, Georgia; OLIVEIRA, Amauri P.; SOARES, Jacyra; ESCOBEDO, João F.; GOMES, Eduardo Nardini; DAL PAI, Alexandre. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil, **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v.93. p.57-73. 2008.

CUCE, Edrem; HARJUNOWIBOWO, Dewanto; CUCE, Pinar Mert. Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, V. 64. p, 34-59, 2016, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301897>. Acesso em: 2 abr. 2019.

DESPOTOVIC, Milan; NEDIC, Vladimir. Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly, seasonal and monthly levels. **Energy Conversion and Management**, London, v. 97, p. 121-131, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415002721>. Acesso em: 15 fev. 2022.

DÍEZ-MEDIAVILLA, Montserrat, RODRÍGUEZ-AMIGO, M.C.; DIESTE-VELASCO, M.I.; GARCÍA-CALDERÓN, T.; ALONSO-TRISTÁN, C. The PV potential of vertical façades: A classic approach using experimental data from Burgos, Spain. **Solar Energy**, Oxford, v. 177, p. 192-199, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X18311216>. Acesso em: 15 fev. 2022.

DONG, Jin; OLAMA, Mohammed M.; KURUGANTI, Teja; MELIN, Alexander M.; DJOUADI, Seddik M.; ZHANG, Yichen ; XUE, Yaosuo. Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power. **Renewable Energy**, Schenectady, v. 145, p. 333-346, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119307463>. Acesso em: 15 fev. 2022.

EDREIRA, Juan I. Rattalino; MOURTZINIS, Spyridon; AZZARI, George; ANDRADE, José F.; CONLEY, Shawn P.; LOBELL, David; SPECHT, James E.; GRASSINI, Patricio. From sunlight to seed: Assessing limits to solar radiation capture and conversion in agro-ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 280, p. 107775, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192319303910>. Acesso em: 15 fev. 2022.

FRANÇOIS, B.; BORGA, D. Z. M. Assessing small hydro/solar power complementarity in ungauged mountainous areas: A crash test study for hydrological prediction methods. **Energy**, London, v. 127, p. 716-729, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217304656>. Acesso em: 15 fev. 2022.

GONG, Fang-Ying; ZENG, Zhao-Cheng; NG, Edward; NORFORD, Leslie K. Spatiotemporal patterns of street-level solar radiation estimated using Google Street View in a high-density urban environment. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 148, p. 547-566, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318306437>. Acesso em: 15 fev. 2022.

GUEYMARD, Christian . A., LARA-FANEGO, Vicente; SENGUPTA, Manajit ; XIE, Yu. Surface albedo and reflectance: Review of definitions, angular and spectral effects, and intercomparison of major data sources in support of advanced solar irradiance modeling over the Americas. **Solar Energy**, Oxford, v. 182, p. 194-212, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X19301653>. Acesso em: 15 fev. 2022.

GUPTA, Anilkumar R.; RATHOD; Virendra, K. Solar radiation as a renewable energy source for the biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. **Energy**, London, v. 182, p. 795-801, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219310710>. Acesso em: 15 fev. 2022.

HUANG, Junpeng; FAN, Jianhua; FURBO, Simon; CHEN, Daochuan ; DAI, Yanjun; KONG, Weiqiang. Economic analysis and optimization of household solar heating technologies and systems. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 36, p. 100532, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221313881930356X>. Acesso em: 15 fev. 2022.

KAASALAINEN, Tapio; MÄKINEN, Antti; LEHTINEN, Taru; MOISIO, Malin; VINHA, Juha. Architectural window design and energy efficiency: Impacts on heating, cooling and lighting needs in Finnish climates. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 27, p. 100996, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219303870>. Acesso em: 15 fev. 2022.

KHOSRAVI, A.; NUNES, R.O.; ASSAD, M.E.H; MACHADO, L. Comparison of artificial intelligence methods in estimation of daily global solar radiation. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 194, p. 342-358, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618314872>. Acesso em: 15 fev. 2022.

KOVADLO, Pavel; SHIKHOVTSEV, Artem; LUKIN, Vladimir; KOCHUGOVAC, Elena. Solar activity variations inducing effects of light scattering and refraction in the Earth's atmosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Oxford, v. 179, p. 468-471, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682617307216>. Acesso em: 15 fev. 2022.

LI, Danny. H.W.; LAM, Tony N.T.; WONG, S.L.; TSANG, Ernest. K. W. Lighting and cooling energy consumption in an open-plan office using solar film coating. **Energy**, London, v. 33, n. 8, p. 1288-1297, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544208000856>. Acesso em: 15 fev. 2022.

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. BSRN Global Network Recommended Quality Control Tests. **BSRN Technical Report**, v. 2, 2002. Disponível em: [https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN\\_recommended\\_QC\\_tests\\_V2.pdf](https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf). Acesso em: 26 out. 2018. Acesso em: 15 fev. 2022.

LU, Xinchun; CHENG, Xiao; LI, Xianglan; CHEN, Jiquan; SUN, Minmin; JI, Ming; HE, Hong; WANG, Siyu; LI, Sen; Jianwu. SEASONAL PATTERNS OF CANOPY PHOTOSYNTHESIS CAPTURED BY REMOTELY SENSED SUN-INDUCED fluorescence and vegetation indexes in mid-to-high latitude forests: A cross-platform comparison. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 644, p. 439-451, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718323453>. Acesso em: 2 abr. 2020.

MACHETE, Rita, FALCÃO, Ana Paula; GOMES, M. Glória; RODRIGUES, A. Moret. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 177, p. 290-302, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778818309587>. Acesso em: 15 fev. 2022.

MORENO, Belen; HERNÁNDEZ, Juan A. Analytical solutions to evaluate solar radiation overheating in simplified glazed rooms. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 140, p. 162-172, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318303032>. Acesso em: 15 fev. 2022.

MUNEER, T.; YOUNES, S.; MUNAWWAR. Discourses on solar radiation modeling. **Renewable and Sustainable Energy**, London, v. 11, p. 551-602, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032105000596>. Acesso em: 15 fev. 2022.

OBREGÓN, M.A.; COSTA, M.J.; SILVA, A.M.; SERRANO, A. Impact of aerosol and water vapour on SW radiation at the surface: Sensitivity study and applications. **Atmospheric Research**,

Amsterdam, v. 213, p. 252-263, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809518301388>. Acesso em: 15 fev. 2022.

OTHMAN, A. B.; BELKILANI, K.; BESBES, M. Global solar radiation on tilted surfaces in Tunisia: Measurement, estimation and gained energy assessments. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 4, p. 101-109, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484717301403>. Acesso em: 15 fev. 2022.

PENG, Jinqing; CURCIJA, Dragan. C.; THANACHAREONKIT, Anothai; LEE, Eleanor S.; GOUDEY, Howdy; SELKOWITZ, Stephen E. Study on the overall energy performance of a novel c-Si based semitransparent solar photovoltaic window. **Applied Energy**, Oxford, v. 242, p. 854-872, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191930515X>. Acesso em: 15 fev. 2022.

PENG, Jingtang; CHEN, Zhili; ZHENG, Taojie. Study on the design and influence on performance of solar energy heat collection and snow melting device. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 162, p. 114246, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431118359210>. Acesso em: 15 fev. 2022.

PEREIRA, Júlia; GOMES, M. Glória; RODRIGUES, A. Moret; ALMEIDA, Manuela. Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 198, p. 431-443, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819300246>. Acesso em: 15 fev. 2022.

POLO, Jesús; BALLESTRÍN, Jesús; CARRA, Elena. Sensitivity study for modelling atmospheric attenuation of solar radiation with radiative transfer models and the impact in solar tower plant production. **Solar Energy**, Oxford, v. 134, p. 219-227, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16300974>. Acesso em: 15 fev. 2022.

SCARPA, Federico; BIANCO, Vincenzo; TAGLIAFICO, Luca A. A clear sky physical based solar radiation decomposition model. **Thermal Science and Engineering Progress**, Amsterdam, v. 6, p. 323-329, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904917303256>. Acesso em: 15 fev. 2022.

SCOLAR, João. **Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal**. 2003. 93 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdades de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

SINGH, Pushpendra; SHRIVASTAVA, Vipin; KUMAR, Anil. Recent developments in greenhouse solar drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, London, v. 82, p. 3250-3262, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117313916>. Acesso em: 2 abr. 2020.

SOUZA, Adilson Pacheco de. **Evoluções, frações e estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas**. 2009. xii, 130 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, Botucatu, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/93773>. Acesso em: 15 fev. 2022.

SUN, Huaiwei; ZHAO, Na; ZENG, Xiaofan; YAN Dong. Study of solar radiation prediction and modeling of relationships between solar radiation and meteorological variables. **Energy Conversion and Management**, London, v.105, p. 880-890, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415007992>. Acesso em: 15 fev. 2022.

SWAMINATHAN, Ashwin; HARRISON, Simone L.; KETHEESAN, N.; BOOGAARD, Christel H. A. VAN DEN; DEAR, Keith; ALLEN, Martin; HART, Prue H.; COOK, Matthew; LUCAS, Robyn M. Exposure to Solar UVR Suppresses Cell-Mediated Immunization Responses in Humans: The Australian Ultraviolet Radiation and Immunity Study. **Journal of Investigative Dermatology**, Langford Lane, v. 139, n. 7, p. 1545-1553.e6, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022202X19300296>. Acesso em: 6 abr. 2020.

TAO, Qiu-hua; LI, Zhengrong; ZHENG, Jianwen; JIANG, Fujian. A mathematical model for calculating total transmission of solar radiation through shuttle louvers and experimental verification. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 172, p. 159-169, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817320789>. Acesso em: 6 abr. 2020.

YANG, Ruiqiao; ZHANG, Huan; YOU, Shijun; ZHENG, Wandong; ZHENG, X.; YE, Tianzhen. Study on the thermal comfort index of solar radiation conditions in winter. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 167, p. 106456, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319306687>. Acesso em: 15 fev. 2022.

YEH, Shih-Chuan. High performance natural lighting system combined with SPSC. **Renewable Energy**, Schenectady, v. 143, p. 226-232, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119306536>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ZHANG, Huan; YANG, Ruiqia; YOU, Shijun; ZHENG, Wandong; ZHENG, X.; YE, Tianzhen. The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 134, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318301094>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ZHANG, Yixuan; CUI, Ningbo; FENG, Yu; GONG, Daozhi; HU, Xiaotao. Comparison of BP, PSO-BP and statistical models for predicting daily global solar radiation in arid Northwest China. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 164, p. 104905, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919304144>. Acesso em: 15 fev. 2022.