

**MATHEUS RODRIGUES RANIERO**

**SUNCOUNTER: PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CONTAGEM AUTOMATIZADA  
DE HORAS DE BRILHO SOLAR REGISTRADAS POR HELIÓGRAFOS**

**Botucatu**

**2020**



**MATHEUS RODRIGUES RANIERO**

**SUNCOUNTER: PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CONTAGEM AUTOMATIZADA  
DE HORAS DE BRILHO SOLAR REGISTRADAS POR HELIÓGRAFOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Alexandre Dal Pai

**Botucatu**

**2020**

R197s

Raniero, Matheus Rodrigues

Suncounter: programa computacional para contagem automatizada de horas de brilho solar registradas por heliógrafos / Matheus Rodrigues Raniero. -- Botucatu, 2020  
61 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu  
Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Radiação solar. 2. Processamento digital de imagens. I.  
Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** SUNCOUNTER: PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA CONTAGEM AUTOMATIZADA DE HORAS DE BRILHO SOLAR REGISTRADAS POR HELIÓGRAFOS

**AUTOR: MATHEUS RODRIGUES RANIERO**

**ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. OSVALDO CESAR PINHEIRO DE ALMEIDA  
Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 27 de fevereiro de 2020



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Aos meus queridos familiares, por acreditarem em meu potencial.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela oportunidade e orientação.

Aos professores Enzo Dal Pai, Osvaldo Cesar Pinheiro de Almeida e Sérgio Augusto Rodrigues, por todos os ensinamentos concedidos.

Aos amigos e colegas de pesquisa, pelos conselhos e amizade.

Aos funcionários(as) do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, Pós-Graduação e Biblioteca, pelo apoio no desenvolvimento dessa pesquisa

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela bolsa de estudos concedida.





## RESUMO

O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um programa computacional para processamento e gerenciamento de dados de brilho solar registrados por heliógrafos, monitorados em estações meteorológicas. O código-fonte do programa foi elaborado a partir da linguagem de programação Java EE 7 (Java *Enterprise Edition*), baseada em aplicações para internet. O armazenamento e gerenciamento das informações foi realizado pelo Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) MySQL 5.7. Por meio de técnicas de processamento digital de imagens, incorporadas ao programa, dados de brilho solar foram contabilizados de maneira automatizada e padronizada, possibilitando a formação de uma base de dados na partição de tempo diária, comum em estações meteorológicas, e uma base de dados horária, o que representa novidade devido à complexidade do processo de coleta realizado manualmente. Para ajustes e validação do programa, utilizou-se um conjunto de dados de brilho solar no período de 01/01/2015 a 31/12/2015, fornecidos pela Estação Meteorológica Lageado da Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu - SP. Comparações entre coletas realizadas pelo programa computacional e coletas realizadas de maneira manual apresentaram valores anuais de MBE de 0,393 horas ( $rMBE = 6,301\%$ ), RMSE de 2,148 horas ( $rRMSE = 34,432\%$ ) e R de 0,841. Em relação ao tempo de coleta, o programa computacional despendeu, em média, 41,825 segundos a menos que o método manual. Estimativas de irradiação solar global geradas com dados de brilho solar obtidos pelo programa computacional apresentaram melhores resultados em relação a estimativas com dados de brilho solar coletados de maneira manual. Indicando que o programa computacional pode ser empregado na coleta de dados de brilho solar, por garantir automatização, padronização e rapidez no processo.

**Palavras-chave:** Brilho solar. Heliógrafo. Processamento digital de imagens. Radiação solar.



## ABSTRACT

The objective of this study was the development of a computer program for processing and management of sunshine data recorded by heliographers, monitored in meteorological stations. The source code for the program is based on the Java EE 7 (Java Enterprise Edition) programming language, based on internet applications. The information was stored and managed by the MySQL 5.7 Database Management System (DBMS). Through digital image processing techniques, incorporated into the program, sunshine data were accounted for an automated and standardized method, enabling the formation of a daily database, common in meteorological stations, and an hourly database. This is new due to the complexity of the manual collection process. To adjust the PDI techniques and validation of the computer program, a paper-based sunshine data set was used from 01/01/2015 to 12/31/2015, provided by the Lageado Meteorological Station of the School of Agricultural Sciences (UNESP) Botucatu - SP. Comparisons between collections performed by the computer program and collections performed manually presented annual MBE values of 0,393 hours (rMBE = 6,301 %), RMSE of 2,148 hours (rRMSE = 34,432 %) and R is 0,841. Regarding the collection time, the computer program spent, on average, 41. 825 seconds less compared to the manual collection method. Estimates of global solar irradiation generated with sunshine data obtained by the computer program showed better results in relation to estimates with sunshine data collected manually. Indicating that the computer program can be used to collect sunshine data, as it ensures automation, standardization and speed in the process.

**Keywords:** Digital image processing. Heliograph. Solar radiation. Sunshine.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Valor máximo de horas de Brilho Solar: a) dia de céu aberto; b) dia de céu nublado .....	23
Figura 2 - Sistema de coordenadas de imagens digitais .....	26
Figura 3 - Representação de uma imagem em tons de cinza .....	28
Figura 4 - Imagem colorida: a) imagem padrão RGB; b) banda Red da imagem; c) banda Green da imagem; d) banda Blue da imagem .....	28
Figura 5 - Vizinhanças de um <i>pixel</i> p .....	29
Figura 6 - Série Climática de 1971 a 2013 da cidade de Botucatu: a) dados de temperatura do ar e umidade relativa; b) dados de precipitação acumulada .....	30
Figura 7 - Série Climática de 1971 a 2013 da cidade de Botucatu: a) dados de nebulosidade; b) dados de horas de BS .....	31
Figura 8 - Instrumentos utilizados para registrar as horas de brilho solar: a) Heliógrafo de Campbell-Stokes; b) heliogramas utilizados em diferentes estações do ano .....	32
Figura 9 - Instrumentos utilizados para registrar G: a) piranômetro CMP3 com disco de proteção solar; b) <i>datalogger</i> CR1000 .....	33
Figura 10 - Principais funcionalidades e informações fornecidas pelo programa SunCounter .....	34
Figura 11 - Rotina de coleta de dados de BS proposta .....	36
Figura 12 - Dimensões aproximadas dos heliogramas: a) heliograma curvilíneo verão; b) heliograma retilíneo outono/primavera; c) heliograma curvilíneo inverno .....	37
Figura 13 - Heliograma com dados de BS .....	38
Figura 14 - Etapas do pré-processamento: a) imagem original; b) aplicação da filtragem média; c) aplicação da limiarização; d) aplicação da abertura; e) imagem pré-processada .....	39
Figura 15 - Histograma de um heliograma retilíneo .....	40
Figura 16 - Técnica de limiarização: a) heliograma verão; b) imagem a após limiarização; c) heliograma outono/primavera; d) imagem c após limiarização; e) heliograma inverno; f) imagem e após limiarização .....	41
Figura 17 - Operação de Abertura: a) imagem original; b) imagem a limiarizada com ruídos persistentes; c) imagem b após abertura sem ruídos persistentes. ....	42
Figura 18 - Delimitações horárias para heliogramas retilíneos .....	43
Figura 19 - Exemplo de intervalo de hora de um heliograma retilíneo .....	44

Figura 20 - Delimitações horárias para heliogramas curvilíneos: a) heliograma curvilíneo verão rotacionado a 180°; b) heliograma curvilíneo inverno.....	45
Figura 21 - Exemplo de intervalo de hora de um heliograma curvilíneo: a) <i>pixels</i> base; b) retas diagonais traçadas a partir dos <i>pixels</i> base.....	46
Figura 22 - Tela de início do programa computacional SunCounter.....	49
Figura 23 - Tela de consulta de heliogramas.....	50
Figura 24 - Tela de cadastro de heliograma.....	51
Figura 25 - Resultado da leitura de um heliograma.....	52
Figura 26 - a) Evolução temporal das horas de BS obtidas por MA e MM; b) Correlação entre horas de BS obtidas por MA e MM.....	53
Figura 27 - a) correlação entre G x GMA'; b) correlação entre G x GMM'.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicativos estatísticos entre horas de BS obtidas por MA e MM.....	54
Tabela 2 - Comparação do tempo despendido na coleta das horas de BS obtidas por MA e MM.....	54
Tabela 3 - Indicativos estatísticos entre G x GMA' .....	56
Tabela 4 - Indicativos estatísticos entre G x GMM' .....	57





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-P	Angstrom-Prescott
BS	Brilho Solar
DP	Desvio Padrão
DPI	<i>Dots Per Inch</i>
EML	Estação Meteorológica Lageado
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
JPEG	<i>Joint Photographics Experts Group</i>
LRS	Laboratório de Radiometria Solar
MA	Método automatizado
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
MD	Média
MM	Método manual
PDI	Processamento Digital de Imagens
rMBE	<i>Relative Mean Bias Error</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
rRMSE	<i>Relative Root Mean Square Error</i>
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$	Declinação solar
$\phi$	Latitude local
a	Coefficiente A-P linear
b	Coefficiente A-P angular
$E_0$	Correção da excentricidade da órbita
Dj	Dia juliano (1 a 365)
f	Nebulosidade
F	Ângulo diário
G	Irradiação solar global na horizontal ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
$G'$	Irradiação solar global na horizontal estimada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
$G_0$	Irradiação solar extraterrestre na horizontal ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ )
Kt	Índice de Transmissividade Atmosférica
$\text{MJ m}^{-2}$	Megajoule por metro quadrado
n	Horas de brilho solar
N	Fotoperíodo
NS	Nascer do sol
OS	Ocaso do sol
r	Coefficiente de correlação
S	Razão de Insolação
$\text{W m}^{-2}$	Watt por metro quadrado
$w_s$	Ângulo diário horário
$w_s^*$	Ângulo diário horário em radianos



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Brilho solar .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Processamento digital de imagens .....</b>	<b>25</b>
2.2.1	Relacionamentos entre pixels .....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Localidade e clima .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Instrumentação .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Programa computacional .....</b>	<b>33</b>
3.3.1	Digitalização dos heliogramas .....	37
3.3.2	Método de leitura do programa computacional .....	38
3.3.2.1	<i>Pré-processamento.....</i>	<i>38</i>
3.3.2.2	<i>Contabilização .....</i>	<i>43</i>
<b>3.4</b>	<b>Indicativos estatísticos de desempenho .....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Principais interfaces do programa .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Validação das leituras automatizadas.....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A energia irradiada pelo Sol alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos do planeta Terra, sejam eles naturais (ciclo hidrológico, dinâmica da atmosfera, fotossíntese, entre outros) ou artificialmente desenvolvidos (aquecimento solar, geração de eletricidade, climatização de ambientes, entre outros) com aplicação do conhecimento científico e tecnológico (PEREIRA et al., 2017; TANG et al., 2010).

O conhecimento preciso da quantidade de radiação recebida é essencial para projetar e estudar dispositivos de conversão de energia solar, como usinas heliotérmicas e fotovoltaicas, e geração solar fotovoltaica distribuída. Sendo, do mesmo modo, parâmetros importantes para sistemas de simulação ou previsão climatológicos e agrícolas (ANIS et al., 2019; DAS; PARK; PARK, 2015; LI et al., 2011; PEREIRA et al., 2017).

Tendo em vista sua grande importância, atualmente, existe uma demanda crescente por dados acurados de radiação solar. No entanto, devido ao alto custo de instalação e manutenção, o número de estações de radiação solar é insuficiente (DAS; PARK; PARK, 2015; EL-METWALLY, 2004; PAULESCU et al., 2016; SOUZA et al., 2011). Conseqüentemente, faz-se necessário, o desenvolvimento de diferentes modelos empíricos para se estimar a radiação solar que utilizam outros parâmetros meteorológicos prontamente disponíveis, como temperatura do ar, umidade relativa, horas de brilho solar, nebulosidade e precipitação (LIU et al., 2012; VAREJÃO-SILVA, 2006; ZHAO; ZENG; HAN, 2013).

Modelos empíricos baseados em horas de brilho solar são amplamente aceitos e geralmente fornecem melhores resultados ao se estimar a radiação solar global (DAS; PARK; PARK, 2015; LIU et al., 2012). Horas de brilho solar são registradas em várias estações ao redor do mundo (EL-METWALLY, 2004; IQBAL, 1983; PAULESCU et al., 2016). A problemática que abrange a coleta de dados de brilho solar é o fato de ser realizada de maneira manual, por um observador meteorológico, e em escala diária, a partir de marcações realizadas por heliógrafos (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Interpretações subjetivas, devido à carência de treinamento ou coletas de dados de brilho solar realizadas por observadores distintos, podem afetar a integridade e confiabilidade de uma base de dados. Além disto, no processo de coleta manual, apenas informações do total diário de brilho solar são armazenados, perdendo informações sobre sua variação ao longo das horas.

Considerando estes aspectos, o objetivo deste estudo foi desenvolver um programa computacional capaz de interpretar imagens digitalizadas de dados de brilho solar, registrados por heliógrafos, por meio de técnicas de processamento digital de imagens. O uso de um programa computacional na coleta de dados de brilho solar garante a automatização e padronização do processo por eliminar a subjetividade na observação da medida, realizada manualmente. Bem como, possibilita a formação de uma base de dados nas partições diária e horária, para melhor contribuir com a caracterização do potencial solar, variabilidade de nuvens e aerossóis de uma localidade.

No intuito de atingir os propósitos para os quais foi desenvolvido, o presente estudo contempla os seguintes objetivos secundários:

1. Possibilitar acesso rápido e eficiente aos dados de brilho solar processados pelo programa computacional;
2. Minimizar a influência do componente humano na coleta de dados de brilho solar;
3. Otimizar o processamento em relação ao tempo despendido na coleta de dados de brilho solar.

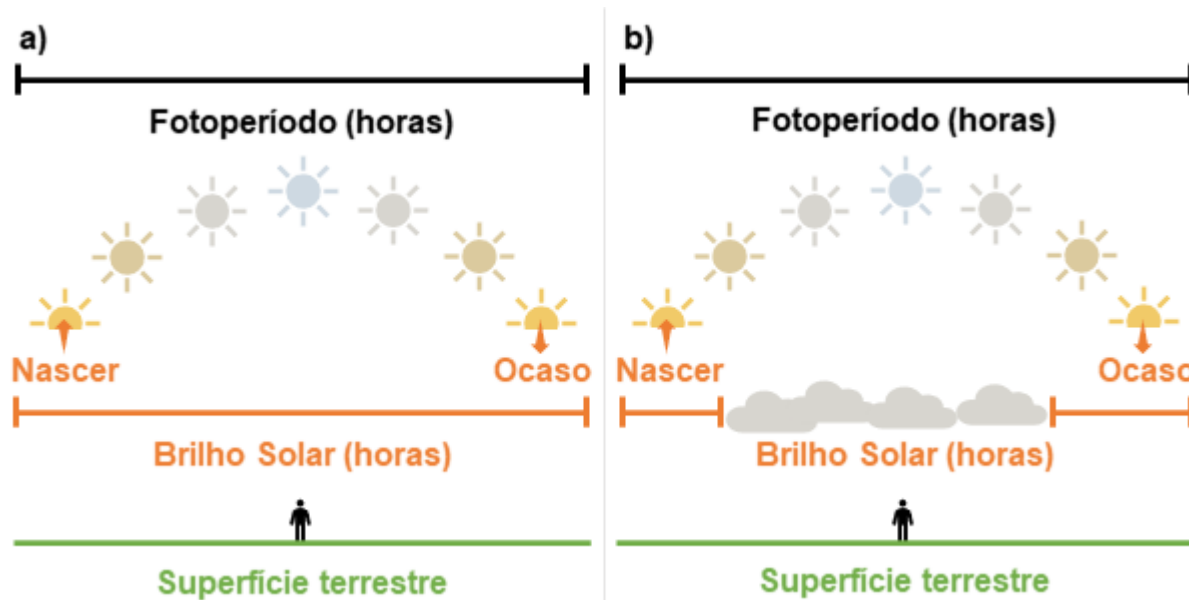


## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Brilho solar

Horas de Brilho Solar (BS) representam o intervalo total de tempo (entre o nascer e ocaso do Sol) em que o disco solar não esteve obstruído, por nuvens ou fenômenos atmosféricos de qualquer natureza, para um observador situado em um ponto da superfície terrestre. Na Figura 1 pode-se observar o valor máximo de horas de BS teoricamente possível, sendo sempre menor ou igual ao fotoperíodo (IQBAL, 1983; VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 1 - Valor máximo de horas de Brilho Solar: a) dia de céu aberto; b) dia de céu nublado



Numerosos modelos têm sido propostos para estimar a irradiação solar global por meio de diferentes variáveis meteorológicas disponíveis. Contudo, devido a ampla disponibilidade de dados de BS, desempenho apresentado e simplicidade na aplicação, o modelo mais empregado é o de Angstrom-Prescott (DAS; PARK; PARK, 2015; LIU et al., 2009; PAULESCU et al., 2016; TEKE; YILDIRIM, 2014; ZHAO; ZENG; HAN, 2013).

Angstrom (1924) propôs uma equação linear correlacionando a fração da irradiação solar global com a irradiação solar global em um dia de céu completamente aberto e a fração das horas de BS com o fotoperíodo. Para solver o impasse em se obter dados de irradiação solar global em um dia de céu completamente aberto,

Prescott (1940) sugeriu utilizar a irradiação solar extraterrestre para substituí-la, modificando a equação original e formando a equação conhecida como Angstrom-Prescott (A-P):

$$K_t = a + bS \quad (1)$$

$$K_t = \frac{G}{G_0} \quad (2)$$

$$S = \frac{n}{N} \quad (3)$$

onde  $K_t$  é o índice de transmissividade,  $G$  é a irradiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $G_0$  é a irradiação solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $a$  e  $b$  os coeficientes A-P, que representam o perfil de transmissividade atmosférica de uma localidade,  $S$  é a razão de insolação,  $n$  representa as horas de BS em hora e décimo de hora e  $N$  é o fotoperíodo em hora e décimo de hora.

A partir do ponto de vista matemático,  $a$  é o coeficiente linear da equação, enquanto  $b$  é o coeficiente angular. Fisicamente, para um dia de céu completamente aberto, as horas de BS ( $n$ ) e o fotoperíodo ( $N$ ) se tornam iguais ( $S = 1$ ) e conseqüentemente  $a + b$  representam a fração total de irradiação que chega à superfície terrestre. Para situações de céu totalmente nublado, o fator  $bS$  será zero e o coeficiente  $a$  se torna a fração de irradiação que chega à superfície terrestre (LIU et al., 2009; PAULESCU et al., 2016; SUEHRCKE, 2000).

Os coeficientes A-P são estimados por meio do ajuste de um modelo de regressão linear simples, utilizando medidas de  $G$  e  $S$ . Podendo assumir grande variação dependendo da localização considerada. As variações de  $a$  e  $b$  podem ser explicadas como consequência das mudanças locais e sazonais, distribuição e espessura de nuvens, concentração de poluentes, latitude e altitude (ALMOROX; HONTORIA, 2004).

Na literatura especializada pode-se encontrar numerosos valores de  $a$  e  $b$  ao redor do globo. Quando os coeficientes A-P já são conhecidos, podem ser aplicados à outras localidades situadas na mesma área e com características climatológicas

similares ao local onde os dados originais foram obtidos (IQBAL, 1983; VAREJÃO-SILVA, 2006).

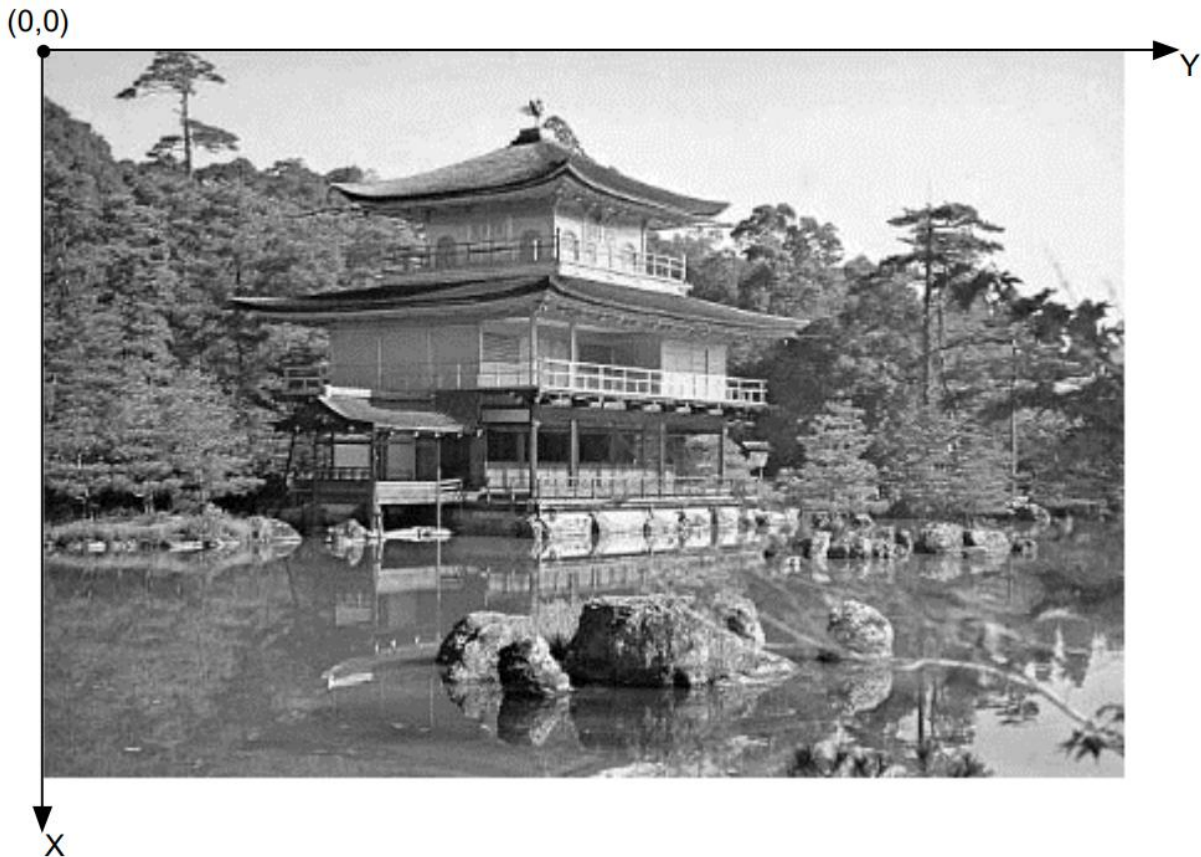
## 2.2 Processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens (PDI) é uma técnica computadorizada para análise de imagens. Consiste em uma sequência de operações que incluem: (i) a aquisição da imagem, que é o processo de capturar uma cena e convertê-la em formato digital (imagens de *pixels*); (ii) o processamento da imagem, isto é, a extração de informações quantificadas da imagem digital por meio da aplicação de algoritmos matemáticos (LI et al., 2011; MARINONI et al., 2005; RIBAS; THIVES, 2019).

Várias áreas do conhecimento têm utilizado PDI no desenvolvimento e aprimoramento de técnicas para análise automática ou semiautomática de informações extraídas de imagens ou cenas. Na medicina, por meio de diagnósticos médicos auxiliados com o uso de imagens de raio X. Na automação industrial, a montagem, inspeção e controle de qualidade de produtos podem ser realizados a partir de técnicas de processamento e análise de imagens. O processamento e a interpretação automática de imagens captadas por satélites auxiliam trabalhos nas áreas de geografia, sensoriamento remoto, geoprocessamento e meteorologia (GONZALES; WOODS, 2008; MARQUES FILHO; VIERIA NETO, 1999; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Uma imagem digital monocromática pode ser descrita matematicamente por uma função  $f(x,y)$  da intensidade luminosa, sendo seu valor, em qualquer ponto de coordenadas espaciais  $(x,y)$ , proporcional ao brilho (ou nível de cinza) da imagem naquele ponto (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). A Figura 2 ilustra uma imagem digital e a orientação do sistema de coordenadas, que por convenção, a origem da imagem é o canto superior esquerdo.

Figura 2 - Sistema de coordenadas de imagens digitais



Fonte: Marques Filho; Vieira Neto (1999).

A função  $f(x,y)$  representa o produto entre dois componentes, a quantidade de luz incidente na cena e a quantidade de luz refletida pelos objetos presente nela (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Esses componentes são chamados de iluminância e refletância, respectivamente, e são representados por  $i(x,y)$  e  $r(x,y)$ . Deste modo, a função  $f(x,y)$  pode ser representada como

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y) \quad (4)$$

$$0 < i(x,y) < \infty \quad (5)$$

$$0 < r(x,y) < 1 \quad (6)$$

A maioria das técnicas de análise de imagens são realizadas por meio de processamento computacional. Deste modo, a função  $f(x,y)$  deve ser convertida para a forma discreta. Uma imagem digital pode ser obtida a partir de um processo

chamado de digitalização, que contém dois passos, a amostragem e a quantização. A amostragem consiste em discretizar o domínio de definição da imagem nas direções  $x$  e  $y$ , gerando uma matriz de  $N \times M$  amostras, respectivamente. A quantização consiste em escolher o número inteiro  $L$  de níveis de cinza (em uma imagem monocromática) permitidos para cada ponto da imagem (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Os pontos  $f(x,y)$  desta matriz de amostras são chamados de elementos da imagem, elementos da figura ou "*pixels*" (abreviação de "*picture elements*"), com  $0 \leq x \leq M - 1$  e  $0 \leq y \leq N - 1$ . A imagem contínua  $f(x,y)$  é aproximada, portanto, por uma matriz de dimensão  $M$  *pixels* na horizontal (eixo  $x$  da Figura 2) e  $N$  *pixels* na vertical (eixo  $y$  da Figura 2), conforme mostra a Equação (7). Onde o lado direito da equação representa o que é realmente denominado uma imagem digital (GONZALEZ; WOODS, 2008).

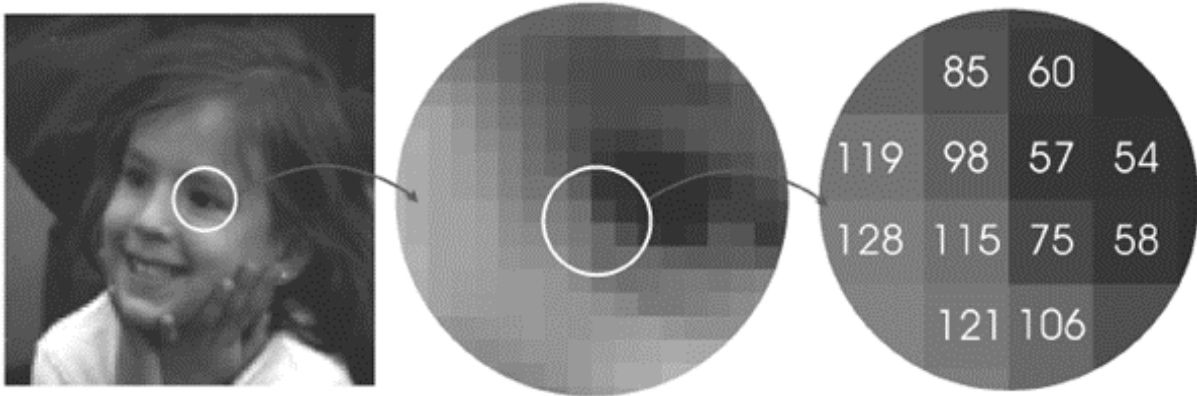
$$\mathbf{f}(x,y) \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & f(1,0) & \dots & f(M-1,0) \\ f(0,1) & f(1,1) & \dots & f(M-1,1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(0,N-1) & f(1,N-1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Cada *pixel*  $f(x,y)$ , em uma imagem monocromática, tem associado um valor inteiro denominado nível de cinza  $L$ , estando no intervalo

$$L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \quad (8)$$

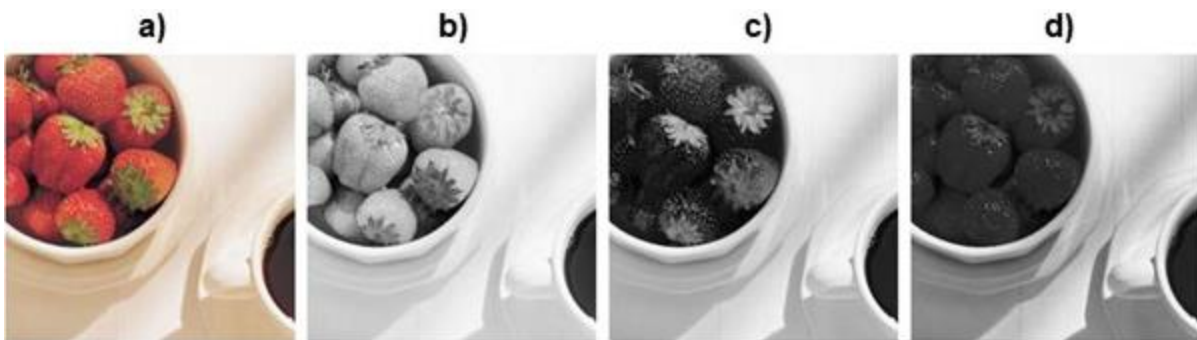
sendo  $L_{\min}$  e  $L_{\max}$  valores positivos e finitos, tal que o intervalo  $[L_{\min}, L_{\max}]$  é titulado de escala de cinza (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). A Figura 3 exemplifica o nível de cinza para cada *pixel* de uma determinada região de uma imagem. Por convenção, o menor valor atribuído a um *pixel* é 0 (zero), que representa a tonalidade mais escura (preto) e o maior valor é 255 para a tonalidade mais clara (branco). Quanto mais claro é o tom de cinza, maior é o valor atribuído ao *pixel* (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Figura 3 - Representação de uma imagem em tons de cinza



Para uma imagem que possui informações em intervalos ou bandas distintas de frequência, é necessária uma função  $f(x, y)$  para cada banda. É o caso de imagens coloridas padrão RGB, que são formadas pela informação de cores primárias aditivas, como o vermelho (Red), verde (Green) e azul (Blue), conforme ilustrado na Figura 4 (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Figura 4 - Imagem colorida: a) imagem padrão RGB; b) banda Red da imagem; c) banda Green da imagem; d) banda Blue da imagem



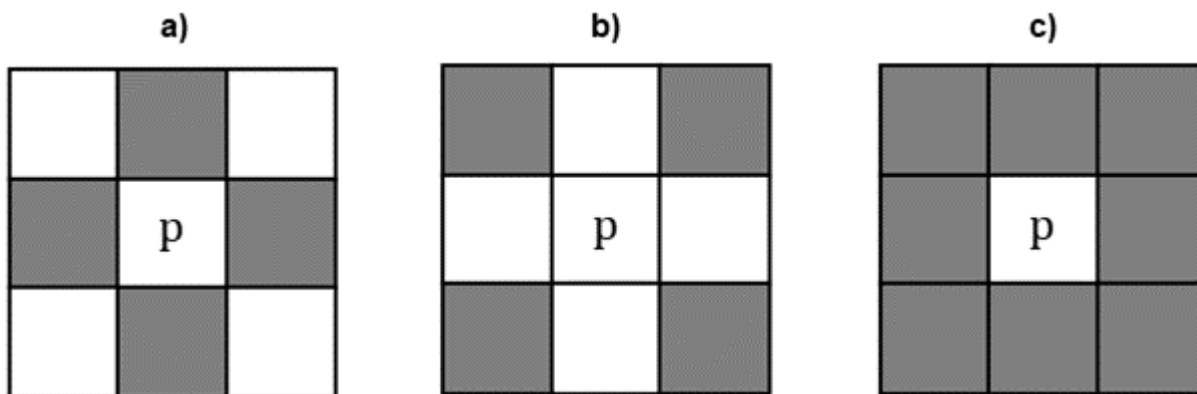
Fonte: Gonzalez; Woods, 2008.

### 2.2.1 Relacionamentos entre pixels

Considerando um *pixel*  $p$  situado nas coordenadas  $(x, y)$ , seus vizinhos nas direções horizontal e vertical são dados, respectivamente, por  $(x + 1, y)$ ,  $(x - 1, y)$ ,  $(x, y + 1)$  e  $(x, y - 1)$ . Esses *pixels* formam a chamada vizinhança-4, denotados como  $N_4(p)$  e ilustrados na Figura 5a. *Pixels* vizinhos no sentido diagonal, situados nas coordenadas  $(x - 1, y + 1)$ ,  $(x - 1, y - 1)$ ,  $(x + 1, y + 1)$  e  $(x + 1, y - 1)$  são descritos

como  $N_D(p)$  (Figura 5b). A união de  $N_4(p)$  e  $N_D(p)$  constitui a vizinhança-8, denotada por  $N_8(p)$ , conforme ilustra a Figura 5c (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Figura 5 - Vizinhanças de um *pixel* p



Fonte: Marques Filho; Vieira Neto, 1999.

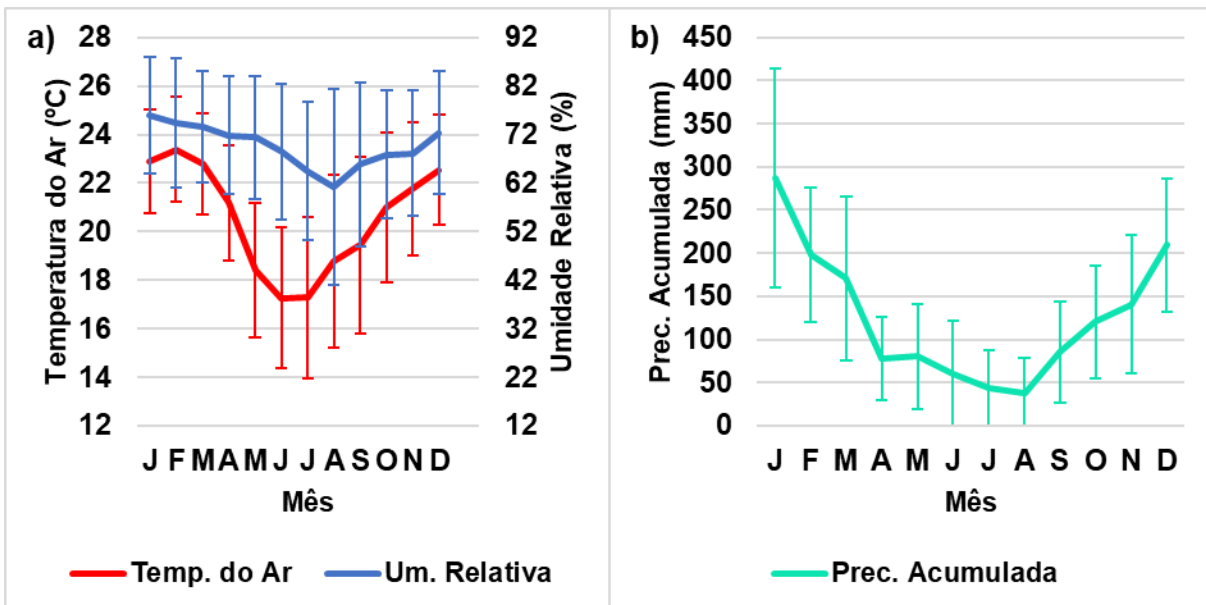
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localidade e clima

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Radiometria Solar (LRS), situado no departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agronômicas (Unesp) de Botucatu - SP. Botucatu é uma cidade semi-rural rondada por plantações de cana-de-açúcar e eucalipto, com população estimada de 146.497 mil habitantes no ano de 2019 (DAL PAI et al., 2016; IBGE, 2019).

De acordo com critérios climáticos de Köppen, o clima local é classificado como Cwa, clima subtropical úmido - mesotérmico (ROSSI et al., 2018). Caracterizado por possuir verões quentes e úmidos, com temperatura do ar de 22,94 °C, umidade relativa de 74,2 % e precipitação acumulada 695,3 mm; e invernos secos, com temperatura do ar de 17,8 °C, umidade relativa de 64,7 % e precipitação acumulada de 141,3 mm (Figura 6). Com médias anuais de temperatura do ar de 20,5 °C, umidade relativa de 69,6 % e precipitação acumulada de 1511,5 mm.

Figura 6 - Série Climática de 1971 a 2013 da cidade de Botucatu: a) dados de temperatura do ar e umidade relativa; b) dados de precipitação acumulada



Fonte: Estação Meteorológica Lageado (2019).

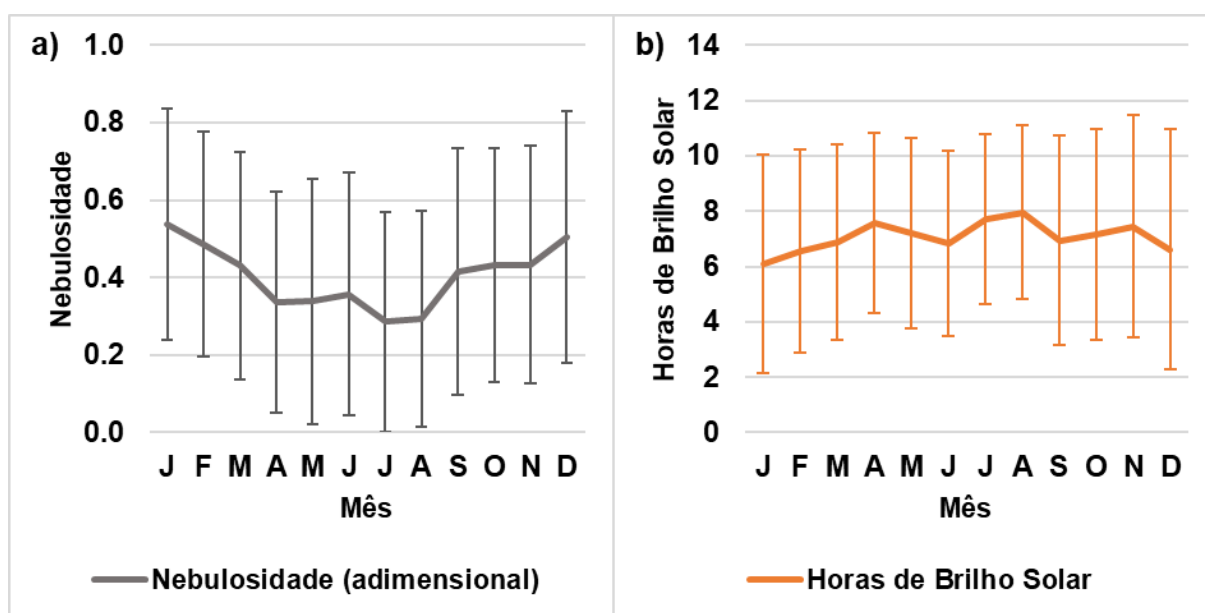


A Nebulosidade (f), dada pela equação (9),

$$f = 1 - S \quad (9)$$

representa a fração do número de horas que o sol é coberto por nuvens em um dia, onde S é a razão de insolação (ROSSI et al., 2018). Para o local do estudo, a nebulosidade é maior em janeiro e menor em julho com valores de 0,53 e 0,28, respectivamente (Figura 7a). Por outro lado, os meses com maior e menor horas de BS são agosto e janeiro, com valores de 7,95 horas e 6,10 horas, respectivamente (Figura 7b). Com médias anuais de nebulosidade de 0,40 e horas de BS de 7,08.

Figura 7 - Série Climática de 1971 a 2013 da cidade de Botucatu: a) dados de nebulosidade; b) dados de horas de BS



Fonte: Estação Meteorológica Lageado (2019).

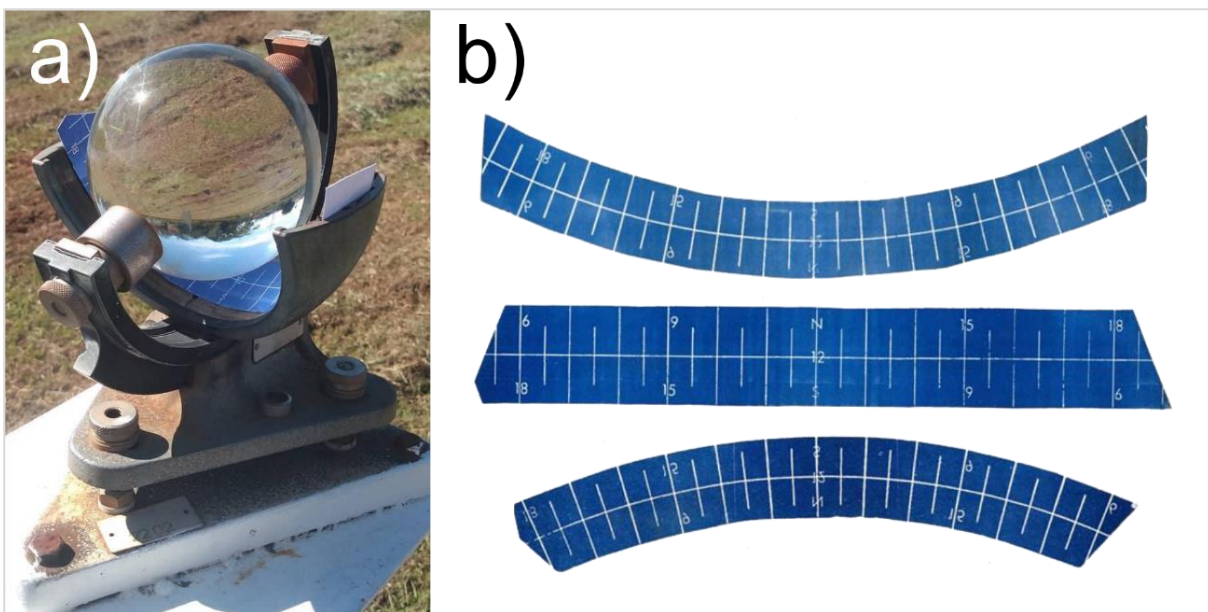
### 3.2 Instrumentação

Dados de irradiação solar global na horizontal ( $G$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) e cartões em formato de papel (heliogramas) contendo medidas de BS foram cedidos pela Estação Meteorológica Lageado (EML) da Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu - SP, no período de 01/01/2015 a 31/12/2015 para ajuste das técnicas de PDI e validação do programa computacional. A EML está localizada nas coordenadas

geográficas: Latitude 22° 50' 48,14" S (-22,846694°); Longitude 48° 25' 53,52" O (-48,431528°); Altitude 786 m acima do nível do mar (ESTAÇÃO METEOROLÓGICA LAGEADO, 2019).

A Figura 8 ilustra o Heliógrafo de Campbell-Stokes e os heliogramas utilizados para registrar o número de horas de BS. Pode-se observar na Figura 8b, os três tipos de heliogramas utilizados em diferentes estações do ano, devido a variação da declinação solar e fotoperíodo. No inverno utiliza-se o heliograma curvilíneo curto com concavidade voltada para baixo, devido ao menor fotoperíodo, no outono/primavera o heliograma retilíneo e no verão o heliograma curvilíneo longo com concavidade voltada para cima (VAREJÃO-SILVA, 2006).

**Figura 8 - Instrumentos utilizados para registrar as horas de brilho solar: a) Heliógrafo de Campbell-Stokes; b) heliogramas utilizados em diferentes estações do ano**



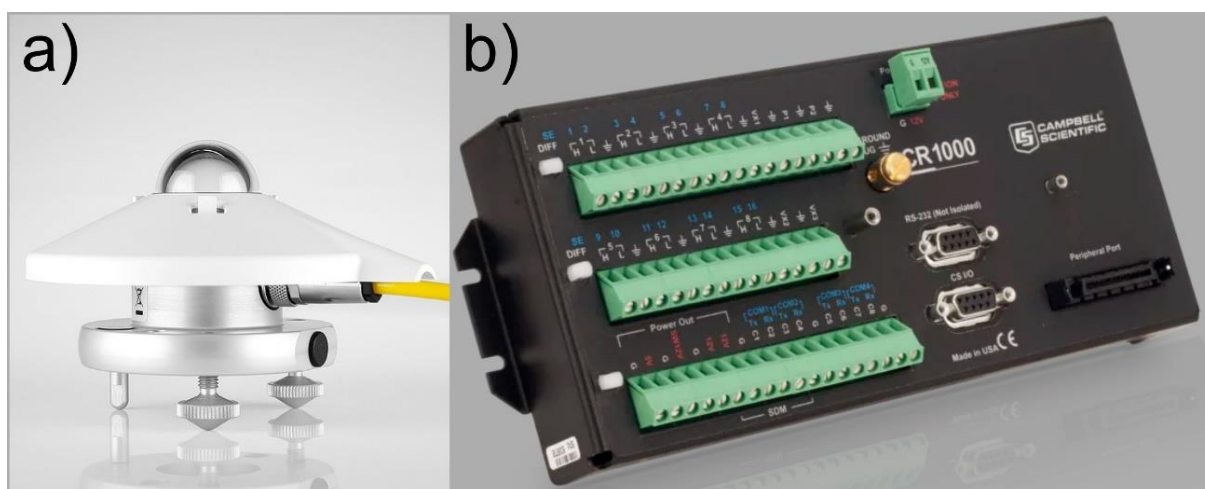
**Fonte:** Estação Meteorológica Lageado, 2019.

O estudo foca exclusivamente em dados diários de  $G$  para comparação com a irradiação solar global na horizontal estimada ( $G'$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) a partir de dados de BS obtidos pelo programa computacional. Para se obter a  $G$ , valores instantâneos (médias de 5 minutos em  $\text{W m}^{-2}$ ) de irradiância solar global na horizontal foram mensurados por um piranômetro Kipp&Zonen modelo CMP3 (Figura 9a) e integrados para partição de tempo diária ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). O monitoramento e armazenamento da  $G$  foi realizado por meio de um sistema de aquisição de dados (*data logger*) Campbell Scientific CR1000 (Figura 9b).  $G'$  foi gerada por meio da equação de A-P

$$G' = [0,253 + 0,465 \left(\frac{n}{N}\right)]G_0 \quad (10)$$

com valores de a (0,253) e b (0,465) obtidos por Silva et al. (2017) para a cidade de Botucatu. Indicando que o valor mínimo de transmissividade atmosférica para a localidade, dado por a, é 0,253 e o valor máximo, dado por a + b, é 0,718.

**Figura 9 - Instrumentos utilizados para registrar G: a) piranômetro CMP3 com disco de proteção solar; b) datalogger CR1000**



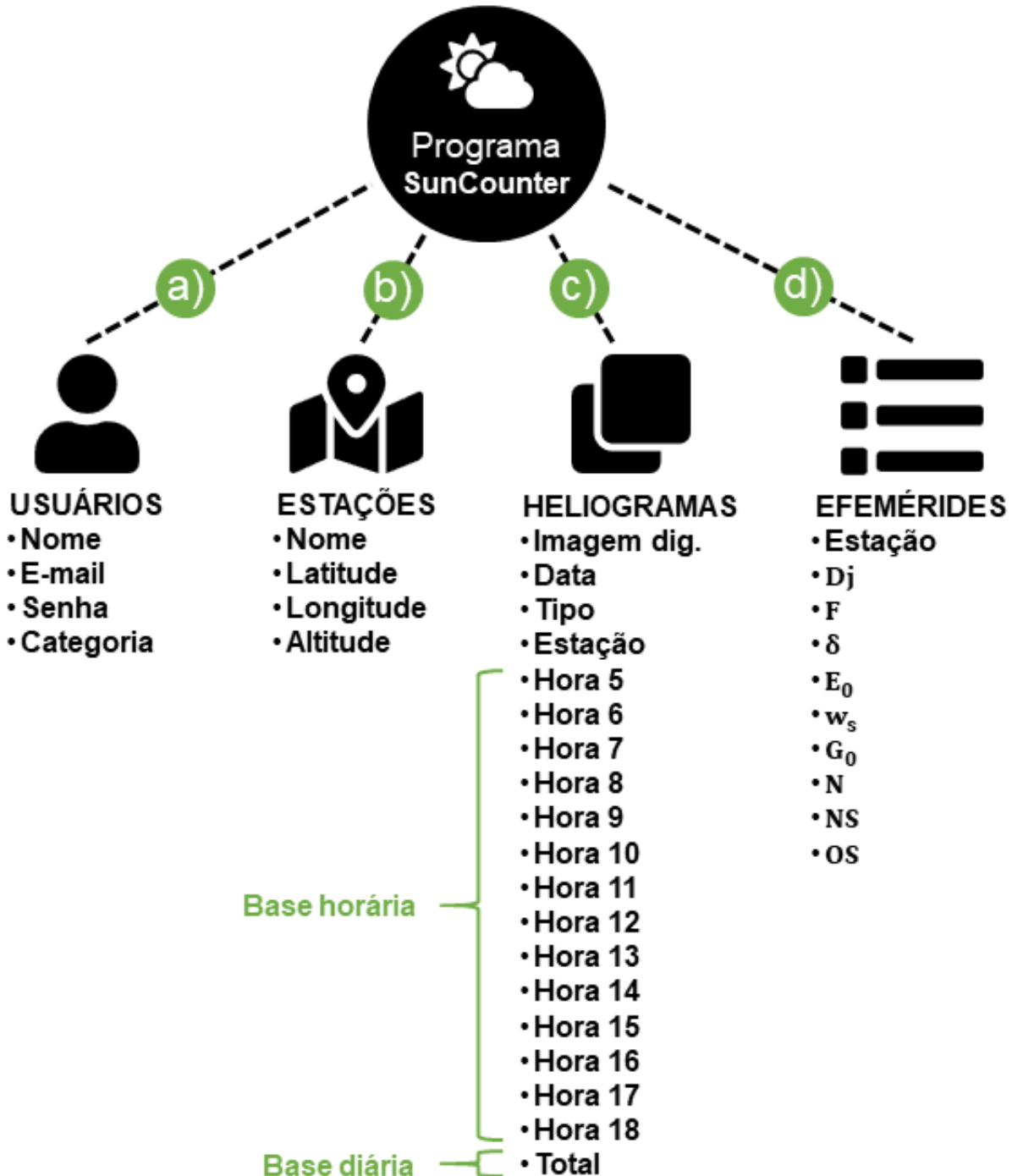
Fonte: a) Kipp&Zonen (2019); b) Campbell Scientific (2019).

### 3.3 Programa computacional

O programa computacional intitulado de SunCounter foi desenvolvido com o propósito de ser utilizado no LRS e no arquivo meteorológico da EML para leitura e gerenciamento de dados de BS. Na implementação do programa, utilizou-se o Ambiente Integrado de Desenvolvimento (*Integrated Development Environment - IDE*) Apache NetBeans 11 (APACHE NETBEANS, 2019). O código-fonte foi elaborado utilizando a linguagem de programação Java EE 7 (Java *Enterprise Edition*) baseada em aplicações para internet (ORACLE, 2019). O armazenamento e gerenciamento das informações pertinentes ao programa foi realizado pelo Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) MySQL 5.7 (MYSQL, 2019). As interfaces gráficas foram implementadas com auxílio do *framework* Bootstrap 4.3 (BOOTSTRAP, 2019).

O programa SunCounter permite o gerenciamento (cadastro, exibição, edição e exclusão) de usuários, estações, heliogramas e efemérides (Figura 10).

Figura 10 - Principais funcionalidades e informações fornecidas pelo programa SunCounter



Possuindo duas categorias de usuário, comum e administrador. Usuários categoria comum podem manipular grande parte das funcionalidades do programa, exceto gerir outros usuários cadastrados, que é de responsabilidade do usuário

administrador (Figura 10a). Heliogramas são processados de maneira automatizada e padronizada com base em seu tipo (Curvilíneo Verão, Retilíneo ou Curvilíneo Inverno), formando uma base de dados horária de BS (hora 5 a hora 18) e uma base de dados diária. Imagens digitalizadas dos heliogramas são armazenadas no banco de dados, facilitando o compartilhamento futuro de informações (Figura 10c). Efemérides solares são geradas com base na localização geográfica das estações e podem ser utilizadas na estimativa e controle de qualidade da irradiação solar (Figura 10d). As equações das efemérides solares, de acordo com Varejão-Silva (2006) e Iqbal (1983), fornecidas pelo programa são descritas a seguir:

$$F = 360^\circ D_j / 365 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \delta = & 0,3964 + 3,631\sin(F) - 22,97\cos(F) + 0,03838\sin(2F) \\ & - 0,3885\cos(2F) + 0,07659\sin(3F) - 0,01587\cos(3F) \\ & - 0,01021\cos(4F) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} E_0 = & 1 - 0,0009464\sin(F) - 0,01671\cos(F) - 0,0001489\cos(2F) \\ & - 0,00002917\sin(3F) - 0,0003438\cos(4F) \end{aligned} \quad (13)$$

$$w_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (14)$$

$$w_s^* = w_s \pi / 180 \quad (15)$$

$$G_0 = \frac{37.61}{E_0^2} [w_s^* \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\sin(w_s)] \quad (16)$$

$$N = 2w_s / 15 \quad (17)$$

$$NS = 12 - w_s / 15 \quad (18)$$

$$OS = 12 + w_s / 15 \quad (19)$$

onde  $D_j$  é o dia decorrido do ano (1 a 365);  $F$  é o ângulo diário em graus;  $\delta$  é a declinação solar em graus;  $E_0$  é a correção da excentricidade da órbita em graus;  $w_s$

é o ângulo diário horário em graus;  $\phi$  é a latitude local da estação em graus;  $w_s^*$  é o ângulo diário horário em radianos;  $G_0$  é a irradiação solar extraterrestre na horizontal em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $N$  é o fotoperíodo em hora e décimo de hora;  $NS$  é o nascer do sol em hora e décimo de hora e  $OS$  é o ocaso do sol em hora e décimo de hora.

Uma rotina de coleta de dados de BS foi proposta para garantir a padronização e automatização na obtenção da medida. O fluxograma de processamento e coleta possui 8 passos, conforme ilustrado na Figura 11. Passo 1: heliogramas em formato de papel são digitalizados. Passo 2: imagens digitalizadas são armazenadas no computador do usuário. Passo 3: o usuário acessa o programa SunCounter por meio de um navegador e se autentica, fornecendo seu e-mail e senha. Passo 4: o usuário faz o *upload* da imagem digitalizada do heliograma e realiza a requisição de processamento ao servidor. Passo 5: inicia-se o pré-processamento da imagem digitalizada por meio de filtros de ajustes para facilitar sua representação e contagem. Passo 6: contabilização horária e diária de horas de BS contidas na imagem digitalizada. Passo 7: dados de BS obtidos no processamento da imagem digitalizada são armazenadas no banco de dados, nas partições de tempo horária e diária. Passo 8: O servidor responde a requisição enviada pelo usuário, exibindo o resultado do processamento em páginas de internet.

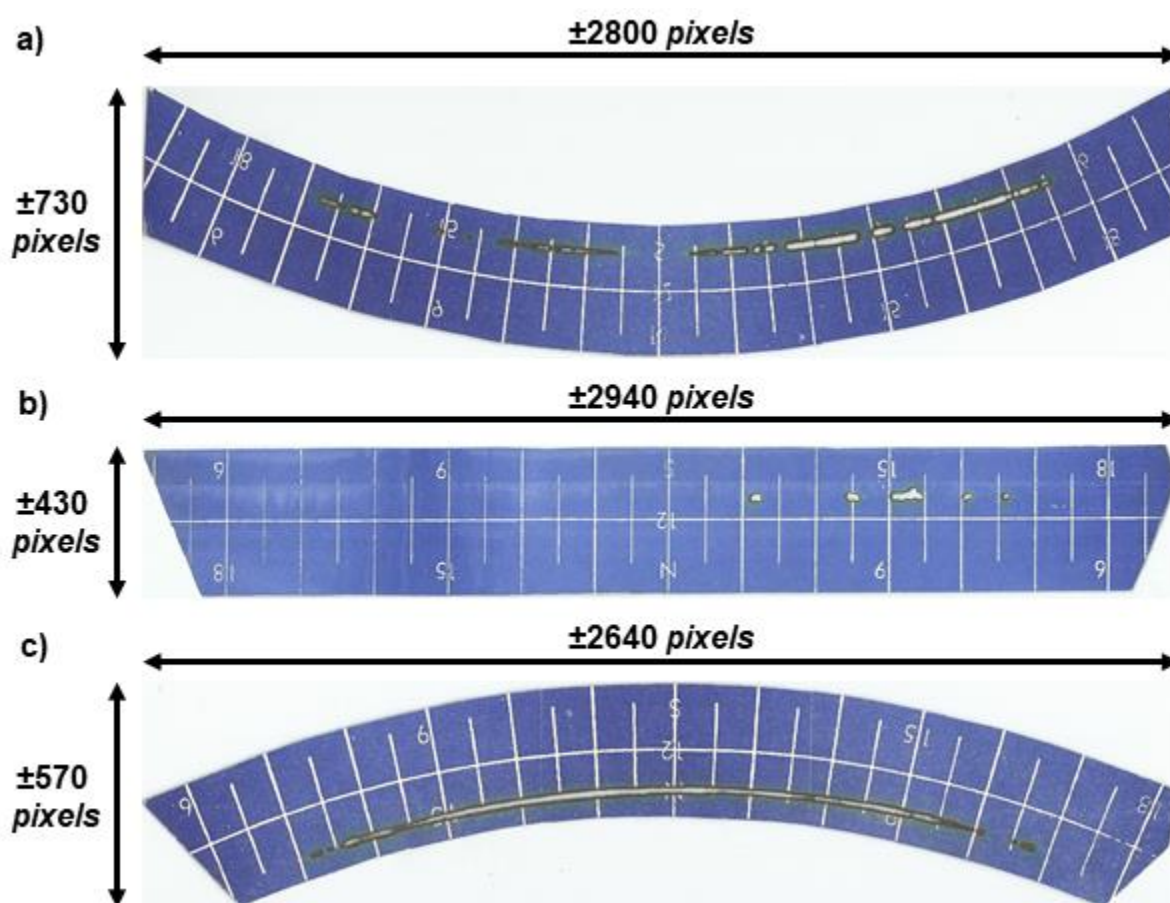
Figura 11 - Rotina de coleta de dados de BS proposta



### 3.3.1 Digitalização dos heliogramas

Os heliogramas foram digitalizados por um *scanner* com resolução de 300 DPI. Adotou-se a extensão de arquivo jpg do padrão de compactação JPEG (sem perdas por compactação) para as imagens digitais, por assegurar qualidade e armazenamento com baixo uso de memória. Além de ser um padrão popular e abrangente, fato que contribui para a facilidade do compartilhamento dos arquivos (GONZALEZ; WOODS, 2008). As imagens digitais possuem, aproximadamente, as seguintes dimensões: 2800 *pixels* de largura e 730 *pixels* de altura para heliogramas utilizados na estação verão (Figura 12a); 2940 *pixels* de largura e 430 *pixels* de altura para heliogramas utilizados nas estações outono e primavera (Figura 12b); 2640 *pixels* de largura e 570 *pixels* de altura para heliogramas utilizados na estação inverno (Figura 12c).

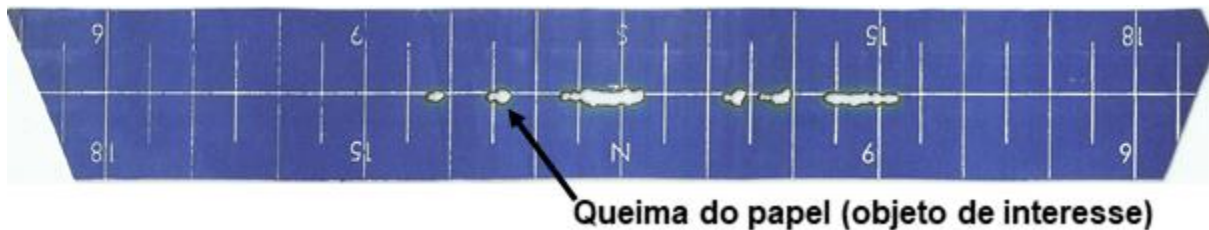
Figura 12 - Dimensões aproximadas dos heliogramas: a) heliograma curvilíneo verão; b) heliograma retilíneo outono/primavera; c) heliograma curvilíneo inverno



### 3.3.2 Método de leitura do programa computacional

Técnicas de PDI foram incorporadas ao programa computacional, para realizar o realce, a segmentação e interpretação de dados de BS. Filtros de realce, etapa conhecida inclusive como filtragem, visam melhorar a qualidade das imagens por meio da aplicação de técnicas de atenuação de ruídos e suavização de determinadas propriedades da imagem. A segmentação realiza a extração e identificação de áreas de interesse na imagem, sendo para este estudo, a queima do papel contida em heliogramas (Figura 13). O processo de interpretação atribui significado ao conjunto de objetos reconhecidos, neste caso, a contabilização de horas de BS.

Figura 13 - Heliograma com dados de BS

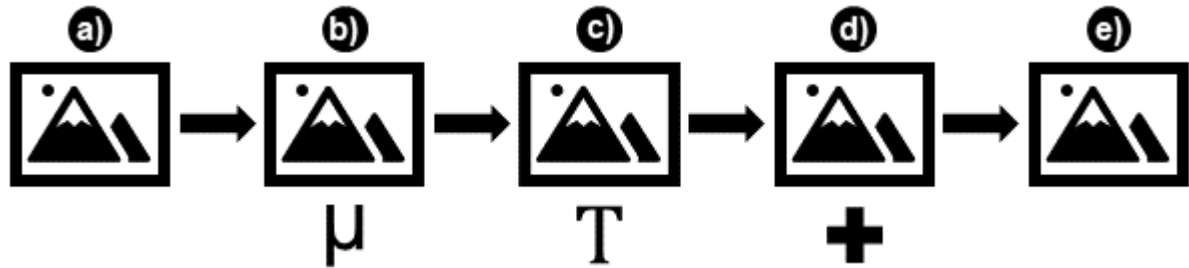


#### 3.3.2.1 Pré-processamento

As técnicas de filtragem média, limiarização e abertura foram empregadas no pré-processamento das imagens digitais dos heliogramas, para minimizar problemas com digitalizações que não produzem o efeito esperado e apresentam algum tipo de deficiência na captura da imagem. Garantindo que *pixels* pertinentes à queima do papel sejam evidenciados da melhor forma para contabilizações posteriores. Na Figura 14 pode-se observar o fluxograma de pré-processamento aplicado nas imagens.



Figura 14 - Etapas do pré-processamento: a) imagem original; b) aplicação da filtragem média; c) aplicação da limiarização; d) aplicação da abertura; e) imagem pré-processada



A filtragem média foi utilizada para suavizar as imagens, eliminando as alterações abruptas nos *pixels*, que geralmente são causadas por ruídos. A aplicação desta filtragem consiste em substituir o valor de cada *pixel* de uma imagem pelo valor médio de seus vizinhos (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Para aplicação desta técnica, uma máscara 3x3 foi empregada, dada pela Expressão (20).

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Deste modo, o valor médio em qualquer ponto  $(x, y)$  da imagem é a soma dos nove valores de intensidade da vizinhança 3x3 centralizados em  $(x, y)$  divididos por 9 (GONZALEZ; WOODS, 2008). O valor médio (VM) de intensidade pode ser definido como

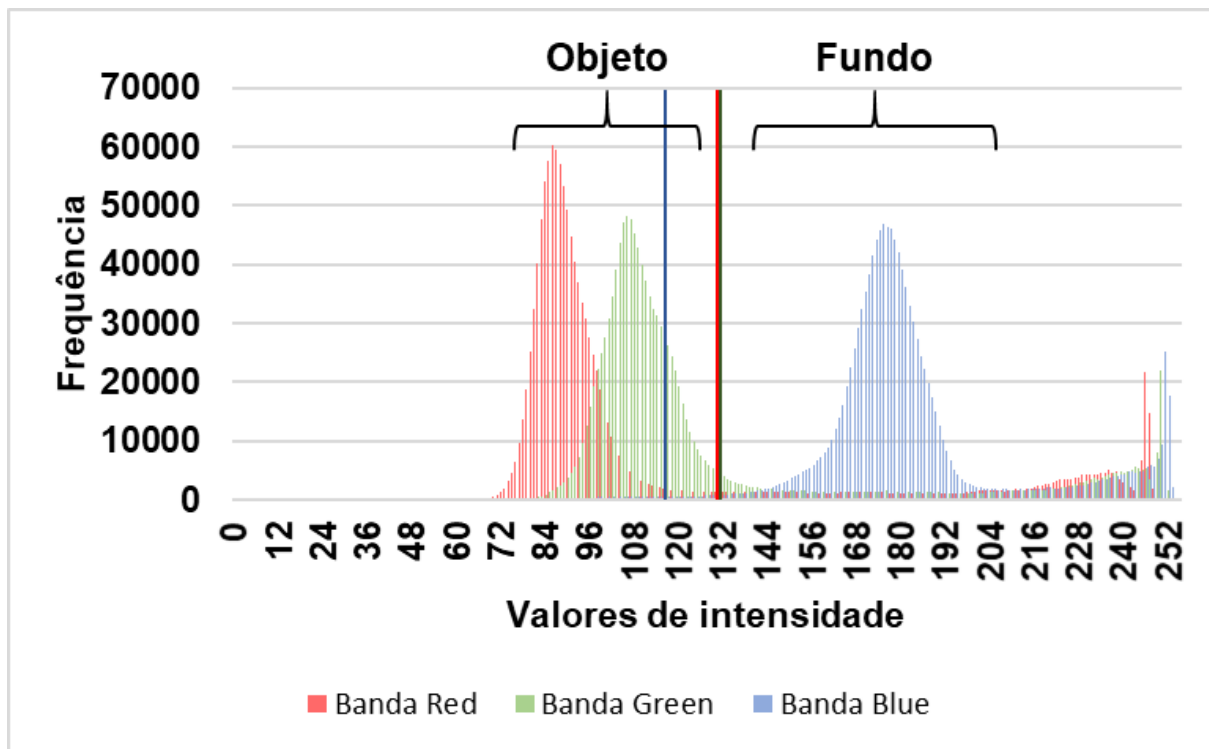
$$\mathbf{VM}_j = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 z_{ji} \quad (21)$$

onde  $z_{ji}$  corresponde ao valor de intensidade  $i$  da banda  $j$  da imagem colorida, com  $i = 1, 2, \dots, 9$  e  $j = 1, 2, 3$  (correspondendo ao número de bandas da imagem, 1 para a banda Red, 2 para a banda Green e 3 para a banda Blue).

A técnica de limiarização foi empregada para extrair o objeto de interesse das imagens (queima do papel). Esta técnica consiste, basicamente, em classificar os *pixels* de uma imagem de acordo com a especificação de um ou mais limiares (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). A partir da análise de histogramas das imagens dos heliogramas, definiu-se os seguintes limiares globais:  $\mathbf{T} = (130, 130, 95)^T$  para

heliogramas curvilíneos verão,  $\mathbf{T} = (130, 130, 117)^T$  para heliogramas retilíneos outono/primavera e  $\mathbf{T} = (130, 130, 110)^T$  para heliogramas curvilíneos inverno. Na Figura 15 pode-se observar um histograma de um heliograma retilíneo com limiares globais, separando o objeto de interesse do fundo da imagem.

Figura 15 - Histograma de um heliograma retilíneo

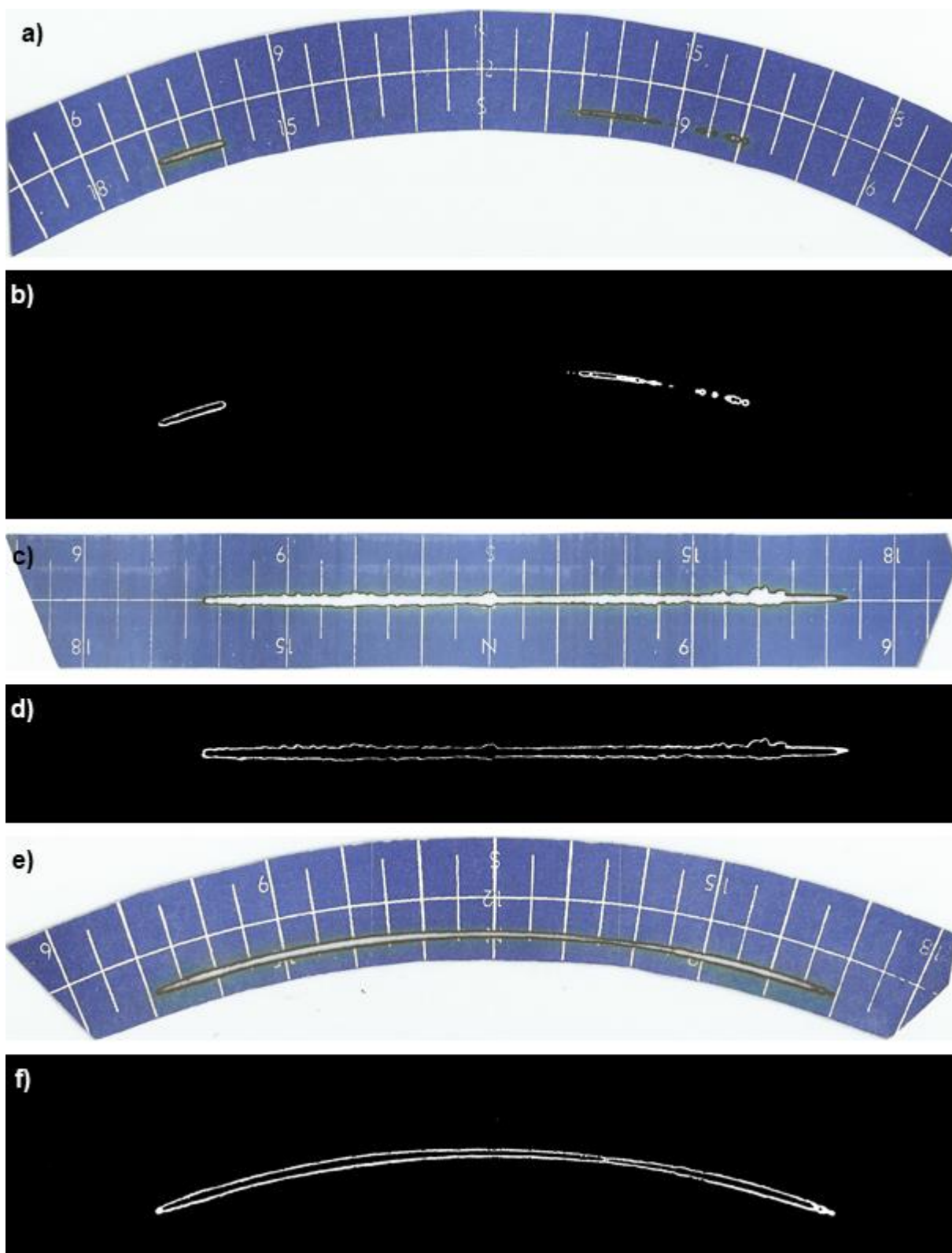


Deste modo, qualquer ponto  $(x, y)$  de uma imagem no qual os valores RGB de intensidade forem menores ou iguais a  $\mathbf{T}$  denomina-se um ponto do objeto, caso contrário, é denominado um ponto do fundo da imagem. A imagem processada  $\mathbf{g}(x, y)$  é dada por

$$\mathbf{g}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x, y) > \mathbf{T} \\ 255 & \text{se } f(x, y) \leq \mathbf{T} \end{cases} \quad (22)$$

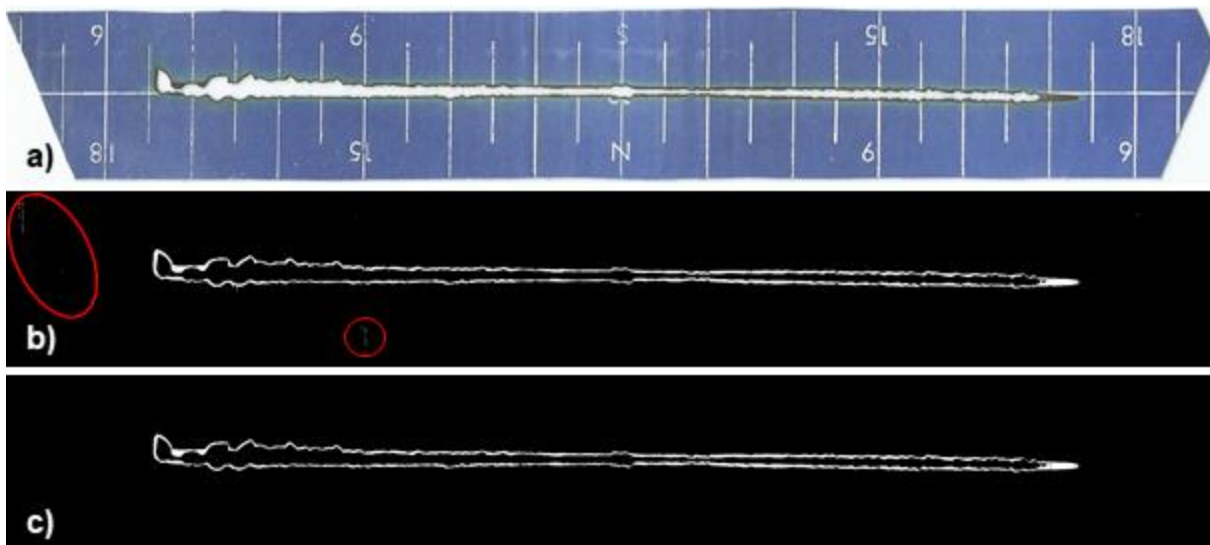
onde *pixels* rotulados com 255 correspondem ao objeto de interesse, *pixels* rotulados com 0 correspondem ao fundo da imagem e  $\mathbf{g}(x, y)$  será uma imagem binária, apresentando 2 níveis de cinza (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). Na Figura 16 pode-se observar o exemplo de aplicação da técnica de limiarização em heliogramas curvilíneos verão, retilíneos outono/primavera e curvilíneos inverno.

Figura 16 - Técnica de limiarização: a) heliograma verão; b) imagem a após limiarização; c) heliograma outono/primavera; d) imagem c após limiarização; e) heliograma inverno; f) imagem e após limiarização



A operação morfológica de abertura foi utilizada para garantir que as imagens a serem processadas estejam sem ruídos persistentes. A abertura consiste em aplicar a operação de erosão seguida da operação de dilatação, para suavizar o contorno de objetos, quebrar istmos estreitos e eliminar saliências finas (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). A erosão remove pontos aleatórios e isolados (normalmente representados por ruídos), porém diminui os objetos na imagem. Para restaurá-los, aplica-se a dilatação, que diferentemente da erosão, aumenta objetos em uma imagem (GONZALEZ; WOODS, 2008). O elemento estruturante utilizado foi similar para as operações de erosão e dilatação, qual consiste em um ponto central  $(x, y)$ , dois vizinhos horizontais  $(x - 1, y)$  e  $(x + 1, y)$  e dois verticais  $(x, y - 1)$  e  $(x, y + 1)$ , semelhante a  $N_4(p)$ . Na Figura 17 pode-se observar o exemplo de remoção de ruídos persistentes de uma imagem limiarizada por meio da operação morfológica de abertura.

**Figura 17 - Operação de Abertura: a) imagem original; b) imagem a limiarizada com ruídos persistentes; c) imagem b após abertura sem ruídos persistentes.**



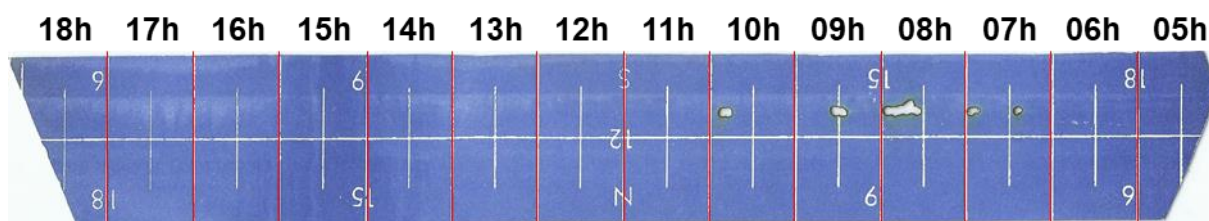
A partir do uso das três técnicas descritas, a imagem do heliograma pôde ser processada com maior eficácia, pois grande parte das anormalidades foram eliminadas, deixando em evidência somente os *pixels* pertinentes a queima do papel.

### 3.3.2.2 Contabilização

A contabilização de horas de BS foi decomposta no processamento de heliogramas retilíneos e processamento de heliogramas curvilíneos. O processamento de heliogramas retilíneos outono/primavera, percorre a imagem digital, por meio de colunas, buscando *pixels* pertinentes a queima do papel para contabilização. O processamento de heliogramas curvilíneos verão/inverno, percorre a imagem digital, por meio de retas diagonais, buscando evidências positivas de queima do papel. Para otimizar o processamento, as buscas por “*pixels* queimados” podem ser interrompidas em duas condições: quando se atinge o último *pixel* válido da imagem ou quando um *pixel* queimado (*pixel* branco) é encontrado.

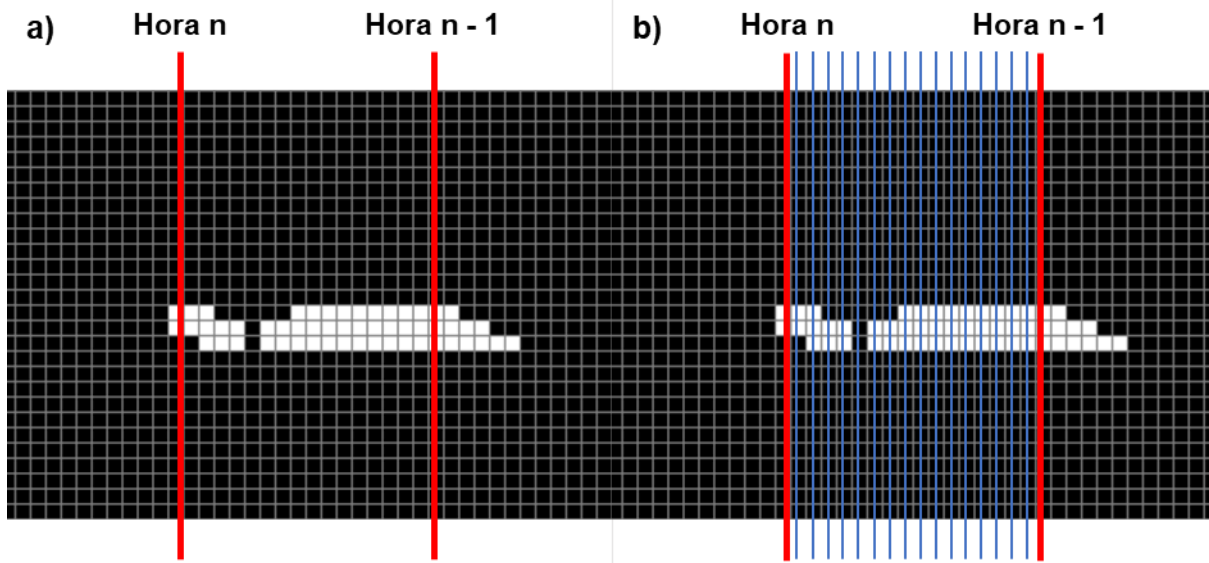
Em heliogramas outono/primavera, a queima do papel reproduz uma trajetória retilínea ao longo das horas. Possuindo um intervalo de medidas de 5 a 18 horas, totalizando 14 horas. Na Figura 18 pode-se observar as delimitações horárias para heliogramas retilíneos.

Figura 18 - Delimitações horárias para heliogramas retilíneos



Por meio das delimitações horárias se tem o número de colunas para cada hora do heliograma retilíneo, conforme ilustra a Figura 19a, para um determinado intervalo de hora. A quantidade de colunas, determina, do mesmo modo, a quantidade de verificações de queima do papel que serão realizadas em um intervalo (Figura 19b).

Figura 19 - Exemplo de intervalo de hora de um heliograma retilíneo



O processo de contabilização se repete para todas as horas do heliograma, armazenando os resultados em um vetor de 14 posições (**valHora**), como mostra a equação (23)

$$\text{valHora}_i = \frac{\text{nColQ}_i}{\text{nColT}_i} \quad (23)$$

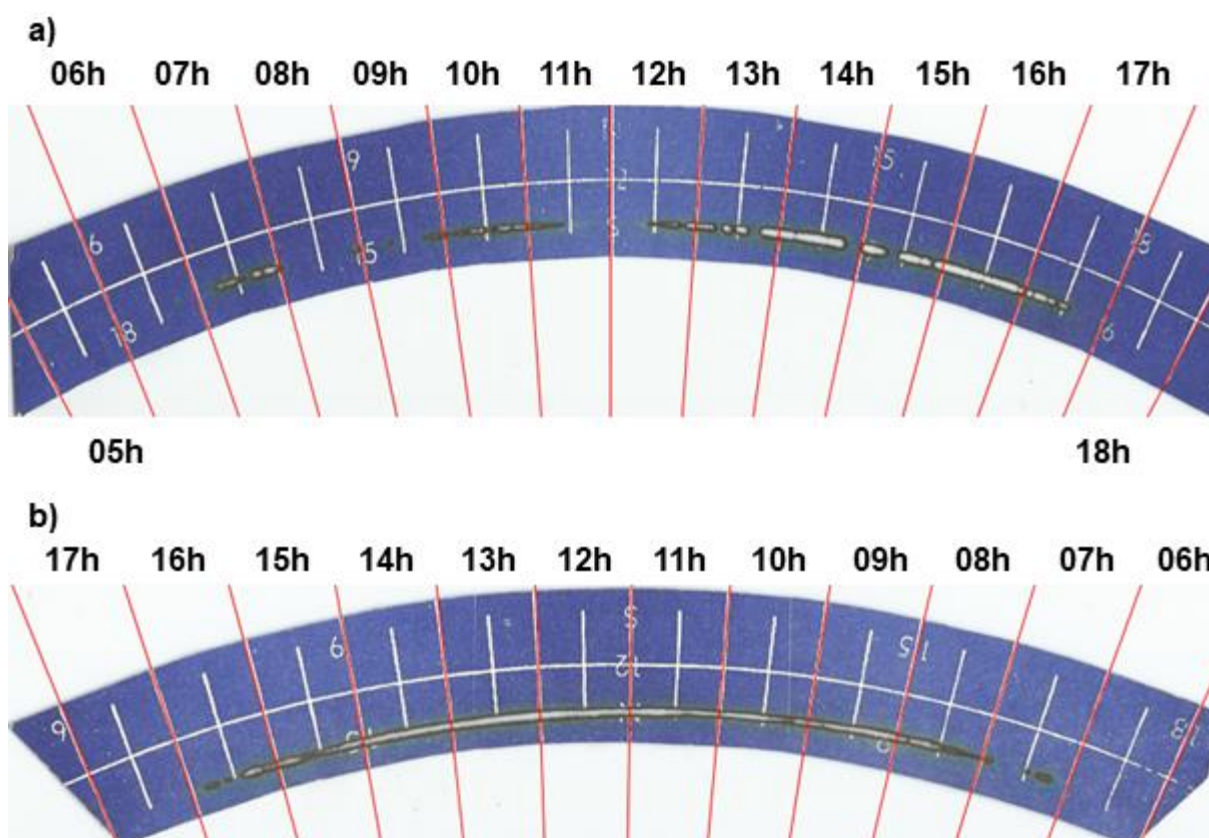
onde **nColQ** é o número de colunas com evidências de *pixels* queimados da hora  $i$  ( $i = 5, \dots, 18$ , representando as horas do dia), **nColT** é o número de total colunas da hora  $i$ , dado pelo intervalo de colunas entre o início e fim delimitados de cada hora. Após o processamento horário, o total diário de BS (**valDia**), em hora e décimo de hora, é dado pelo somatório do vetor **valHora**, sendo

$$\text{valDia} = \sum_{i=5}^{18} \text{valHora}_i \quad (24)$$

Para heliogramas verão/inverno, a queima do papel reproduz uma trajetória curvilínea ao longo das horas. Possuindo um intervalo de medidas de 5 a 18 horas em heliogramas verão e de 6 a 17 horas em heliogramas inverno, totalizando 14 e 12 horas, respectivamente. Contabilizações em heliograma retilíneos baseiam-se na busca ao longo de colunas (sentido vertical). No entanto, para heliogramas

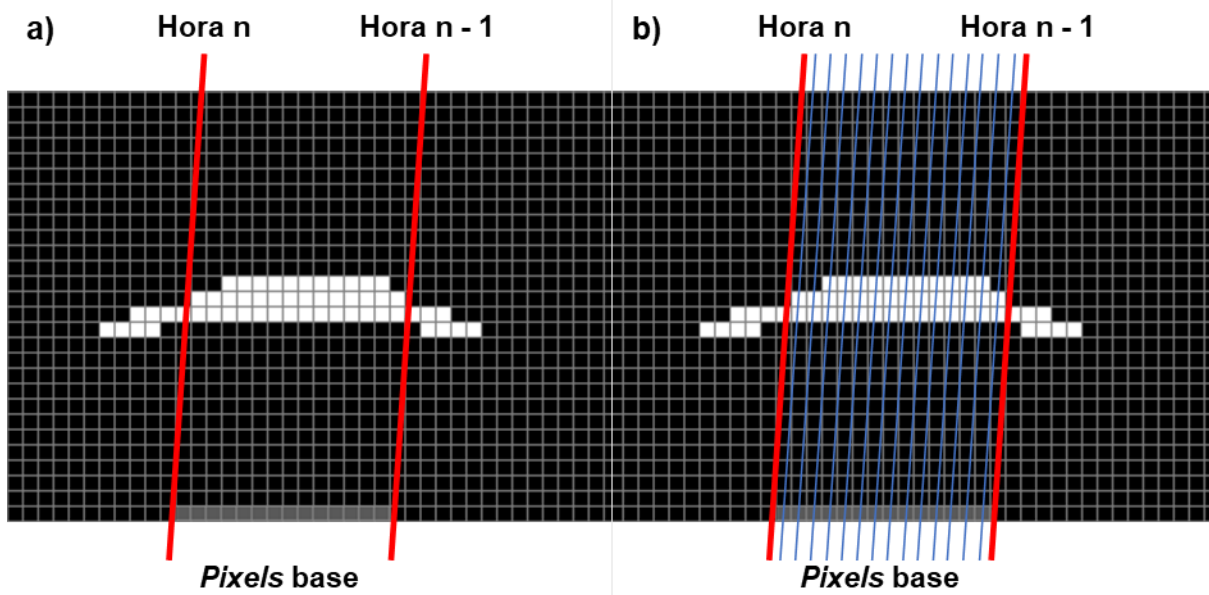
curvilíneos, a busca deve ser realizada ao longo de retas diagonais, uma vez que apresentam características curvilíneas/circulares. Na Figura 20 pode-se observar as delimitações horárias, em retas diagonais, para os heliogramas curvilíneos. Onde heliogramas verão foram rotacionados a  $180^\circ$  para simplificar o processo de contabilização.

**Figura 20 - Delimitações horárias para heliogramas curvilíneos: a) heliograma curvilíneo verão rotacionado a  $180^\circ$ ; b) heliograma curvilíneo inverno**



A partir das delimitações horárias se tem a variação angular e o número de *pixels* base para cada hora do heliograma curvilíneo, conforme ilustra a Figura 21a, para um determinado intervalo de hora. A quantidade de *pixels* base de um intervalo, determina o número de retas diagonais que o intervalo terá (Figura 21b). Para cada *pixel* base de um intervalo, calcula-se uma equação da reta, com base nas características angulares da hora, descrevendo uma trajetória diagonal. Desta forma, as verificações de queima do papel são realizadas em *pixels* contemplados pela equação da reta.

Figura 21 - Exemplo de intervalo de hora de um heliograma curvilíneo: a) *pixels* base; b) retas diagonais traçadas a partir dos *pixels* base



O processo de contabilização horária em heliogramas curvilíneos é dado pela Equação (25). Para heliogramas verão, o armazenamento dos resultados é feito em um vetor de 14 posições e para heliogramas inverno o armazenamento é realizado em um vetor de 12 posições.

$$\text{valHora}_i = \frac{\text{nRetQ}_i}{\text{nRetT}_i} \quad (25)$$

onde **nRetQ** é o número de retas diagonais com evidências de *pixels* queimados da hora  $i$ , **nRetT** é o número de total de retas diagonais da hora  $i$ , dado pelo intervalo de retas entre o início e fim delimitados de cada hora. Após o processamento horário, o total diário de BS (**valDia**), em hora e décimo de hora, é dado pelo somatório do vetor **valHora**. Sendo a Equação (26) para heliogramas verão e Equação (27) para heliogramas inverno.

$$\text{valDia}_{CV} = \sum_{i=5}^{18} \text{valHora}_i \quad (26)$$



$$\text{valDia}_{CI} = \sum_{i=6}^{17} \text{valHora}_i \quad (27)$$

### 3.4 Indicativos estatísticos de desempenho

O desempenho do programa computacional em realizar leituras de dados de BS foi avaliada por meio de gráficos de dispersão e indicativos estatísticos. Foram realizadas comparações de dados de BS obtidos pelo método manual (MM) e pelo método automatizado (MA) do programa computacional desenvolvido. Do mesmo modo, computou-se o tempo despendido em leituras de dados de BS, para cada método (MM e MA). No MM, com auxílio de um cronômetro, computou-se o intervalo de tempo que um observador meteorológico despendeu para realizar leituras em heliogramas. Para MA, considerou-se apenas o tempo despendido na aplicação do pré-processamento e contabilização em leituras de imagens digitalizadas de heliogramas. Posteriormente, estimativas de irradiação solar global ( $G'$ ) foram comparadas com dados de irradiação solar global ( $G$ ) mensurados de forma automática por um piranômetro. As estimativas de  $G'$  foram geradas a partir da Equação (10) com dados de BS obtidos por MA e MM.

Os indicativos estatísticos utilizados foram: *Mean Bias Error* (MBE), *Relative Mean Bias Error* (rMBE), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Relative Root Mean Square Error* (rRMSE), Coeficiente de Correlação ( $r$ ), bem como a Média (MD) e Desvio Padrão (DP). O MBE quantifica se a diferença entre pares de dados comparados possui tendência significativa em superestimar ou subestimar. O RMSE estima o erro quadrático dado pelas diferenças entre pares de dados comparados, dando maior peso para grandes erros. Os valores relativos (rMBE e rRMSE) fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média da observação.  $r$  fornece o grau de correlação entre os pares de dados comparados (RINCÓN et al., 2018). Para os indicativos MBE, rMBE, RMSE e rRMSE valores próximos a zero são desejáveis, mas para  $r$  o valor deve ser próximo a 1. As equações dos indicativos estatísticos são descritas a seguir:

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (28)$$

$$\text{rMBE (\%)} = \frac{\text{MBE}}{\bar{Y}} \times 100 \quad (29)$$

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$\text{rRMSE (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Y}} \times 100 \quad (31)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}') (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}')^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (32)$$

$$\text{MD} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (33)$$

$$\text{DP} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \text{MD})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

onde  $Y'$  representa os dados para comparação (horas de BS de MA em hora e décimo de hora ou medidas de  $G'$  em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $Y$  representa os dados de referência (horas de BS de MM em hora e décimo de hora ou medidas de  $G$  em  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ),  $\bar{Y}'$  é a média dos dados para comparação,  $\bar{Y}$  é a média dos dados de referência e  $X$  é o tempo despendido na leitura de dados de BS em segundo e décimo de segundo, por MA ou MM (ANIS et al., 2019; DAS; PARK; PARK, 2015; EL-METWALLY, 2004; SILVA et al., 2017).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Principais interfaces do programa

As interfaces do programa computacional foram desenvolvidas de maneira padronizada, em relação ao uso de cores, ícones e estruturação, a fim de facilitar o entendimento do usuário que irá utilizá-lo. Deste modo, basta o usuário compreender como realizar um cadastro ou consulta e poderá aplicar o mesmo aprendizado para as demais opções de gerenciamento. A Figura 22 apresenta a tela de início do programa computacional SunCounter. Na parte esquerda da tela, observa-se o menu fixo, apresentado em todas as telas do programa, para navegação facilitada.

Figura 22 - Tela de início do programa computacional SunCounter



Na Figura 23 pode-se observar um exemplo de tela de consulta do programa computacional. Telas de consulta permitem diferentes configurações de filtragem e exibição de registros, conforme critérios do usuário. Possibilitam, do mesmo modo, o *download* das informações exibidas em arquivos no formato csv, para que o usuário possa visualizá-las em programas de planilhas eletrônicas, facilitando análises e geração de gráficos.

Figura 23 - Tela de consulta de heliogramas

SUNCOUNTER ADMINISTRADOR

Página Inicial

OPERAÇÕES

- Estações
- Heliogramas
- Efemérides
- Usuários

Listagem de Heliogramas da estação EML

Exiba 5 registros      Filtrar registros:

Data Heliograma	Total de horas	Revisão	Ações
26/12/2015	0,97	Revisado	
25/12/2015	1,75	Revisado	
24/12/2015	3,58	Revisado	
23/12/2015	2,68	Revisado	
22/12/2015	4,40	Revisado	

6 a 10 de 365 registros

Anterior 1 2 3 4 5 ... 73 Posterior

+      

FCA SunCounter 2020 unesp

A Figura 24 apresenta um exemplo de tela de cadastro do programa computacional. Telas de cadastro exibem informações requeridas para que o programa possa efetuar os cadastros. Para heliogramas, o usuário deve preencher os campos requeridos: imagem do heliograma (imagem digitalizada do heliograma no formato jpg); data do heliograma, heliograma (tipo do heliograma) e estação, para realizar o cadastro juntamente com a requisição de processamento.

Figura 24 - Tela de cadastro de heliograma

The screenshot displays the 'Cadastro de Heliograma' (Heliogram Registration) page in the SunCounter 2020 application. On the left is a green sidebar with navigation options: 'Página Inicial', 'OPERAÇÕES', 'Estações', 'Heliogramas', 'Efemérides', and 'Usuários'. The main content area is titled 'Cadastre um novo Heliograma' and includes a section for 'Imagem do Heliograma' with a file selection button labeled 'Escolher arquivo' and the text 'Nenhum arquivo selecionado'. Below this are three input fields: 'Data do heliograma' (format: dd/mm/aaaa), 'Heliograma' (dropdown menu: 'Selecione um tipo...'), and 'Estação' (dropdown menu: 'Selecione uma estação...'). At the bottom of the form are three circular icons: a green checkmark, a pencil, and a home icon. The footer contains the logos for FCA, SunCounter 2020, and unesp.

Finalizando o cadastro e processamento, o programa computacional disponibiliza os resultados em páginas de internet. Conforme pode-se observar na Figura 25, apresentando o resultado do processamento horário e diário para o heliograma retilíneo do dia 22/09/2015. Onde os valores horários (hora 5 a hora 18) são apresentados em minuto e décimo de minuto, para melhor análise dos resultados. Caso o usuário julgue necessário, após o processamento, o programa permite a alteração dos resultados obtidos. Permitindo ajustes para processamentos que apresentem resultados indesejáveis, como heliogramas (cartões em formato de papel) danificados pela chuva, que impossibilitam leituras automatizadas eficazes.

**Figura 25 - Resultado da leitura de um heliograma**



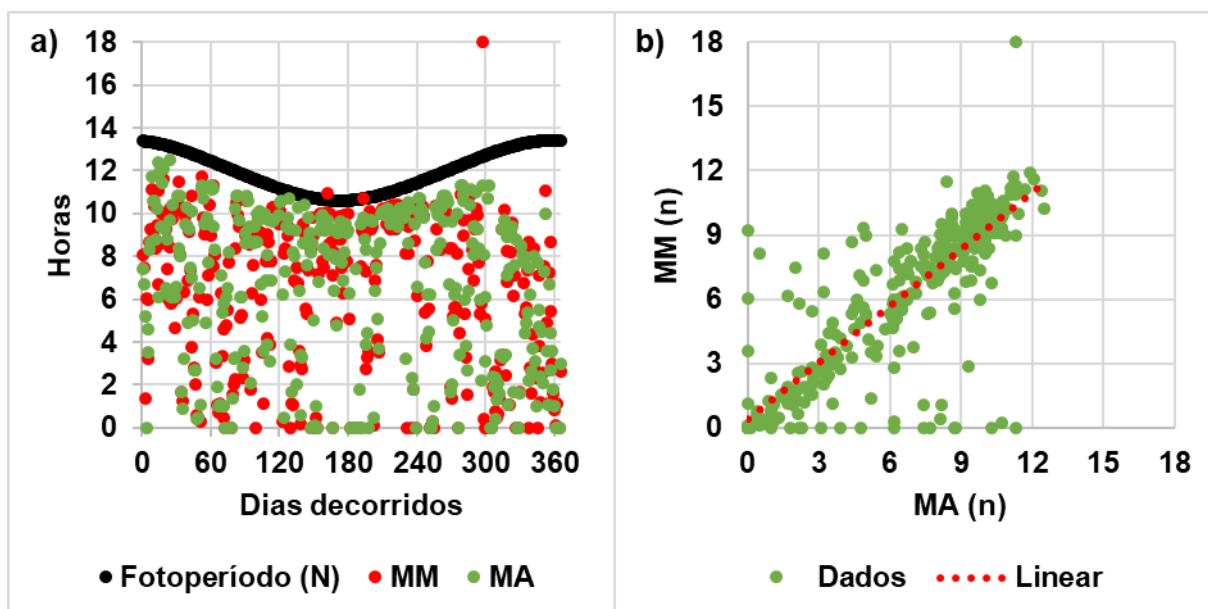
Por meio das leituras automatizadas, o usuário tem acesso rápido e eficiente aos dados de BS, em partição de tempo diária e, principalmente, em partição de tempo horária. Uma base horária de horas de BS possibilita recuperar informações da variação do BS ao decorrer do dia. Contribuindo de maneira significativa para caracterização do potencial solar, distribuição de nuvens (nebulosidade), aerossóis e poluentes de uma localidade. Podendo ser importantes parâmetros para estudos de modelagem.

#### 4.2 Validação das leituras automatizadas

Dados de BS obtidos pelo método manual (MM) e por meio do programa computacional SunCounter, denominado método automatizado (MA), foram comparados em gráficos de dispersão e indicativos estatísticos. Na Figura 26 pode-se observar a evolução temporal e o gráfico de dispersão de horas de BS coletadas por MA e MM. Leituras realizadas por MA apresentaram todos valores abaixo do limite máximo teoricamente possível de horas de BS (menor ou igual ao fotoperíodo). No

entanto, para MM, alguns valores excederam o limite máximo (Figura 26a), podendo indicar erros relacionados ao fator humano na observação da medida.

Figura 26 - a) Evolução temporal das horas de BS obtidas por MA e MM; b) Correlação entre horas de BS obtidas por MA e MM



A Tabela 1 apresenta os indicativos estatísticos por tipo de heliograma e anual da comparação entre as horas de BS obtidas por MA e MM. Heliogramas curvilíneos inverno apresentaram menor MBE com valor de 0,247 horas ( $r\text{MBE} = 3,576 \%$ ) e heliogramas retilíneos apresentaram maior MBE com valor de 0,731 horas ( $r\text{MBE} = 11,973 \%$ ). Heliogramas retilíneos apresentaram menor valor de RMSE com 1,649 horas ( $r\text{RMSE} = 27,001 \%$ ) e maior valor de RMSE para heliogramas curvilíneos verão com 2,420 horas ( $r\text{RMSE} = 42,997 \%$ ). Heliogramas retilíneos apresentaram maior valor de  $r$  com 0,917 e heliogramas curvilíneos verão menor valor de  $r$  com 0,807. O MBE anual mostra que MA superestimou MM em 0,393 horas ( $r\text{MBE} = 6,301 \%$ ), o RMSE anual indica 2,148 horas ( $r\text{RMSE} = 34,432 \%$ ) de erro entre os métodos comparados e o  $r$  anual aponta que os métodos possuem correlação de 0,841.

Tabela 1 - Indicativos estatísticos entre horas de BS obtidas por MA e MM

<b>Tipo Heliograma</b>	<b>MBE (Horas de BS)</b>	<b>rMBE (%)</b>	<b>RMSE (Horas de BS)</b>	<b>rRMSE (%)</b>	<b>r</b>
CV	0,297	5,283	2,420	42,997	0,807
RT	0,731	11,973	1,649	27,001	0,917
CI	0,247	3,576	2,180	31,506	0,820
Anual	0,393	6,301	2,148	34,432	0,841

CV - Heliograma curvilíneo verão

RT - Heliograma retilíneo outono/primavera

CI - Heliograma curvilíneo inverno

A Tabela 2 apresenta estatísticas descritivas por tipo de heliograma e anual do tempo despendido na coleta de horas de BS por MA e MM. Para MA, heliogramas retilíneos apresentaram, em média, menor tempo despendido em coletas, com valor de 9,337 segundos e heliogramas curvilíneos verão apresentaram maior tempo despendido em coletas, com valor de 14,881 segundos. Para MM, o observador meteorológico despendeu menor tempo em coletas de heliogramas curvilíneos inverno, com valor médio de 43,014 segundos e maior tempo despendido em coletas de heliogramas curvilíneos verão, com valor médio de 65,808 segundos. No geral, as médias anuais indicam que MA despende 41,825 segundos a menos no tempo de coleta de horas de BS em relação a MM (3,488 vezes menor).

Tabela 2 - Comparação do tempo despendido na coleta das horas de BS obtidas por MA e MM

<b>Tipo Heliograma</b>	<b>MD MA (seg.)</b>	<b>DP MA (seg.)</b>	<b>MD MM (seg.)</b>	<b>DP MM (seg.)</b>
CV	14,881	1,281	65,808	27,225
RT	9,337	0,733	53,326	21,206
CI	11,108	0,663	43,014	18,420
Anual	11,991	2,451	53,816	24,590

CV - Heliograma curvilíneo verão

RT - Heliograma retilíneo outono/primavera

CI - Heliograma curvilíneo inverno

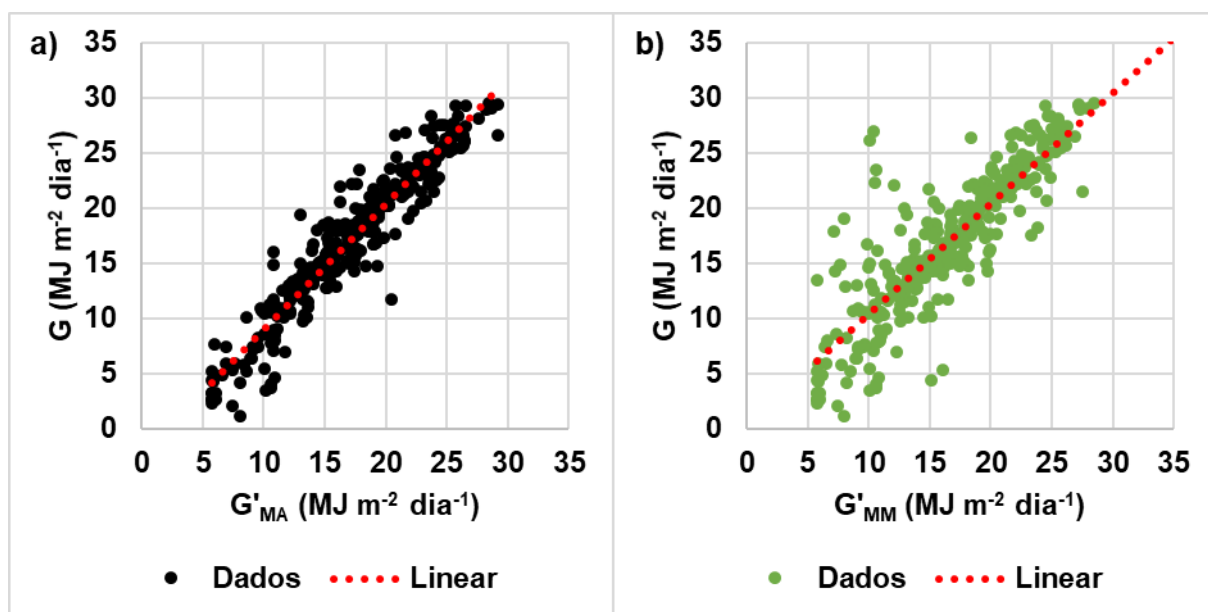
A leitura de heliogramas retilíneos outono/primavera despende menor tempo devido ao processo de contabilização apresentar maior simplicidade, menor demanda por cálculos e verificações de *pixels* pertinentes a queima do papel. Para heliogramas



curvilíneos, o processo de contabilização apresenta maior complexidade (definição de *pixels* base, equação das retas, verificações de *pixels* no sentido diagonal). Deste modo, a leitura em heliogramas curvilíneos demanda maior tempo. Para heliogramas curvilíneos verão, devido ao método de contabilização e por possuírem maior quantidade de *pixels*, apresentam maior média de tempo despendido em leituras.

O método manual, utilizado em estações meteorológicas, depende da observação humana, sendo passível de erros. A comparação entre o MA e MM para coleta de horas de BS pode não ser confiável. Neste sentido, para complementar a validação, estimativas de  $G'$  foram geradas com dados de BS obtidos por MA ( $G'_{MA}$ ) e MM ( $G'_{MM}$ ) e comparadas com dados de  $G$  mensurados de forma automática. A Figura 27 ilustra a correlação entre  $G$  x  $G'_{MA}$  e  $G$  x  $G'_{MM}$ . Para  $G$  x  $G'_{MA}$ , os valores apresentam correlação linear positiva, porém maior espalhamento é evidenciado em valores de  $G$  abaixo de  $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Para  $G$  x  $G'_{MM}$ , os valores apresentam correlação positiva e maior dispersão em medidas de  $G$  abaixo de  $27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .

Figura 27 - a) correlação entre  $G$  x  $G'_{MA}$ ; b) correlação entre  $G$  x  $G'_{MM}$



A Tabela 3 apresenta os indicativos estatísticos da comparação entre  $G$  x  $G'_{MA}$ . A estação verão apresentou menor MBE, com  $-0,125 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ( $r\text{MBE} = -0,636 \%$ ) e a estação inverno apresentou maior MBE, com  $0,402 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ( $r\text{MBE} = 2,793 \%$ ). Em relação ao RMSE, a estação outono apresentou menor valor, com  $1,350 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ( $r\text{RMSE} = 9,038 \%$ ) e a estação verão apresentou maior valor, com  $2,529 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .

$^2 \text{ dia}^{-1}$  (rRMSE = 12,918 %). A estação inverno apresentou maior valor de  $r$ , com 0,978 e a estação primavera menor valor de  $r$ , com 0,922. O MBE anual mostra que  $G'_{MA}$  superestimou  $G$  em  $0,084 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rMBE = 0,500 %), o RMSE anual indica  $2,045 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rRMSE = 12,109 %) de erro entre  $G$  x  $G'_{MA}$ ,  $r$  anual mostra que os métodos possuem 0,954 de correlação.

**Tabela 3 - Indicativos estatísticos entre  $G$  x  $G'_{MA}$**

<b>Estação do ano</b>	<b>MBE (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>rMBE (%)</b>	<b>RMSE (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>rRMSE (%)</b>	<b>r</b>
Verão	-0,125	-0,636	2,529	12,918	0,936
Outono	0,271	1,811	1,350	9,038	0,969
Inverno	0,402	2,793	1,575	10,949	0,978
Primavera	-0,215	-1,154	2,451	13,144	0,922
Anual	0,084	0,500	2,045	12,109	0,954

O heliógrafo não difere nuvens segundo o grau de opacidade. Alguns tipos de nuvens, embora possam apresentar graus de opacidade diferentes, provocam efeito idêntico no registro do heliógrafo. Como consequência, as horas de BS registradas podem ser as mesmas para uma série de valores de irradiação solar global (VAREJÃO-SILVA, 2006). Deste modo, a comparação de  $G$  x  $G'_{MA}$  apresentou melhor desempenho para as estações do ano outono e inverno, por possuírem menor nebulosidade e desempenho inferior para estações do ano verão e primavera, caracterizadas com maior nebulosidade.

A Tabela 4 apresenta os indicativos estatísticos da comparação entre  $G$  x  $G'_{MM}$ . A estação inverno apresentou menor MBE, com  $0,163 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rMBE = 1,132 %) e a estação primavera apresentou maior MBE, com  $-1,169 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rMBE = -6,266 %). Em relação ao RMSE, a estação inverno apresentou menor valor, com  $2,545 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rRMSE = 17,690 %) e a estação primavera apresentou maior valor, com  $4,400 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rRMSE = 23,595 %). A estação verão apresentou maior valor de  $r$ , com 0,906 e a estação primavera menor valor de  $r$ , com 0,734. O MBE anual mostra que  $G'_{MM}$  subestimou  $G$  em  $-0,428 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rMBE = -2,531 %), o RMSE anual indica  $3,245 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (rRMSE = 19,214 %) de erro entre  $G$  x  $G'_{MM}$ ,  $r$  anual mostra que os métodos possuem 0,864 de correlação.

Tabela 4 - Indicativos estatísticos entre  $G$  x  $G'_{MM}$ 

Estação do ano	MBE (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	rMBE (%)	RMSE (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	rRMSE (%)	r
Verão	-0,244	-1,247	3,002	15,336	0,906
Outono	-0,496	-3,321	2,745	18,374	0,834
Inverno	0,163	1,132	2,545	17,690	0,901
Primavera	-1,169	-6,266	4,400	23,595	0,734
Anual	-0,428	-2,531	3,245	19,214	0,864

Comparando os resultados obtidos em relação as estações do ano,  $G'_{MA}$  apresentou melhor desempenho para maioria dos indicativos estatísticos, exceto para o MBE e rMBE da estação do inverno ( $G'_{MM}$ : MBE = 0,163; rMBE = 1,132 e  $G'_{MA}$ : MBE = 0,402; rMBE = 2,793). No tocante aos indicativos anuais,  $G'_{MA}$  mostrou melhor MBE e rMBE, menor erro (RMSE e rRMSE) e maior correlação (r) em comparação com a  $G$  mensurada de maneira automática. Indicando que o programa computacional desenvolvido pode ser utilizado em estações meteorológicas que realizem rotineiramente a coleta de dados de BS, por garantir automatização, padronização e rapidez nas coletas.

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o desenvolvimento de um programa computacional para gerenciamento e coleta de dados de brilho solar mensurados por heliógrafos. Possibilitando, do mesmo modo, a gestão de usuários, estações meteorológicas e efemérides. A partir dos resultados apresentados, se obteve as seguintes conclusões:

- Com base nos indicativos estatísticos, o programa computacional mostrou melhor desempenho na coleta de dados de BS em relação ao método manual, realizado por um observador meteorológico;
- O uso do programa computacional permitiu a formação de um banco de dados de brilho solar na partição de tempo diária e principalmente horária, a qual carece de informação por ser onerosa a coleta realizada de maneira manual;
- Em relação as informações armazenadas, o programa computacional possibilitou acesso rápido e eficiente. Bem como, o *download* para utilização em outras ferramentas de análise;
- Em relação à rotina operacional, o programa computacional garantiu a padronização e automatização das leituras de BS. Eliminando a subjetividade da medida por não levar em consideração aspectos físicos e psicológicos do observador responsável por coletar os dados;
- Para continuidade dos estudos, um conjunto maior de dados de brilho solar será solicitado à Estação Meteorológica Lageado. Possibilitando gerar coeficientes empíricos A-P mensais, para melhor caracterização do clima local de Botucatu, aperfeiçoando estimativas de irradiação solar global. Bem como, gerar modelos A-P de estimativas irradiação na partição de tempo horária.

## REFERÊNCIAS

ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using Sunshine duration in Spain. **Energ. Convers. Manage**, v. 45, p. 1529-1535, 2004.

ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quart. J. Roy. Met. Soc.**, v. 50, p. 121-125, 1924.

ANIS, Md. S. et al. Generalized models for estimation of global solar radiation based on sunshine duration and detailed comparison with the existing: A case study for India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 179-198, 2019.

APACHE NETBEANS. **Development Environment, Tooling Platform and Application Framework**. 2019. Disponível em: <https://netbeans.apache.org/>. Acesso em: 23 out. 2019.

BOOTSTRAP. **About**. 2019. Disponível em: <https://getbootstrap.com/docs/4.3/about/overview/>. Acesso em: 23 out. 2019.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR1000: Measurement and Control Datalogger**. 2019. Disponível em: <https://www.campbellsci.eu/cr1000>. Acesso em: 17 out. 2019.

DAL PAI, A. *et al.* MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, v. 99, p. 754-763, 2016.

DAS, A.; PARK, J.; PARK, J. Estimation of available global solar radiation using sunshine duration over South Korea. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 134, p. 22-29, 2015.

EL-METWALLY, M. Simple new methods to estimate global solar radiation based on meteorological data in Egypt. **Atmospheric Research**, v. 69, p. 217-239, 2004.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA LAGEADO. **Sobre a Estação Meteorológica**. Disponível em: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>. Acesso em: 18 out. 2019.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo: Person Education, 2008.

IBGE. **Panorama do município de Botucatu - SP**. Cidades: IBGE, 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 16 out. 2019.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Ontario: Academic Press, 1983. 393 p.

KIPP&ZONEN. **CMP3 second class pyranometer - Kipp & Zonen**. 2019.

Disponível em: [https://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer#.Xah\\_mOhKgdU](https://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer#.Xah_mOhKgdU). Acesso em: 17 out. 2019.

LI, C. *et al.* Digital image processing technology applied in level measurement and control system. **Procedia Engineering**, v. 24, p. 226-231, 2011.

LI, H. *et al.* Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3141-3145, 2011.

LIU, X. *et al.* Assessing models for parameters of the Ångström–Prescott formula in China. **Applied Energy**, v. 96, p. 327-338, 2012.

LIU, X. *et al.* Calibration of the Angstrom–Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 697-710, 2009.

MARINONI, N. *et al.* Characterisation of mortar morphology in thin sections by digital image processing. **Cement and Concrete Research**. v. 35, p. 1613-1619, 2005.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, Hugo. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MYSQL. **Why MySQL**. 2019. Disponível em: <https://www.mysql.com/why-mysql/>. Acesso em: 23 out. 2019.

ORACLE. **Java™ EE at a Glance**. 2019. Disponível em: <https://www.oracle.com/java/technologies/java-ee-glance.html>. Acesso em: 23 out. 2019.

PAULESCU, M. *et al.* Ångström–Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 495-506, 2016.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações**. São Paulo: Thomson Learning, 2008. 508 p.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Trans. Roy. Soc. Sci.**, Australia, v. 64, p. 114-125, 1940.

RIBAS, C. Y.; THIVES, L. P. Evaluation of effect of compaction method on the macrostructure of asphalt mixtures through digital image processing under Brazilian conditions. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116821, 2019.

RINCÓN, A. *et al.* Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, v. 170, p. 201-211, 2018.

ROSSI, T. J. *et al.* Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu/SP/Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 448-459, 2018.

SILVA, M. B. P. *et al.* Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 26, p. 11-23, 2017.

SOUZA, A. P. *et al.* Estimativa das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação solar global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 277-288, 2011.

SUEHRCKE, H. On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Angstrom equation revisited. **Solar Energy**, v. 68, n. 5, p. 417-425, 2000.

TANG, W. *et al.* Quality control and estimation of global solar radiation in China. **Solar Energy**, v. 84, p. 466-475, 2010.

TEKE, A; YILDIRIM, H. B. Estimating the monthly global solar radiation for Eastern Mediterranean Region. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 628-635, 2014.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2. Recife, 2006. 449 p.

ZHAO, N.; ZENG, X.; HAN, S. Solar radiation estimation using sunshine hour and air pollution index in China. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 846-851, 2013.