

MATHEUS RODRIGUES RANIERO

**ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR COM HORAS DE BRILHO SOLAR
PROCESSADAS DE FORMA AUTOMATIZADA POR UM
PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Botucatu

2024

MATHEUS RODRIGUES RANIERO

**ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR COM HORAS DE BRILHO SOLAR
PROCESSADAS DE FORMA AUTOMATIZADA POR UM
PROGRAMA COMPUTACIONAL**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Alexandre Dal Pai

Botucatu

2024

R197e

Raniero, Matheus Rodrigues

Estimativas de irradiação solar com horas de brilho solar
processadas de forma automatizada por um programa computacional /
Matheus Rodrigues Raniero. -- Botucatu, 2024

80 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Energia solar. 2. Modelos lineares. 3. Modelos não-lineares. 4.
Processamento digital de imagens. 5. Radiação solar. 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.

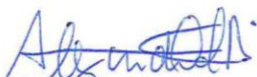
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR COM HORAS DE BRILHO SOLAR
PROCESSADAS DE FORMA AUTOMATIZADA POR UM PROGRAMA
COMPUTACIONAL

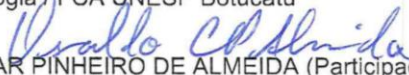
AUTOR: MATHEUS RODRIGUES RANIERO

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Energia na
Agricultura), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / FCA UNESP Botucatu



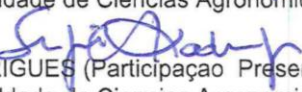
Prof. Dr. OSVALDO CESAR PINHEIRO DE ALMEIDA (Participação Presencial)
Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Pesquisador Dr. MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA (Participação Presencial)
Tecnologia da Informação / Escola Senai Luiz Massa



Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu UNESP



Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas - Unesp

Botucatu, 29 de janeiro de 2024

*À memória da minha querida avó, Reni Tivan Raniero,
e a todos que me apoiaram durante esta trajetória, dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades que me foram concedidas.

À minha amada avó Reni, aos meus pais Marcelo e Élida, à minha companheira de vida Andréia, e aos demais familiares, pelo constante apoio e pela fé em meu potencial.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, por me proporcionar esta oportunidade, pelos valiosos ensinamentos e pela orientação dedicada ao longo deste percurso.

Aos professores Enzo Dal Pai, Osvaldo Cesar Pinheiro de Almeida, Sérgio Augusto Rodrigues e Valéria Cristina Rodrigues Sarnighausen, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e experiências.

Aos amigos e colegas de pesquisa José Rafael Franco e Marcus Vinícius Contes Calça, expresse minha sincera gratidão por estarem sempre presentes, ouvindo, aconselhando e apoiando.

Aos funcionários do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, Pós-graduação e Biblioteca, pelo suporte fundamental oferecido ao desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O objetivo deste estudo consistiu em propor modelos empíricos para estimar a irradiação solar global e a irradiação solar difusa, ambas em superfície horizontal e em escala diária ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$), para o município de Botucatu, São Paulo, Brasil. Além disso, foram propostos modelos empíricos para estimar as horas de brilho solar utilizando medidas de irradiação solar como base. As horas de brilho solar foram coletadas por um programa computacional, empregando técnicas de processamento digital de imagens. Foram selecionados 6 modelos empíricos de irradiação solar e de horas de brilho solar, incluindo funções polinomiais de grau 1 a grau 4, logarítmicas e exponenciais. O teste de desempenho dos modelos empíricos ocorreu por meio dos indicadores de desempenho MBE, rMBE, RMSE, rRMSE e r. Para classificar os modelos com melhor desempenho utilizou-se o Índice de Desempenho Global (IDG). A utilização do IDG simplificou a análise de desempenho dos modelos empíricos, permitindo integrar os resultados individuais dos indicadores em um único valor. O modelo de polinômio de grau 3, construído com base nas horas de brilho solar, demonstrou desempenho superior na estimativa da irradiação solar global (MBE: $0,0357 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$, rMBE: $0,2179\%$, RMSE: $1,1945 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$, rRMSE: $7,2840\%$, r: $0,9732$, IDG: $0,7705$). No que diz respeito à irradiação solar difusa, o modelo de função exponencial, que incorporou as horas de brilho solar juntamente com a irradiação solar global, destacou-se, superando o desempenho dos demais modelos considerados (MBE: $0,3253 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$, rMBE: $5,2587\%$, RMSE: $0,9819 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$, rRMSE: $15,8733\%$, r: $0,9517$, IDG: $0,7638$). Para as horas de brilho solar, o modelo com polinômio de grau 4, baseado na irradiação solar global, mostrou-se mais adequado (MBE: $-0,0203 \text{ h}/\text{dia}$, rMBE: $-0,3010\%$, RMSE: $0,8129 \text{ h}/\text{dia}$, rRMSE: $12,0384\%$, r: $0,9691$, IDG: $1,5150$).

Palavras-chave: energia solar; modelos lineares; modelos não-lineares; processamento digital de imagem; radiação solar.

ABSTRACT

The objective of this study was to propose empirical models to estimate global solar irradiation and diffuse solar irradiation, both on a horizontal surface and on a daily scale ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$), for the municipality of Botucatu, São Paulo, Brazil. Additionally, empirical models were proposed to estimate sunshine duration using solar irradiation measurements as a basis. Sunshine duration was collected using a software employing digital image processing techniques. Six empirical models of solar irradiance and sunshine duration were selected, including polynomial functions from degree 1 to degree 4, logarithmic, and exponential functions. The performance test of the empirical models was conducted using performance indicators MBE, rMBE, RMSE, rRMSE, and r . To classify the models with the best performance, the Global Performance Index (GPI) was used. The use of GPI simplified the performance analysis of the empirical models, allowing the integration of individual indicator results into a single value. The polynomial model of degree 3, built based on sunshine duration, demonstrated superior performance in estimating global solar irradiation (MBE: $0.0357 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$, rMBE: 0.2179% , RMSE: $1.1945 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$, rRMSE: 7.2840% , r : 0.9732 , GPI: 0.7705). In terms of diffuse solar irradiation, the exponential function model, which integrates sunshine duration along with global solar irradiation, emerged as the most effective, surpassing the performance of other considered models (MBE: $0.3253 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$, rMBE: 5.2587% , RMSE: $0.9819 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$, rRMSE: 15.8733% , r : 0.9517 , GPI: 0.7638). For sunshine duration, the model with a degree 4 polynomial, based on global solar irradiation, proved to be more suitable (MBE: $-0.0203 \text{ h}/\text{day}$, rMBE: -0.3010% , RMSE: $0.8129 \text{ h}/\text{day}$, rRMSE: 12.0384% , r : 0.9691 , GPI: 1.5150).

Keywords: solar energy; linear models; non-linear models; digital image processing; solar radiation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do município de Botucatu, São Paulo, Brasil	30
Figura 2 - Série histórica de medidas climáticas do município de Botucatu: a) temperatura e umidade relativa do ar; b) precipitação acumulada.....	31
Figura 3 - Série histórica de medidas climáticas do município de Botucatu: a) nebulosidade; b) brilho solar e fotoperíodo	32
Figura 4 - Localização da EML e ESL	33
Figura 5 - Instrumentos de medição: a) horas de brilho solar; b) irradiância solar global; c) irradiância solar difusa.....	34
Figura 6 - Evolução temporal e boxplot das medidas.....	36
Figura 7 - Heliograma com dados de brilho solar.....	37
Figura 8 - Extração do objeto de interesse de heliogramas: a) curvilíneo verão; b) retilíneo outono/primavera; c) curvilíneo inverno.....	38
Figura 9 - Contabilização de heliogramas retilíneos: a) delimitações horárias; b) exemplo de um intervalo de hora; c) verificações no intervalo de hora....	40
Figura 10 - Contabilização de heliogramas curvilíneos: a) delimitações horárias de curvilíneos verão; b) delimitações horárias de curvilíneos inverno; c) exemplo de um intervalo de hora; d) verificações no intervalo de hora ...	41
Figura 11 - Correlação e boxplot das variáveis	44
Figura 12 - Dispersão entre H_g e H_g' (dados de teste)	51
Figura 13 - IDG dos modelos empíricos de H_g (dados de teste).....	53
Figura 14 - Dispersão entre H_d e H_d' (dados de teste)	56
Figura 15 - IDG dos modelos empíricos de H_d (dados de teste).....	60
Figura 16 - Dispersão entre n e n' (dados de teste)	63
Figura 17 - IDG dos modelos empíricos de n (dados de teste)	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado do controle de qualidade	42
Tabela 2 - Modelos propostos para estimar H_g (dados de treinamento).....	50
Tabela 3 - Desempenho dos modelos empíricos de H_g (dados de teste)	52
Tabela 4 - Modelos propostos para estimar H_d (dados de treinamento).....	54
Tabela 5 - Desempenho dos modelos empíricos de H_d (dados de teste)	58
Tabela 6 - Modelos propostos para estimar n (dados de treinamento)	61
Tabela 7 - Desempenho dos modelos empíricos de n (dados de teste)	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-P	Angstrom-Prescott
F	Ângulo diário
n	Brilho solar (hora e décimo de hora)
n'	Brilho solar estimado (hora e décimo de hora)
R _a ²	Coefficiente de determinação ajustado
K _{td}	Coefficiente difuso
I _{sc}	Constante solar (1361,1 W/m ²)
E ₀	Correção da excentricidade da órbita
D _j	Dia juliano (de 1 a 365)
EML	Estação Meteorológica Lageado
ESL	Estação Solarimétrica Lageado
N	Fotoperíodo (hora e décimo de hora)
K _d	Fração difusa
hs	Hora e décimo de hora
h/dia	Horas por dia
IDG	Indicador de Desempenho Global
K _t	Índice de transmissividade atmosférica
H _d	Irradiação solar difusa na horizontal (MJ/m ²)
H _d '	Irradiação solar difusa na horizontal estimada (MJ/m ²)
H _e	Irradiação solar extraterrestre projetada na horizontal (MJ/m ²)
H _g	Irradiação solar global na horizontal (MJ/m ²)
H _g '	Irradiação solar global na horizontal estimada (MJ/m ²)
I _d	Irradiância solar difusa na horizontal (MJ/m ²)
I _e	Irradiância solar extraterrestre projetada na horizontal (W/m ²)
I _g	Irradiância solar global na horizontal (W/m ²)
Agromet	Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
MEO	Melo-Escobedo-Oliveira
MJ/m ² /dia	<i>Megajoule</i> por metro quadrado por dia
mm	Milímetros
PDI	Processamento Digital de Imagens
PSP	<i>Precision Spectral Pyranometer</i>
S	Razão de Insolação

rMBE	<i>Relative Mean Bias Error</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
rRMSE	<i>Relative Root Mean Square Error</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
W/m ²	<i>Watt por metro quadrado</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

w_s	Ângulo diário horário (graus)
w_s^*	Ângulo diário horário (radianos)
ω	Ângulo horário
r	Coefficiente de correlação de Pearson
ρ	Coefficiente de correlação de Spearman
$\cos \Theta_z$	Cosseno do ângulo zenital
δ	Declinação solar
$^{\circ}\text{C}$	Grau célsius
Φ	Latitude da localidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	Horas de brilho solar	25
2.2	Estimativas de irradiação solar global.....	26
2.3	Estimativas de irradiação solar difusa.....	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1	Localidade e clima	30
3.2	Medidas e instrumentação	32
3.2.1	Processamento automatizado de horas de brilho solar	36
3.2.2	Controle de qualidade das medidas de irradiância solar	42
3.3	Modelos empíricos do estudo	43
3.4	Indicadores estatísticos de desempenho	48
3.4.1	Indicador de desempenho global	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1	Modelos empíricos de irradiação solar global	50
4.2	Modelos empíricos de irradiação solar difusa	54
4.3	Modelos empíricos de horas de brilho solar	61
5	CONCLUSÕES.....	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em pleno desenvolvimento tecnológico e este cenário reflete o que acontece em todo o mundo, aumentos contínuos no fornecimento e na demanda de energia, especialmente de fontes renováveis, devido aos recursos limitados de combustíveis fósseis e aos problemas associados aos gases do efeito estufa (Ebrahimi; Ghorbani; Ziabasharhagh, 2022; Souza *et al.*, 2023). Nesse contexto, a energia solar desempenha um papel importante na infraestrutura sustentável global e nacional, por ser uma fonte de geração limpa e amigável ao meio ambiente (Furlan *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2022).

O conhecimento de dados climáticos (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) e, principalmente, das componentes da radiação solar (global, difusa e direta), é um requisito essencial para projetar e avaliar qualquer sistema de energia solar (Alam; Kaushik; Garg, 2009). Sendo, do mesmo modo, variáveis importantes para sistemas de simulação ou previsão climatológicos e agrícolas. Considerando sua grande importância, a demanda por dados precisos de radiação solar tem crescido significativamente (Das; Park; Park, 2015; Paulescu *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2011).

Em geral, a forma mais precisa de determinar a quantidade de radiação solar em um local específico, envolve a instalação de instrumentos de medição de alta precisão, como piranômetros e pireliômetros (Khorasanizadeh; Mohammadi, 2016). No entanto, devido a uma série de obstáculos, como a escassez de instrumentos necessários e questões financeiras, os dados de radiação solar não estão facilmente acessíveis, especialmente para estações em países em desenvolvimento e regiões isoladas (Tahir *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, torna-se indispensável o desenvolvimento de modelos empíricos que possam estimar as componentes da radiação solar com base em outras variáveis meteorológicas prontamente disponíveis (Liu *et al.*, 2012; Varejão-Silva, 2006; Zhao; Zeng; Han, 2013). Diversas estações ao redor do mundo registram as horas de brilho solar, e os modelos empíricos baseados nessa variável são amplamente aceitos, pois oferecem resultados precisos ao estimar a radiação solar global (Das *et al.*, 2005; El-Metwally, 2004; Iqbal, 1983; Liu *et al.*, 2012; Paulescu *et al.*, 2016). Da mesma forma, para a radiação solar difusa, as horas de brilho solar

também têm sido consideradas em sua estimativa (Khorasanizadeh; Mohammadi, 2016; Song *et al.*, 2020).

A coleta de dados de horas de brilho solar apresenta um desafio em relação à sua efetividade, uma vez que é feita de forma manual por observadores meteorológicos, a partir de marcações realizadas por heliógrafos (Varejão-Silva, 2006). A subjetividade na interpretação dessas marcações, devido ao fator humano, pode afetar a integridade e confiabilidade de uma base de dados. Além disso, no processo de coleta manual, somente as informações do brilho solar diário são armazenadas, deixando de lado informações importantes sobre as variações horárias.

Para superar esse impasse, Raniero (2020) apresentou um programa computacional projetado para efetuar coletas automatizadas e padronizadas de horas de brilho solar. Esse programa, utilizando técnicas avançadas de processamento digital de imagens, reduziu significativamente os possíveis erros decorrentes da subjetividade inerente à coleta manual. Além disso, viabilizou a criação de um banco de dados horário de horas de brilho solar, algo que anteriormente era desafiador de obter devido às limitações do método manual utilizado (Raniero *et al.*, 2020).

O objetivo deste estudo consistiu em propor modelos empíricos para estimar a irradiação solar global e difusa, ambas em superfície horizontal e em escala diária ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$), para o município de Botucatu, São Paulo, Brasil. Os modelos baseados nas horas de brilho solar utilizaram dados coletados pelo programa proposto por Raniero (2020). Esses modelos representam ferramentas valiosas para pesquisadores em locais com condições climáticas semelhantes às de Botucatu, possibilitando preencher lacunas nas medições de irradiação solar e apoiar decisões relacionadas a projetos e simulações de energia solar e agrícolas.

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

- i. Avaliar o desempenho de modelos empíricos para estimar a irradiação solar difusa, considerando modelos baseados na razão de insolação, no índice de transmissividade atmosférica e modelos que utilizam ambas as variáveis;
- ii. Devido à desativação da estação meteorológica convencional da Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp) de Botucatu em 2016, propor modelos empíricos para estimar as horas de brilho solar nos dias atuais, utilizando medidas de irradiação solar como base.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Horas de brilho solar

As horas de brilho solar representam o intervalo de tempo durante o qual o Sol não é obstruído, por nuvens ou outros fenômenos atmosféricos, para um observador na superfície da Terra (Iqbal, 1983; Varejão-Silva, 2006). O brilho solar têm uma profunda relação com a radiação solar, constituindo-se como um dos principais indicadores climáticos para um local específico e exerce influência significativa em atividades agrícolas, na indústria turística e no monitoramento ambiental, além de ter aplicabilidade em design arquitetônico e modelagem hidrológica (Wang *et al.*, 2021).

Os dados de horas de brilho solar são registrados há cerca de 160 anos em estações meteorológicas, representando uma extensa série histórica de grande importância na pesquisa científica. Com um design inicial proposto em 1853 e aprimorado em 1880, o heliógrafo de Campbell-Stokes se tornou o dispositivo comumente utilizado para registrar as horas de brilho solar. Ainda preservado em algumas estações, este instrumento desempenha um papel crucial no auxílio ao entendimento do clima, especialmente no contexto das mudanças climáticas (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2021).

Em 1962, o heliógrafo de Campbell-Stokes foi adotado como o instrumento padrão para registrar as horas de brilho solar, após a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) estabelecer diretrizes e especificações para o instrumento e os cartões de papel utilizados (World Meteorological Organization - WMO, 2021). Porém, em 1981, a OMM redefiniu as horas de brilho solar como sendo o número de horas em que a radiação solar direta excede 120 W/m^2 , o que facilitou o desenvolvimento de instrumentos automáticos para sua aquisição (Wang *et al.*, 2021).

Atualmente, o método automático de referência para medir as horas de brilho solar é o piranométrico. Este método utiliza um pireliômetro acoplado a um rastreador solar para medir a radiação solar direta e, posteriormente, calcular as horas de brilho solar. Embora ofereça alta precisão, sendo consequência direta da definição de horas de brilho solar, o método implica em custos elevados de capital e manutenção, além de exigir manutenção humana frequente e complexa no local de instalação (Wang *et al.*, 2021; WMO, 2021).

2.2 Estimativas de irradiação solar global

Foram propostos inúmeros modelos para estimar a irradiação solar global a partir de várias variáveis meteorológicas, como horas de brilho solar (Bahel; Bakhsh; Srinivasan, 1987; Almorox; Hontorio, 2004; Bakirci, 2009; Yohanna; Itodo; Umogbai, 2011; Marwal *et al.*, 2012; Srivastava; Pandey, 2013), temperatura do ar (Dos Santos *et al.*, 2014; Yacef *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2018; Sgarbossa; Virgens Filho, 2020), umidade relativa (Yang; Koike, 2002; Adaramola, 2012), precipitação (Liu; Scott, 2001), e nebulosidade (Badescu; Dumitrescu, 2013).

Devido à ampla disponibilidade de dados de horas de brilho solar, ao desempenho confiável e à facilidade de aplicação, os modelos empíricos baseados nessa variável são amplamente empregados (Das; Park; Park, 2015; Liu *et al.*, 2009; Paulescu *et al.*, 2016; Teke; Yildirim, 2014; Zhao; Zeng; Han, 2013). O primeiro modelo sugerido a partir das horas de brilho solar foi proposto por Angstrom (1924), apresentando uma equação linear que correlacionava a razão da irradiação solar global (Hg) para a irradiação solar global em um dia de céu completamente aberto (Hc) com a razão das horas de brilho solar (n) para o fotoperíodo (N).

No entanto, obter dados de Hc era um obstáculo e para superar essa questão, Prescott (1940) propôs substituir Hc pela irradiação solar extraterrestre (He) e estabelecer uma correlação entre o índice de transmissividade atmosférica (Kt, razão de Hg para He) e a razão de insolação (S, razão de n para N). Esse ajuste na equação original resultou na criação da equação conhecida como Angstrom-Prescott (A-P):

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

Na equação, os coeficientes a e b são determinados por ajuste de um modelo de regressão linear simples, podendo apresentar variações significativas conforme a localização, devido às mudanças locais e sazonais específicas de cada região (Almorox; Hontoria, 2004). Na literatura especializada, encontram-se diversos valores para esses coeficientes, provenientes de diferentes regiões do mundo. Uma vez que esses coeficientes são conhecidos, eles podem ser aplicados a outras localidades que estejam situadas na mesma área e possuam características climatológicas semelhantes àquelas do local de origem dos dados (Iqbal, 1983; Varejão-Silva, 2006).

Com base na equação A-P, Luhanga e Andriga (1990) ajustaram os coeficientes a e b para estimar Hg em Gaborone, Botsuana. Estudos semelhantes foram conduzidos por Raja e Twidell (1990) em 37 localidades do Paquistão, por Veeran e Kumar (1993) em Madras e Kodaikanal, Índia, por Akpabio e Etuk (2003) em Onne, Nigéria, por Carvalho *et al.* (2010) em Seropédica, Brasil, por Yohanna, Itodo e Umogbai (2011) em Makurdi, Nigéria, por Srivastava e Pandey (2013) para 7 localidades na Índia, por Belúcio *et al.* (2014) em Macapá, Brasil, e por Beruski, Pereira e Sentelhas (2015) em Ponta Grossa, Brasil.

O princípio de correlação do modelo A-P tem sido aplicado em vários estudos ao longo das décadas. Além das correlações lineares, foram propostas relações quadráticas, cúbicas, logarítmicas e exponenciais (Anis *et al.*, 2019; Despotovic *et al.*, 2015). As horas de brilho solar continuam sendo a variável independente comumente mais utilizada (Bayrakçi; Demircan; Keçebaş, 2018), podendo ser empregada de forma isolada ou em conjunto com uma ou mais variáveis, sejam elas climatológicas, meteorológicas ou geográficas.

Zhao, Zeng e Hang (2013) e Suthar *et al.* (2014) em seus estudos, apresentaram modelos para estimar Hg utilizando as horas de brilho solar e o índice de poluição do ar como variáveis independentes. Outros estudos também exploraram combinações das horas de brilho solar com diferentes variáveis. Muneer e Gul (2000) incluíram a cobertura de céu juntamente com as horas de brilho solar, enquanto Wu, Liu e Wang (2007) adicionaram a temperatura do ar. Por sua vez, Coulibaly e Quedraogo (2016) e Makade e Jamil (2018) consideraram incluir latitude e longitude como variáveis independentes adicionais.

2.3 Estimativas de irradiação solar difusa

De maneira semelhante às estimativas de irradiação solar global, modelos empíricos são comumente utilizados para estimar a irradiação solar difusa (H_d), devido à sua simplicidade e praticidade operacional (Nwokolo; Ogbulezie, 2018). O primeiro modelo sugerido a esse respeito, foi desenvolvido por Liu e Jordan (1960), tendo o objetivo de correlacionar a fração difusa (K_d , razão de H_d para H_g) com o índice de transmissividade atmosférica (K_t):

$$K_d = a + bK_t \quad (2)$$

Nas décadas subsequentes a esta pesquisa, diversos pesquisadores têm apresentado uma variedade significativa de modelos e correlações para estimar H_d (Song *et al.*, 2020, Tahir *et al.*, 2021). Khorasanizadeh e Mohammadi (2016) relataram 56 modelos provenientes de mais de 70 estudos conduzidos em diversas regiões do mundo e em várias escalas de tempo. A análise destacou que, até o momento, os modelos propostos podem ser classificados em duas categorias principais, com base em como correlacionam K_d ou o coeficiente difuso (K_{td} , razão de H_d para H_e) com diferentes variáveis independentes, dividindo cada categoria em 4 subcategorias. Ou seja, modelos baseados em K_t , modelos baseados em S , modelos que consideram tanto K_t quanto S , e modelos que incorporam múltiplas variáveis independentes.

Os modelos de múltiplas variáveis independentes utilizam uma variedade de entradas, abrangendo variáveis meteorológicas, astronômicas, geográficas e geométricas, tais como K_t , S , temperatura do ar (mínima, máxima ou média), umidade relativa, nebulosidade, vapor atmosférico, precipitação, declinação solar, latitude e ângulos solares. Além disso, as funções comumente empregadas para estimar H_d incluem polinômios de grau 1 a grau 4, bem como funções logarítmicas e exponenciais (Khorasanizadeh; Mohammadi, 2016; Nwokolo; Ogbulezie, 2018; Song *et al.*, 2020).

A variável K_t tem sido considerada um elemento determinante na estimativa de H_d (Khorasanizadeh; Mohammadi; Goudarzi, 2016). Lam e Li (1996) desenvolveram modelos anuais e sazonais baseados em K_t para Hong Kong, China. Estudos semelhantes, com modelos baseados em K_t , foram realizados por Erbs, Klein e Duffie (1982) para quatro locais nos EUA, por Spencer (1982) em cinco locais na Austrália, por Oliveira *et al.* (2002) em São Paulo, Brasil, por Marques Filho *et al.* (2016) no Rio de Janeiro, Brasil, por Souza *et al.* (2023) em Sinop, Brasil.

A variável S possui uma influência direta sobre H_d e também tem sido considerada em sua estimativa (Khorasanizadeh; Mohammadi, 2016). Os resultados de Bashahu (2003) demonstraram que o uso de S proporcionou maior precisão em comparação com o K_t , em Dacar, Senegal. De maneira semelhante, Sabzpooshani e Mohammadi (2014) concluíram que S é uma variável mais importante do que K_t para estimar H_d em Isfahã, Irã. Além disso, Bailek *et al.* (2018) introduziram um modelo

baseado em S com polinômio de grau 2, aplicável em qualquer local no Saara da Argélia.

Bakirci (2015) desenvolveu 15 modelos para estimar H_d em oito cidades típicas da Turquia. Seus resultados indicaram que os modelos apresentaram maior precisão ao considerar tanto K_t quanto S como variáveis independentes, em comparação com modelos que utilizavam apenas uma das duas variáveis como entrada. Esse padrão também foi observado nos estudos de Trabea (1999) em 8 localidades do Egito, de Jiang (2009a) em Pequim, China, de Jiang (2009b) em 13 cidades da China, e de Khorasanizadeh, Mohammadi e Mostafaeipour (2014) em Tabas, Irã.

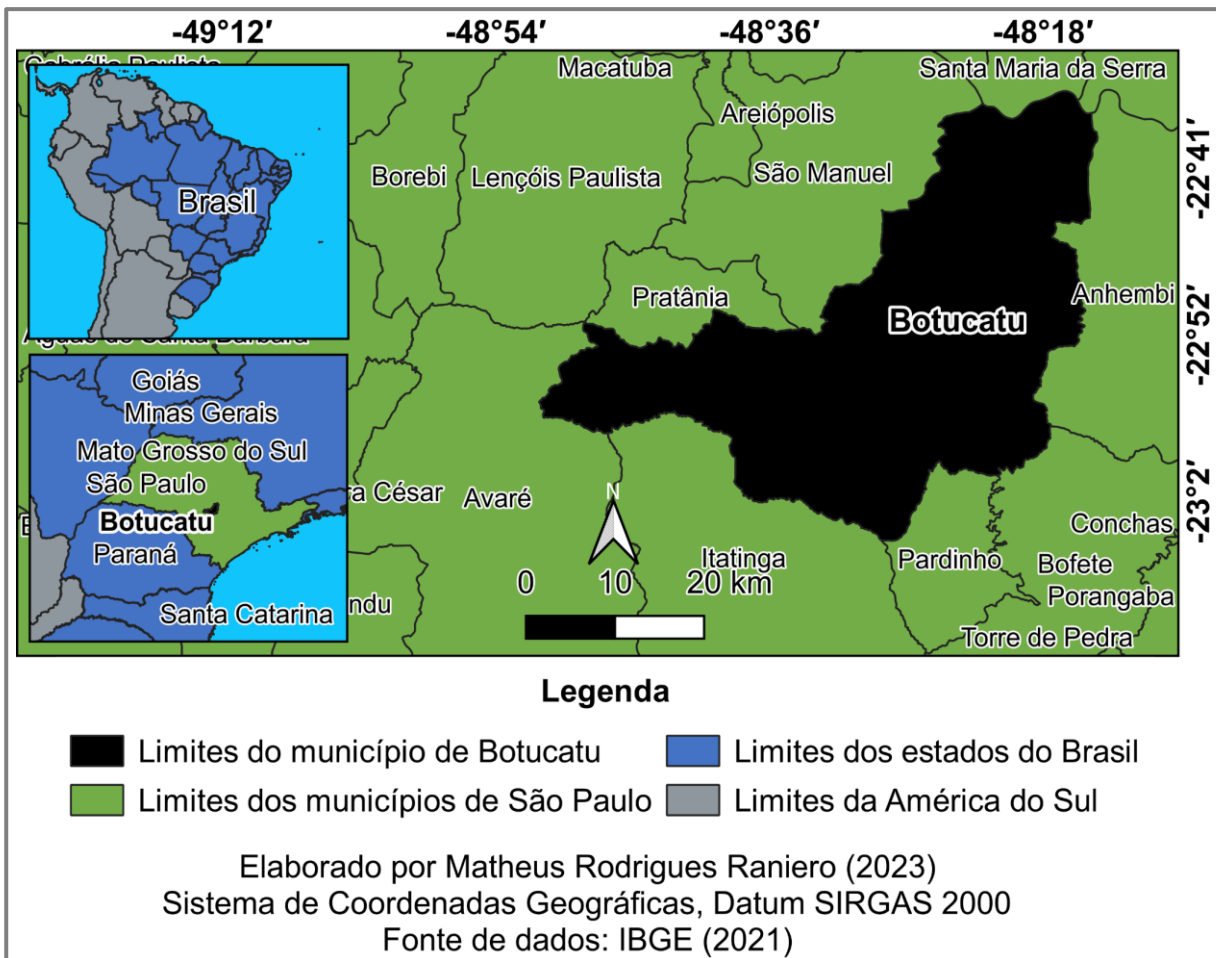
Estudos realizados por Janjai, Praditwong e Moonin (2011) em Bangkok, Tailândia, Li *et al.* (2011) em Cantão, China, Karakoti, Das e Singh (2012) em várias localidades na Índia, e Li *et al.* (2012) em 17 localidades na China demonstraram que incluir as variáveis temperatura média do ar e umidade relativa, pode aprimorar a precisão dos modelos. Além disso, os estudos de Gopinathan e Soler (1995) para 40 localidades distribuídas entre 60° N e 36° S de latitude, e Gopinathan e Soler (1996) para 17 localidades na França, Bélgica, Reino Unido, Portugal, Itália e Grécia, obtiveram melhores resultados ao incorporar K_t , S e a declinação solar como variáveis independentes em seus modelos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localidade e clima

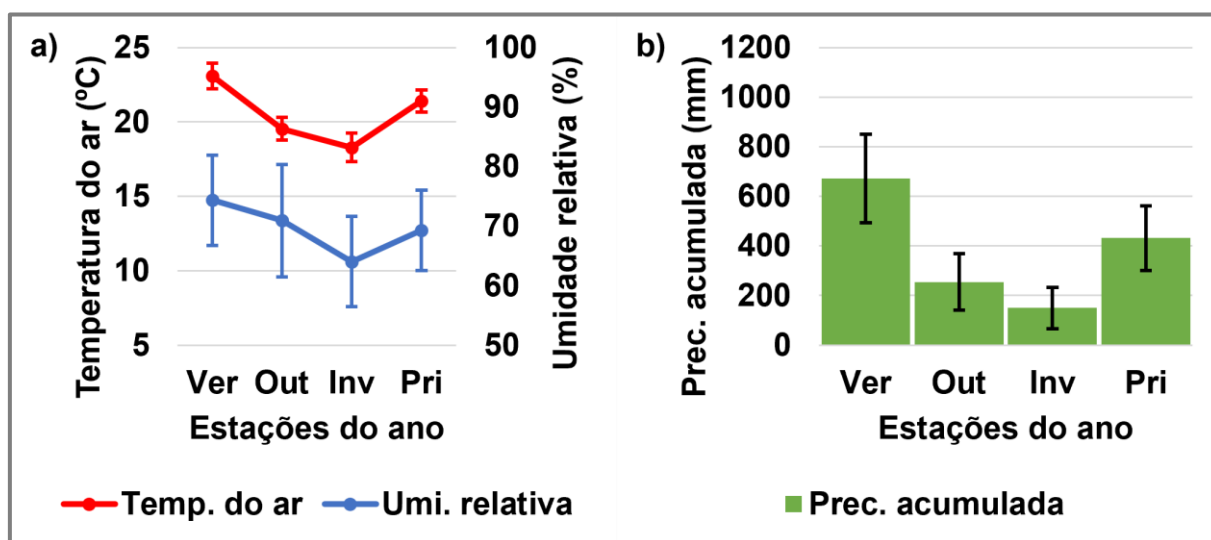
O estudo foi conduzido no Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (Agromet), localizado no departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp) de Botucatu. O município de Botucatu encontra-se na região centro-sul do estado, a 235 km da capital estadual, São Paulo. Ocupando uma área de 1.482,64 km², com uma população estimada de 145.155 habitantes em 2022. Suas coordenadas geográficas são 22° 53' 09" de latitude sul e 48° 26' 42" de longitude oeste (Figura 1). A cidade possui uma altitude relativamente elevada, variando de 756 a 920 metros acima do nível do mar (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2023; Prefeitura de Botucatu, 2023).

Figura 1 - Localização do município de Botucatu, São Paulo, Brasil



Com base nos critérios climáticos de Köppen, é possível classificar o clima de Botucatu como Aw, caracterizado como savana tropical (Franco *et al.*, 2023). A série histórica de medidas climáticas coletadas pela Estação Meteorológica Lageado (EML), aponta a estação do verão como a mais quente, com uma temperatura média do ar de 23,10 °C, enquanto o inverno é a estação mais fria, com média de 18,29 °C. Em relação à umidade relativa média do ar, o verão apresenta maior umidade, com 74,30%, enquanto o inverno possui a menor umidade, com média de 64,05% (Figura 2a). Quanto aos valores de precipitação acumulada, o verão registra média de 671,94 mm, enquanto o inverno apresenta média de 149,94 mm (Figura 2b).

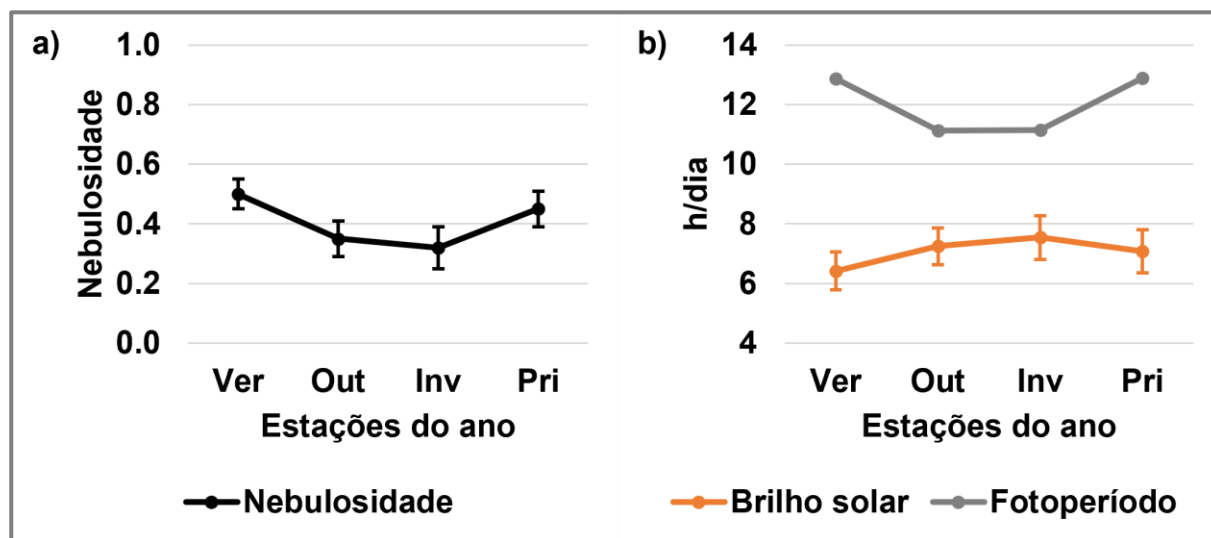
Figura 2 - Série histórica de medidas climáticas do município de Botucatu: a) temperatura e umidade relativa do ar; b) precipitação acumulada



Fonte: Estação Meteorológica Lageado - EML (2023).

Devido à maior precipitação acumulada, o verão é a estação com maior nebulosidade, com índice médio de 0,50, enquanto o inverno apresenta o menor índice, com média de 0,32 (Figura 3a). Embora o valor médio do fotoperíodo seja mais baixo no inverno, com 11,14 h/dia, é durante essa estação que ocorre o maior valor médio de brilho solar, com 7,54 h/dia. O verão tem a menor média de brilho solar, com 6,42 h/dia, em razão da maior nebulosidade, apesar de apresentar um valor médio de fotoperíodo mais elevado, de 12,88 h/dia (Figura 3b).

Figura 3 - Série histórica de medidas climáticas do município de Botucatu: a) nebulosidade; b) brilho solar e fotoperíodo



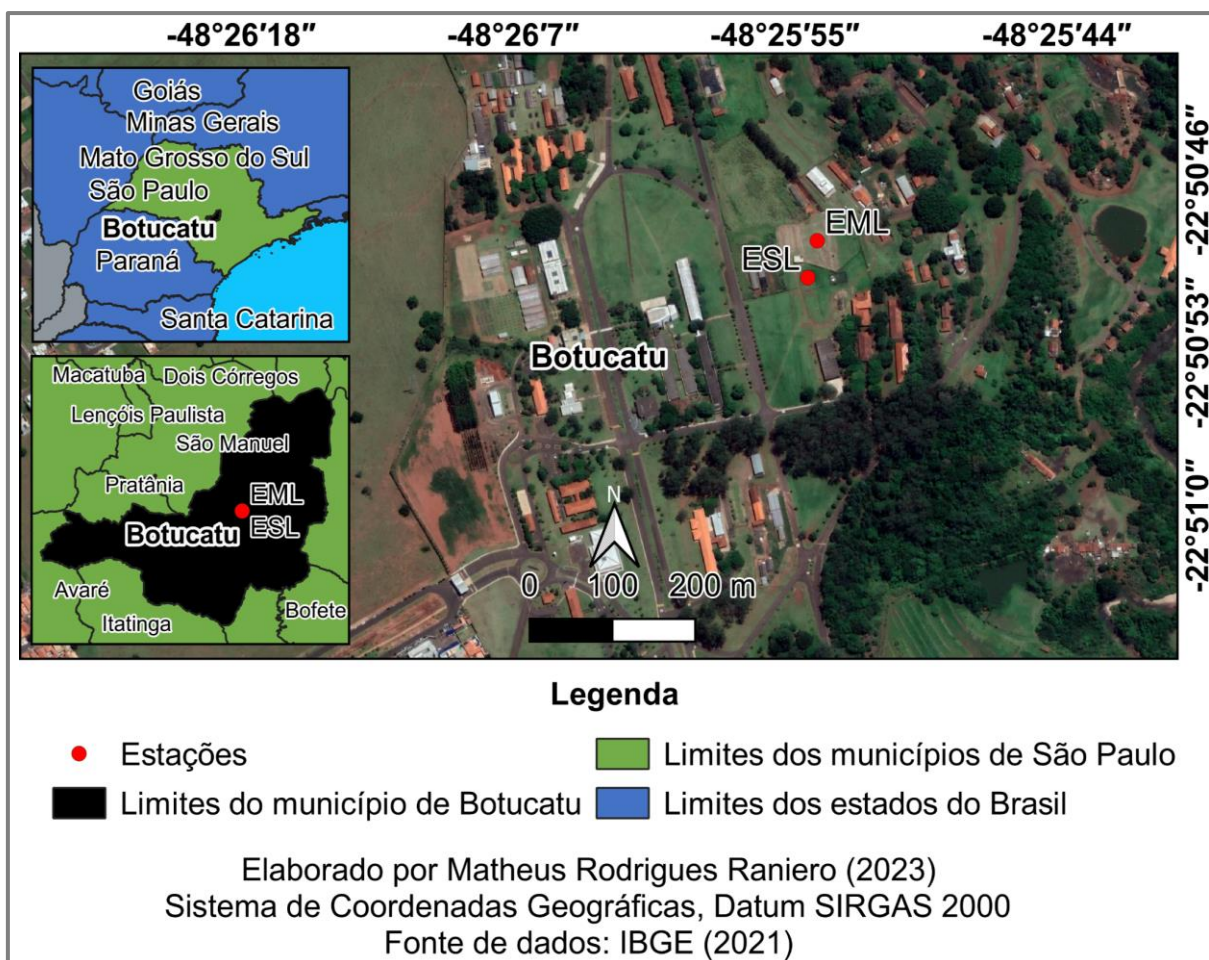
Fonte: EML (2023).

Essas informações se baseiam em valores médios medidos entre os anos de 1971 e 2015, para a temperatura do ar, precipitação acumulada, nebulosidade, fotoperíodo e horas de brilho solar. Para a umidade relativa do ar, considera-se os valores médios entre os anos de 1983 e 2015.

3.2 Medidas e instrumentação

Os cartões de papel contendo medidas de brilho solar, também conhecidos como heliogramas, foram cedidos pela EML, localizada nas coordenadas geográficas $22^{\circ} 50' 48,124''$ de latitude sul e $48^{\circ} 25' 53,821''$ de longitude oeste, a 786 metros de altitude. As medidas de irradiância solar foram cedidas pela Estação Solarimétrica Lageado (ESL), localizada nas coordenadas geográficas $22^{\circ} 50' 49,661''$ de latitude sul e $48^{\circ} 25' 54,221''$ de longitude oeste, a 786 metros de altitude. Ambas as estações se encontram no departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agrônômicas (Unesp) de Botucatu (Figura 4).

Figura 4 - Localização da EML e ESL



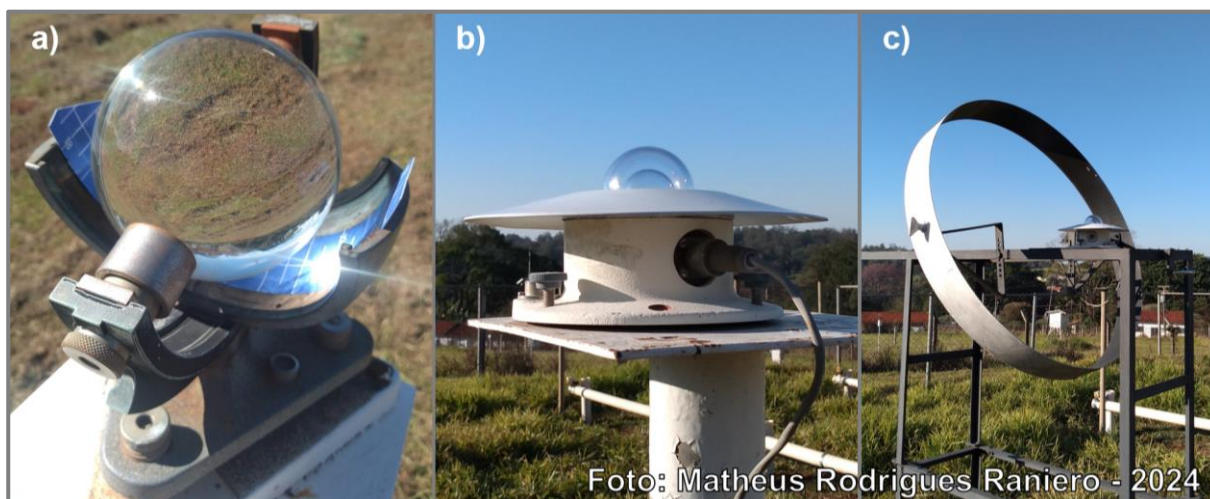
Durante os anos de 2015 e 2016, foram realizadas medições simultâneas pela estação convencional e a estação automática da fazenda Lageado. Nesse período de medições, a estação convencional recebeu maior atenção para garantir a qualidade do processo de análise e comparação das medidas convencionais e automáticas. O que possibilitou transferir a confiança dos instrumentos convencionais para os sensores eletrônicos da estação automática e unificar as séries de dados (Franco *et al.*, 2022). No entanto, somente em 2015, a estação convencional realizou medições de horas de brilho solar. Por esse motivo, o período de 01/01/2015 a 31/12/2015 foi selecionado para o desenvolvimento dos modelos empíricos deste estudo.

A Figura 5a apresenta o Heliógrafo de Campbell-Stokes, responsável por registrar as horas de brilho solar em heliogramas. A irradiância solar global em superfície horizontal (I_g) foi registrada a partir de um piranômetro *Eppley*, modelo *Precision Spectral Pyranometer* - PSP (Figura 5b). A irradiância solar difusa em superfície horizontal (I_d) foi obtida a partir de um piranômetro *Eppley* PSP com auxílio

do método de sombreamento MEO, proposto por Oliveira, Machado e Escobedo (2002), utilizando um anel de sombreamento com 40 centímetros de raio e 10 centímetros de largura (Figura 5c).

Posteriormente, essas medidas de I_d foram corrigidas pelos fatores isotrópico e anisotrópico. O fator isotrópico corrige uma estrita parcela de medidas de I_d que também são obstruídas pelo anel de sombreamento proposto, devido a sua construção. Enquanto o fator anisotrópico faz a correção dos efeitos causados pelos componentes atmosféricos, variando de acordo com a cobertura de céu (Calça *et al.*, 2019; Dal Pai *et al.*, 2016; Oliveira; Machado; Escobedo, 2002).

Figura 5 - Instrumentos de medição: a) horas de brilho solar; b) irradiância solar global; c) irradiância solar difusa



Além disso, um *datalogger* CR3000 da *Campbell Scientific* foi utilizado para monitorar e armazenar as medidas de irradiância solar. O sistema foi programado para realizar leituras a cada 5 segundos e armazenar médias a cada intervalo de 5 minutos, expressas em W/m^2 , resultando em 288 médias diárias. Posteriormente, esses valores médios em W/m^2 foram integrados para a partição de tempo diária, em $MJ/m^2/dia$. Todos os instrumentos foram cuidadosamente mantidos e verificados diariamente pelos observadores responsáveis, seguindo as diretrizes de instrumentação e métodos de observação estabelecidos pela OMM (WMO, 2021).

A Figura 6 apresenta a evolução temporal e o boxplot das medidas de irradiação solar (H_g e H_d) e das horas de brilho solar (n). A irradiação solar extraterrestre projetada em uma superfície horizontal (H_e), em $MJ/m^2/dia$, e o

fotoperíodo (N), em h/dia, foram calculados utilizando a Equação (3) e a Equação (4), respectivamente (Iqbal, 1983; Varejão-Silva, 2006).

$$H_e = \frac{37,61}{E_0^2} [w_s^* \sin(\Phi) \sin(\delta) + \cos(\Phi) \cos(\delta) \sin(w_s)] \quad (3)$$

$$N = 2w_s/15 \quad (4)$$

sendo que E_0 representa o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, o ângulo diário horário em radianos é representado por w_s^* , a latitude da localidade em graus por Φ , a declinação solar em graus por δ e o ângulo diário horário em graus por w_s .

$$E_0 = 1 - 0,0009464 \sin(F) - 0,01671 \cos(F) - 0,0001489 \cos(2F) - 0,00002917 \sin(3F) - 0,0003438 \cos(4F) \quad (5)$$

$$w_s^* = w_s \pi / 180 \quad (6)$$

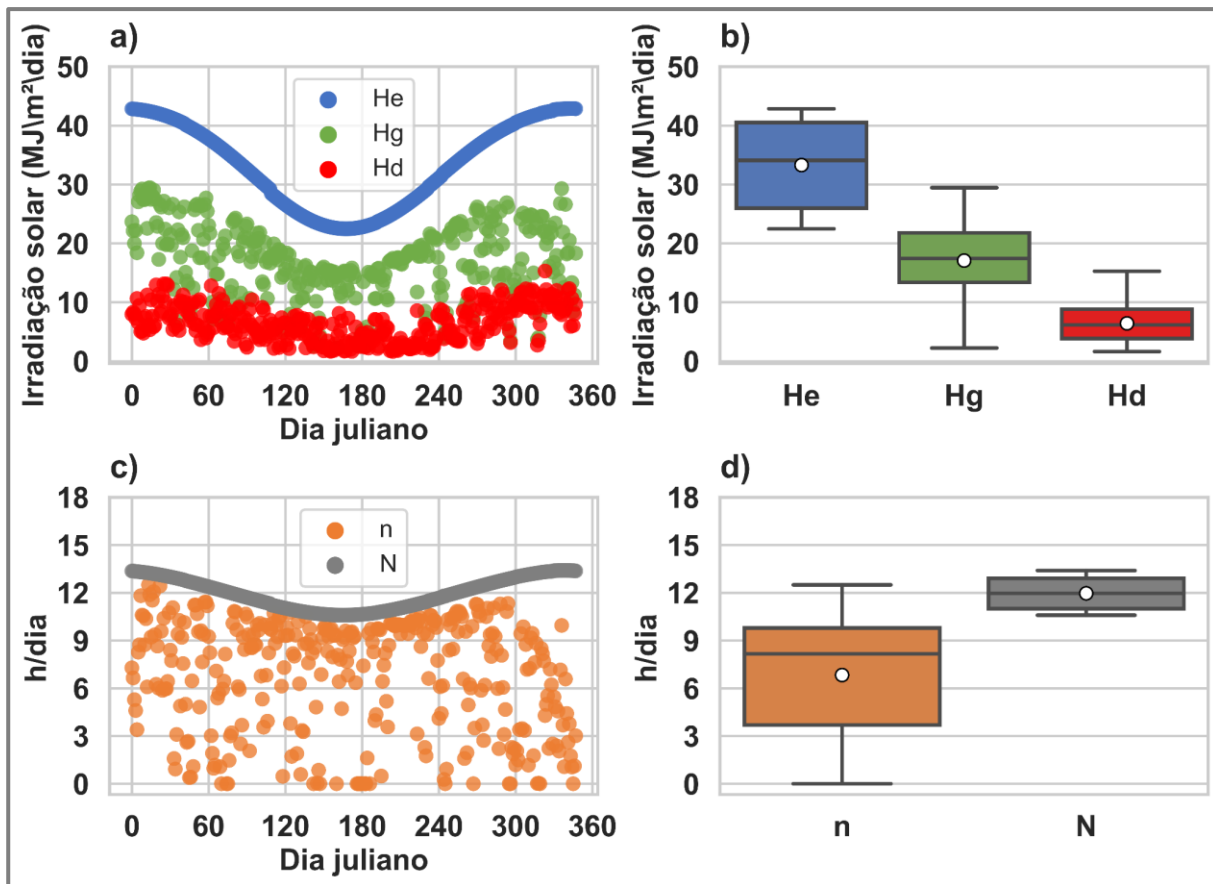
$$\delta = 0,3964 + 3,631 \sin(F) - 22,97 \cos(F) + 0,03838 \sin(2F) - 0,3885 \cos(2F) + 0,07659 \sin(3F) - 0,01587 \cos(3F) - 0,01021 \cos(4F) \quad (7)$$

$$w_s = \text{acos}[-\tan(\Phi) \tan(\delta)] \quad (8)$$

$$F = 360^\circ D_j / 365 \quad (9)$$

enquanto F representa o ângulo diário e D_j é o dia decorrido do ano, variando de 1 a 365.

Figura 6 - Evolução temporal e boxplot das medidas



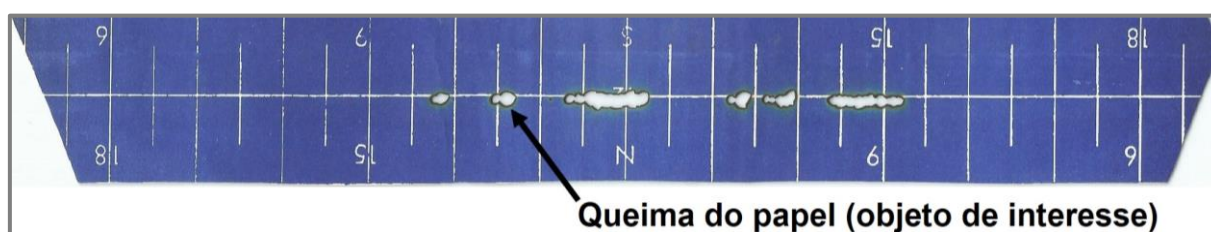
3.2.1 Processamento automatizado de horas de brilho solar

O programa intitulado de SunCounter foi desenvolvido para coletar e gerenciar dados de brilho solar registrados pelo heliógrafo da estação convencional da fazenda Lageado. Por meio da aplicação de técnicas avançadas de Processamento Digital de Imagens (PDI), o programa é capaz de extrair dados de brilho solar contidos em imagens digitalizadas de heliogramas, armazenando essas informações e as imagens correspondentes em um banco de dados eletrônico. O uso desse programa possibilitou padronizar, automatizar e agilizar a rotina operacional de coleta de dados de brilho solar (Raniero *et al.*, 2020).

Sendo assim, os heliogramas contendo medidas de brilho solar foram digitalizados e suas imagens digitais foram processadas pelo programa SunCounter. O método automatizado do programa compreende duas etapas principais: o pré-processamento das imagens digitalizadas e a contabilização. Na etapa de pré-

processamento, é realizada a extração dos objetos de interesse da imagem, sendo a queima do papel presente nos heliogramas, conforme ilustra a Figura 7. Já na etapa de contabilização, a imagem resultante do pré-processamento é dividida em regiões que representam as horas do dia, permitindo contabilizar o brilho solar ao longo das horas. Ao final dessa etapa, é realizada a somatória de cada hora, o que fornece o brilho solar diário (Raniero, 2020).

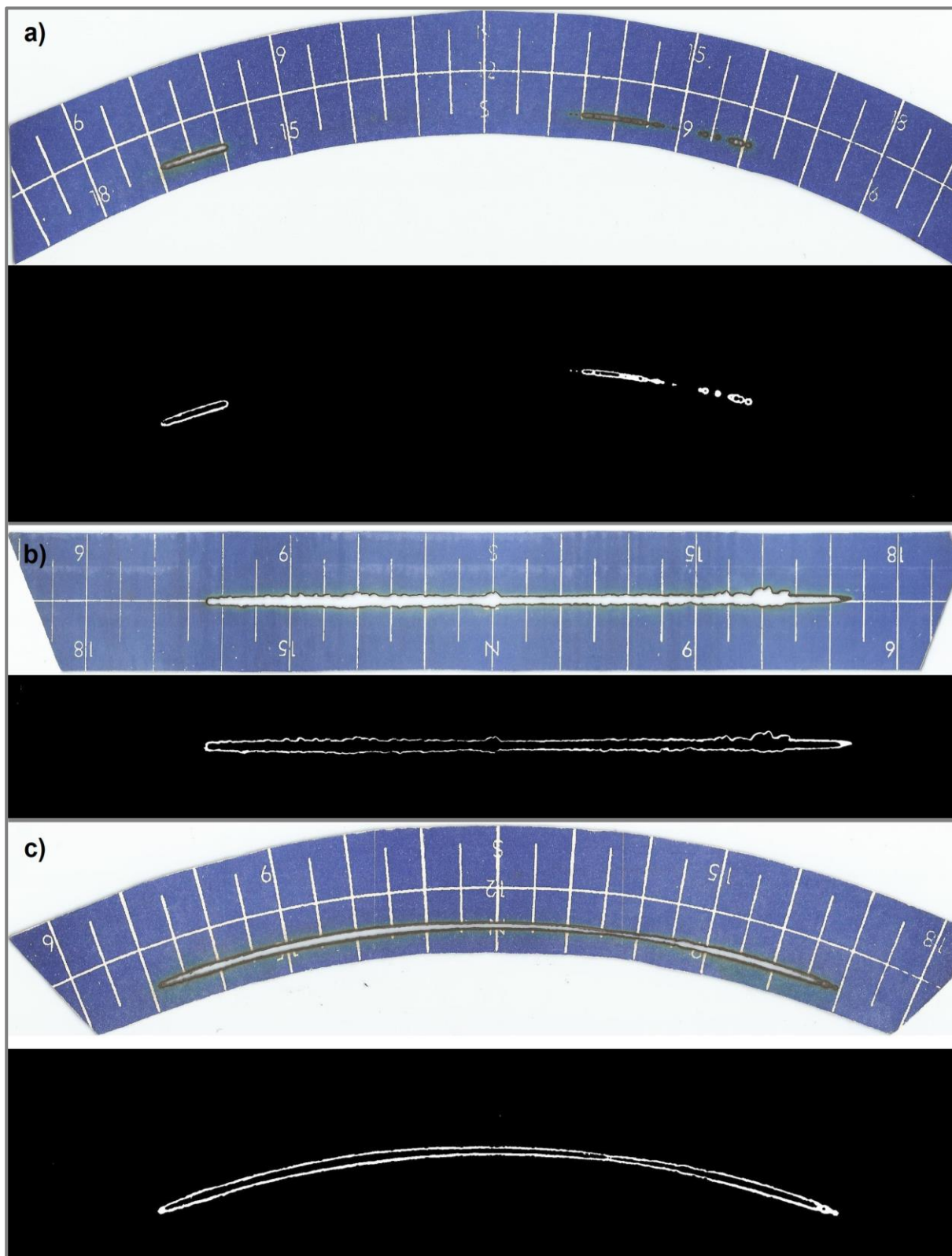
Figura 7 - Heliograma com dados de brilho solar



Fonte: Raniero (2020).

Durante a etapa de pré-processamento foram empregadas as técnicas de PDI: filtragem média, limiarização e abertura, para melhor evidenciar a queima do papel e garantir sua identificação na etapa de contabilização. A técnica de filtragem média foi utilizada para suavizar a imagem e remover variações abruptas de pixels, que podem ser causadas por ruídos. A técnica de limiarização foi usada para extrair os objetos de interesse da imagem, ou seja, a queima do papel. Por fim, a técnica de abertura foi empregada para garantir que as imagens a serem contabilizadas estejam sem ruídos persistentes (Gonzalez; Woods, 2008; Raniero, 2020; Pedrini; Schwartz, 2008). A Figura 8 exibe as imagens originais dos heliogramas, seguidas da extração do objeto de interesse, a queima do papel representada pelos *pixels* brancos na imagem resultante da etapa de pré-processamento.

Figura 8 - Extração do objeto de interesse de heliogramas: a) curvilíneo verão; b) retilíneo outono/primavera; c) curvilíneo inverno

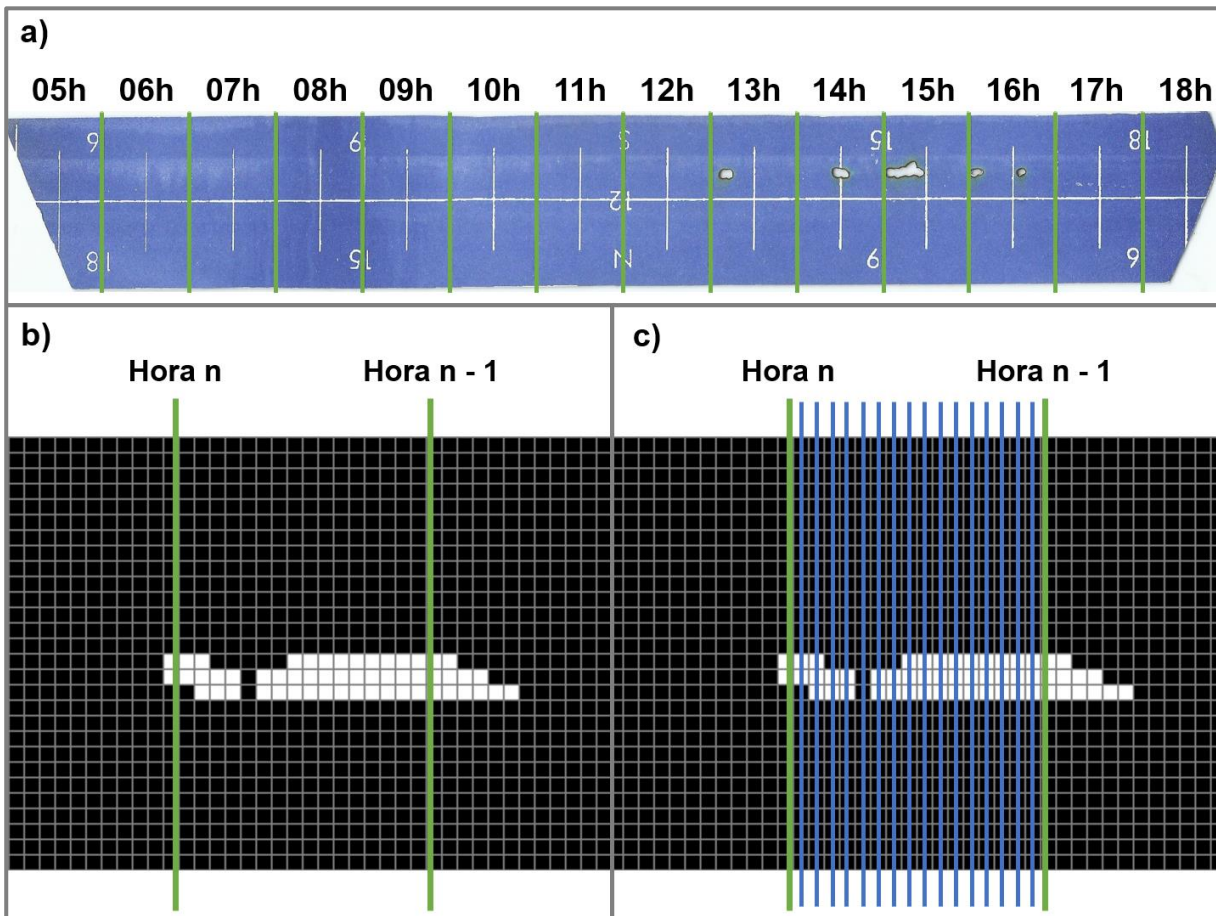


Fonte: Adaptado de Raniero (2020).

A etapa de contabilização foi dividida em duas partes distintas: na leitura de heliogramas retilíneos e na leitura de heliogramas curvilíneos. Em heliogramas retilíneos, que são utilizados nas estações do ano outono e primavera, quando o papel é queimado, é criada uma trajetória reta ao longo das horas. Desta forma, a contabilização em heliogramas retilíneos é realizada por meio de colunas, buscando por evidências de queima do papel (*pixels* brancos). Em heliogramas curvilíneos, que são utilizados nas estações do ano verão e inverno, a queima do papel reproduz uma trajetória curvilínea ao longo das horas. Sendo assim, a contabilização de heliogramas curvilíneos é realizada por meio de retas diagonais (Raniero, 2020).

A delimitação horária para os heliogramas retilíneos é apresentada na Figura 9a. A partir dessa delimitação, é possível determinar o número de colunas que correspondem a cada intervalo de hora do heliograma, como exemplificado na Figura 9b, em um intervalo de hora específico. O número de colunas indica a quantidade de verificações de queima do papel que serão realizadas dentro desse intervalo (Figura 9c). Esse processo é repetido para todas as horas do heliograma e os resultados são armazenados em um vetor. Após a contabilização de todas as horas, o total diário é obtido somando-se os valores armazenados no vetor (Raniero, 2020).

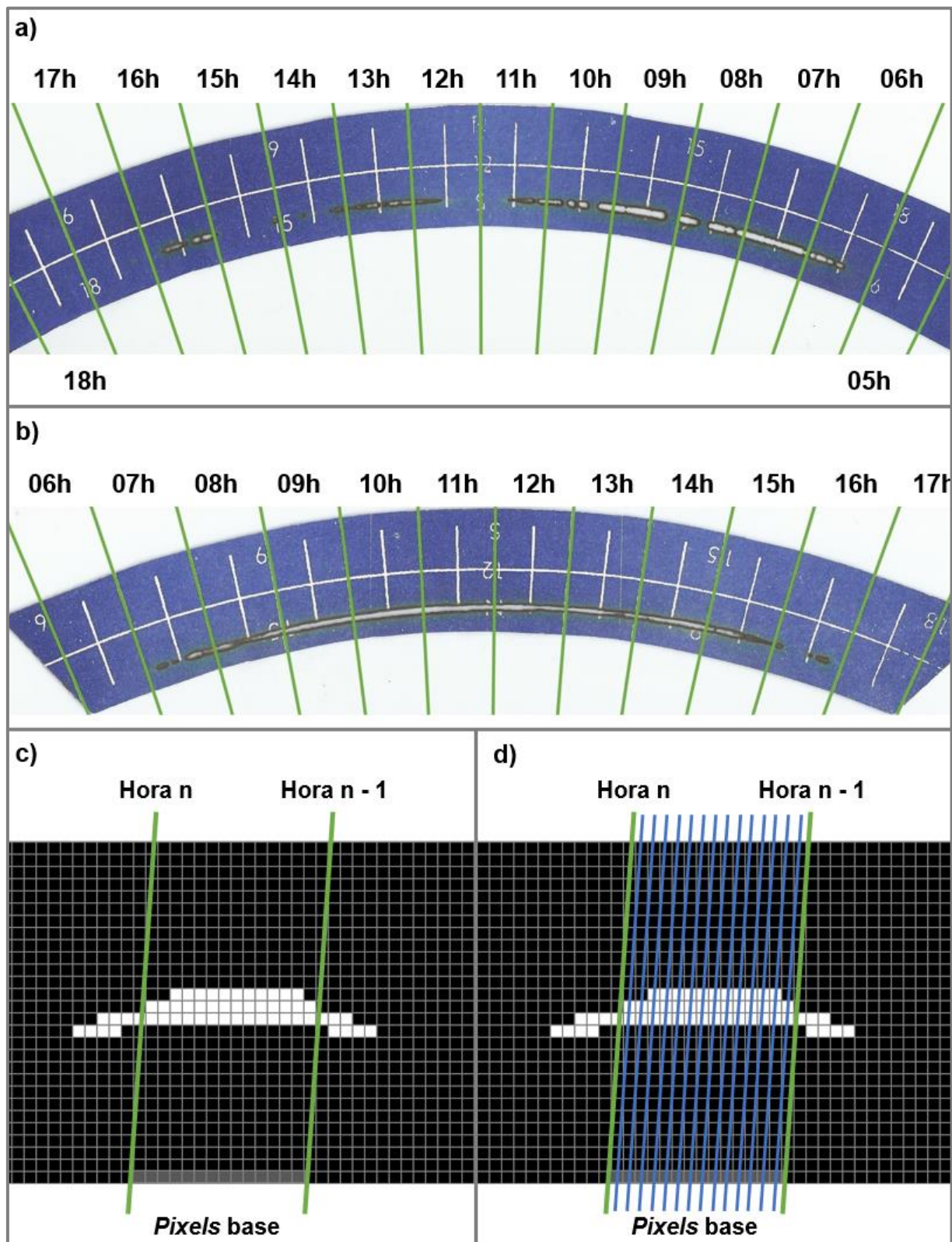
Figura 9 - Contabilização de heliogramas retilíneos: a) delimitações horárias; b) exemplo de um intervalo de hora; c) verificações no intervalo de hora



Fonte: Adaptado de Raniero (2020).

As delimitações horárias para os heliogramas curvilíneos verão e inverno são apresentadas na Figura 10a e Figura 10b, respectivamente. Por meio dessas delimitações, é possível obter a variação angular e o número de *pixels* base de cada intervalo de hora do heliograma, como exemplificado na Figura 10c, em um intervalo de hora específico. A quantidade de *pixels* base em um intervalo determina o número de retas diagonais e de verificações realizadas nesse intervalo. Para cada *pixel* base de um intervalo, é calculada uma equação da reta com base nas características angulares da hora, descrevendo uma trajetória diagonal (Figura 10d). Dessa forma, as verificações de queima do papel são realizadas nos *pixels* que são contemplados pela equação da reta. Após a contabilização ser repetida para todas as horas do heliograma, é possível obter o total diário de brilho solar (Raniero, 2020).

Figura 10 - Contabilização de heliogramas curvilíneos: a) delimitações horárias de curvilíneos verão; b) delimitações horárias de curvilíneos inverno; c) exemplo de um intervalo de hora; d) verificações no intervalo de hora



Fonte: Adaptado de Raniero (2020).

3.2.2 Controle de qualidade das medidas de irradiância solar

As medidas de irradiância solar, médias de 5 minutos em W/m^2 , passaram por um controle de qualidade para identificar valores considerados impossíveis, como aqueles abaixo ou acima dos limites físicos permitidos. Esses valores, que foram interpretados como erros de leitura, foram excluídos do estudo. Em bases de dados sub-horárias de irradiância solar, a aquisição de medidas ocorre com maior frequência, resultando em um grande volume de dados. A adoção desse procedimento torna-se essencial (Calça *et al.*, 2019). Os resultados do controle de qualidade estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado do controle de qualidade

Medidas	Irradiância solar	
	Ig	Id
Quantidade de medidas pré-procedimento	51055	51080
Quantidade de medidas eliminadas	24	3553
Percentual de medidas eliminadas	0,047%	6,956%
Quantidade de medidas pós-procedimento	51031	47547

Os critérios físicos adotados nesse controle de qualidade são apresentados na Equação (10), para a irradiância solar global (I_g), e na Equação (11), para a irradiância solar difusa (I_d).

$$0 \text{ W/m}^2 \leq I_g \leq I_e \quad (10)$$

$$0 \text{ W/m}^2 \leq I_d \leq I_g \quad (11)$$

sendo que I_e corresponde à irradiância solar extraterrestre projetada em uma superfície horizontal, em W/m^2 :

$$I_e = I_{sc} (1/E_0^2) \cos\Theta_z \quad (12)$$

em que I_{sc} representa a constante solar, cujo valor é de $1361,1 \text{ W/m}^2$ (Gueymard, 2018), E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, dado pela Equação (5) e $\cos \Theta_z$ é o cosseno do ângulo zenital:

$$\cos \Theta_z = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \omega \quad (13)$$

$$\omega = (12 - hs)15 \quad (14)$$

tal que Φ é a latitude da localidade em graus, δ é a declinação solar em graus, apresentada na Equação (7), ω representa o ângulo horário e hs é a hora e décimo de hora (Iqbal, 1983; Varejão-Silva, 2006).

3.3 Modelos empíricos do estudo

Com base na literatura atual, foram selecionados seis tipos de modelos para gerar as estimativas de irradiação solar e horas de brilho solar. Estes modelos incluem funções polinomiais de grau 1 a grau 4, e abordagens logarítmicas e exponenciais. Além disso, para cada modelo empírico proposto, os dados foram reamostrados aleatoriamente e divididos em dois conjuntos. O primeiro conjunto, composto por 75% dos dados, foi usado para treinar o modelo empírico e gerar os coeficientes, bem como o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2 , Equação 15), e o segundo subconjunto, que consistia em 25% dos dados, foi empregado para testar o desempenho do modelo treinado.

$$R_a^2 = 1 - \frac{(1-R^2)(n-1)}{n-K-1} \quad (15)$$

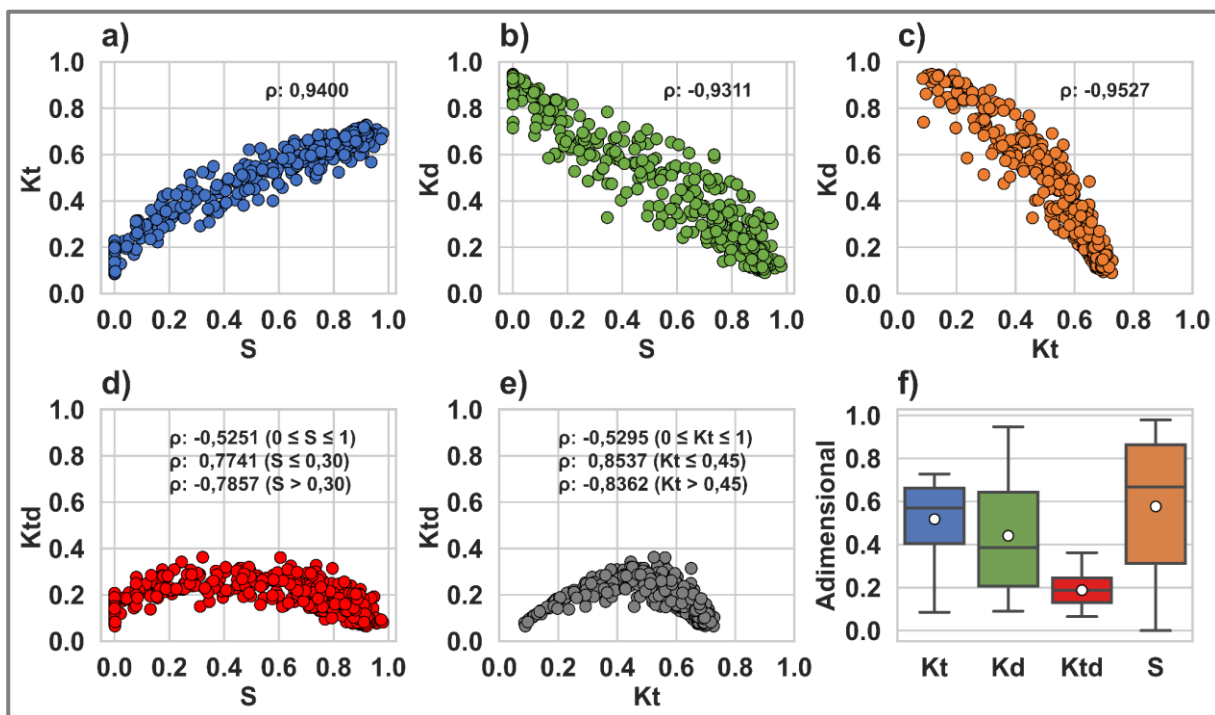
sendo que R^2 denota o coeficiente de determinação convencional, n é o número de amostras utilizadas e K representa a quantidade variáveis independente utilizadas no modelo empírico (Kumar Dash *et al.*, 2023).

A Figura 11 apresenta as correlações e o boxplot das variáveis do estudo. A relação entre K_t e S (Figura 11a) revela uma correlação significativa entre as variáveis, conforme indicado pelo coeficiente de correlação de Spearman (ρ). No

entanto, é notável que, para cada valor de S , há uma considerável variação nos valores de K_t . Isso sugere que, embora diferentes combinações de cobertura de céu possam levar ao mesmo valor de S , não se pode presumir o mesmo para K_t , especialmente em situações que S se aproxima de zero (Da Silva *et al.*, 2017).

Analisando a relação entre K_d com S e K_t (Figura 11b e Figura 11c), percebe-se que K_d diminui linearmente com o aumento de S e K_t . No caso da relação de K_{td} com S e K_t (Figura 11d e Figura 11e), nota-se um aumento de K_{td} à medida que S cresce até 0,30 e K_t atinge 0,45, sugerindo que, em condições de céu nublado, há uma presença nula ou mínima do componente direto. Entretanto, para valores de S acima de 0,30 e K_t superiores a 0,45, K_{td} começa a diminuir, indicando que o componente direto se torna mais proeminente à medida que a condição do céu se torna menos nublada (Lam; Li, 1996).

Figura 11 - Correlação e boxplot das variáveis



Nos modelos empíricos para estimar H_g , considerou-se a relação entre K_t e S , tal como o conceito da equação de Angstrom-Prescott. A Equação 16 mostra a expressão generalizada que representa os modelos empíricos de H_g , considerando K_t como apenas uma função de S . Os seis modelos empíricos considerados são representados pelas Equações 17 a 22.

$$\left(K_t = \frac{H_g}{H_e}\right) \approx f(S) \quad (16)$$

$$\mathbf{G4. KtxS:} K_t = a + b(S) + c(S)^2 + d(S)^3 + e(S)^4 \quad (17)$$

$$\mathbf{G3. KtxS:} K_t = a + b(S) + c(S)^2 + d(S)^3 \quad (18)$$

$$\mathbf{G2. KtxS:} K_t = a + b(S) + c(S)^2 \quad (19)$$

$$\mathbf{G1. KtxS:} K_t = a + b(S) \quad (20)$$

$$\mathbf{LG. KtxS:} K_t = a + b \ln(S + 1) \quad (21)$$

$$\mathbf{EX. KtxS:} K_t = a + b \exp(S) \quad (22)$$

Os modelos empíricos para estimar H_d foram baseados em K_d , uma vez que apresentam correlação superior com as variáveis S e K_t , em comparação com $K_t d$. Além disso, os modelos empíricos foram divididos em 3 categorias (Categoria I, II e III). Na Categoria I, considerou-se K_d como uma função de S (Equação 23), com modelos representados pelas Equações 24 a 29. Na Categoria II, K_d foi tratado como uma função de K_t (Equação 30), com modelos apresentados pelas Equações 31 a 36. Já na Categoria III, considerou-se K_d como uma função tanto de S quanto de K_t (Equação 37), com modelos representados pelas Equações 38 a 48.

$$\left(K_d = \frac{H_d}{H_g}\right) \approx f(S) \quad (23)$$

$$\mathbf{G4. KtxS:} K_d = a + b(S) + c(S)^2 + d(S)^3 + e(S)^4 \quad (24)$$

$$\mathbf{G3. KtxS:} K_d = a + b(S) + c(S)^2 + d(S)^3 \quad (25)$$

$$\mathbf{G2. KtxS:} K_d = a + b(S) + c(S)^2 \quad (26)$$

$$\mathbf{G1. KtxS:} K_d = a + b(S) \quad (27)$$

$$\mathbf{LG. KtxS:} K_d = a + b \ln(S + 1) \quad (28)$$

$$\mathbf{EX. KtxS:} K_d = a + b \exp(S) \quad (29)$$

$$\left(Kd = \frac{Hd}{Hg}\right) \approx f(Kt) \quad (30)$$

$$\mathbf{G4. KtxKt:} Kd = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(Kt)^3 + e(Kt)^4 \quad (31)$$

$$\mathbf{G3. KtxKt:} Kd = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(Kt)^3 \quad (32)$$

$$\mathbf{G2. KtxKt:} Kd = a + b(Kt) + c(Kt)^2 \quad (33)$$

$$\mathbf{G1. KtxKt:} Kd = a + b(Kt) \quad (34)$$

$$\mathbf{LG. KtxKt:} Kd = a + b \ln(Kt + 1) \quad (35)$$

$$\mathbf{EX. KtxKt:} Kd = a + b \exp(Kt) \quad (36)$$

$$\left(Kd = \frac{Hd}{Hg}\right) \approx f(Kt, S) \quad (37)$$

$$\mathbf{G4. KtxSxKt:} Kd = a + b(S) + c(S)^2 + d(S)^3 + e(S)^4 + f(Kt) \quad (38)$$

$$\mathbf{G3. KtxSxKt:} Kd = a + b(S) + c(S)^2 + d(S)^3 + e(Kt) \quad (39)$$

$$\mathbf{G2. KtxSxKt:} Kd = a + b(S) + c(S)^2 + d(Kt) \quad (40)$$

$$\mathbf{G1. KtxSxKt:} Kd = a + b(S) + c(Kt) \quad (41)$$

$$\mathbf{LG. KtxSxKt:} Kd = a + b \ln(S + 1) + c(Kt) \quad (42)$$

$$\mathbf{EX. KtxSxKt:} Kd = a + b \exp(S) + c(Kt) \quad (43)$$

$$\mathbf{G4. KtxKtxS:} Kd = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(Kt)^3 + e(Kt)^4 + f(S) \quad (44)$$

$$\mathbf{G3. KtxKtxS:} Kd = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(Kt)^3 + e(S) \quad (45)$$

$$\mathbf{G2. KtxKtxS:} Kd = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(S) \quad (46)$$

$$\mathbf{LG. KtxKtxS:} Kd = a + b \ln(Kt + 1) + c(S) \quad (47)$$

$$\mathbf{EX. KtxKtxS:} Kd = a + b \exp(Kt) + c(S) \quad (48)$$

Nos modelos empíricos para estimar n , foi adotada a relação inversa utilizada para gerar os modelos de irradiação solar, dividindo-os em duas categorias (Categoria I e II). Na Categoria I, considerou-se S como uma função de Kt (Equação 49), com modelos representados pelas Equações 50 a 55. Já na Categoria II, S foi tratado como uma função de Kd (Equação 56), com modelos apresentados pelas Equações 57 a 62.

$$\left(S = \frac{n}{N}\right) \approx f(Kt) \quad (49)$$

$$\mathbf{G4. SxKt:} S = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(Kt)^3 + e(Kt)^4 \quad (50)$$

$$\mathbf{G3. SxKt:} S = a + b(Kt) + c(Kt)^2 + d(Kt)^3 \quad (51)$$

$$\mathbf{G2. SxKt:} S = a + b(Kt) + c(Kt)^2 \quad (52)$$

$$\mathbf{G1. SxKt:} S = a + b(Kt) \quad (53)$$

$$\mathbf{LG. SxKt:} S = a + b \ln(Kt + 1) \quad (54)$$

$$\mathbf{EX. SxKt:} S = a + b \exp(Kt) \quad (55)$$

$$\left(S = \frac{n}{N}\right) \approx f(Kd) \quad (56)$$

$$\mathbf{G4. SxKd:} S = a + b(Kd) + c(Kd)^2 + d(Kd)^3 + e(Kd)^4 \quad (57)$$

$$\mathbf{G3. SxKd:} S = a + b(Kd) + c(Kd)^2 + d(Kd)^3 \quad (58)$$

$$\mathbf{G2. SxKd:} S = a + b(Kd) + c(Kd)^2 \quad (59)$$

$$\mathbf{G1. SxKd:} S = a + b(Kd) \quad (60)$$

$$\mathbf{LG. SxKd:} S = a + b \ln(Kd + 1) \quad (61)$$

$$\mathbf{EX. SxKd:} S = a + b \exp(Kd) \quad (62)$$

3.4 Indicadores estatísticos de desempenho

O desempenho dos modelos foi julgado por meio de indicadores estatísticos, aplicados em comparações entre as estimativas geradas e as medidas coletadas pelos instrumentos de medição. Foram utilizados os seguintes indicadores: *Mean Bias Error* (MBE), *Relative Mean Bias Error* (rMBE), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Relative Root Mean Square Error* (rRMSE) e Coeficiente de correlação (r). Valores próximos de 0 são desejáveis para os indicadores MBE, rMBE, RMSE e rRMSE, enquanto valores próximos de 1 são desejáveis para o indicador r . Além disso, a precisão de cada modelo pode ser classificada como excelente quando o rRMSE é inferior a 10%, boa entre 10% e 20%, baixa entre 20% e 30%, e ruim quando superior a 30% (Li *et al.*, 2013). As equações dos indicadores são apresentadas a seguir:

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (63)$$

$$\text{rMBE (\%)} = \frac{\text{MBE}}{\bar{Y}} \times 100 \quad (64)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (65)$$

$$\text{rRMSE (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Y}} \times 100 \quad (66)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}') (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \bar{Y}')^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (67)$$

tal que Y representa os dados de referência (as medidas coletadas pelos instrumentos de medição), Y' representa os dados para comparação (estimativas geradas pelos modelos empíricos), \bar{Y} é a média de Y , \bar{Y}' é a média de Y' e n representa o número de dados do teste de desempenho (Anis *et al.*, 2019; Rincón *et al.*, 2018; Da Silva *et al.*, 2017).

3.4.1 Indicador de desempenho global

Para determinar os modelos empíricos com melhor desempenho, empregou-se o Indicador de Desempenho Global (IDG). O IDG é uma ferramenta robusta que integra os resultados individuais dos indicadores, permitindo classificar o desempenho dos modelos por meio de um único valor. Ou seja, um modelo é classificado em primeiro lugar quando alcança o IDG mais elevado, e os modelos subsequentes são organizados e classificados de acordo com valores decrescentes de IDG (Despotovic *et al.*, 2015; Jamil; Siddiqui, 2018; Jamil; Siddiqui, 2017). O IDG, conforme definido na Equação (68), foi calculado considerando apenas os indicadores MBE, RMSE e r . Os indicadores r MBE e r RMSE não foram incluídos pois representam os valores relativos de MBE e RMSE, respectivamente.

$$IDG_i = \sum_{j=1}^3 a_j (\bar{y}_j - \tilde{y}_{ij}) \quad (68)$$

$$a_j = \begin{cases} -1, & \text{para o indicador } r \\ +1, & \text{para os outros indicadores} \end{cases} \quad (69)$$

tal que a_j é o fator de peso igual a -1 para o indicador r e 1 para o MBE e RMSE, \bar{y}_j representa a média dos valores escalonados do indicador j (Equação 70), \tilde{y}_{ij} é o valor escalonado do indicador j para o modelo i (Equação 71).

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^p \tilde{y}_{ij}}{p} \quad (70)$$

$$\tilde{y}_{ij} = \frac{(|y_{ij}| - |y_{\min_j}|)}{(|y_{\max_j}| - |y_{\min_j}|)} \quad (71)$$

em que p representa a quantidade de modelos considerados, y_{ij} é o valor do indicador j para o modelo i , y_{\min_j} representa o valor mínimo do indicador j e y_{\max_j} é o valor máximo do indicador j . Os indicadores estatísticos foram escalonados apenas para gerar o IDG, evitando a influência predominante de qualquer indicador específico, de modo que o valor mínimo do indicador escalonado seja 0 e o valor máximo seja 1 (Behar; Khellaf; Mohammedi, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, avaliou-se o desempenho dos modelos empíricos propostos e comparou-se os resultados obtidos com estudos semelhantes na literatura.

4.1 Modelos empíricos de irradiação solar global

Os modelos desenvolvidos a partir do conjunto de dados de treinamento para estimar H_g são descritos na Tabela 2 (Modelos G4.KtxS a EX.KtxS), enquanto os resíduos desses modelos são apresentados no Apêndice A. Observa-se na tabela, que os valores de R_a^2 se encontram na faixa de 0,8704 (modelo baseado na função exponencial) a 0,9292 (modelo de polinômio de grau 4). Valores em conformidade com as observações de Da Silva *et al.* (2017) em Botucatu, São Paulo, com valores de R^2 variando de 0,88 a 0,89.

Resultados aproximados foram encontrados por Medeiros, Silva e Bezerra (2017), em 4 cidades do Rio Grande do Norte, com R^2 variando de 0,80 a 0,90. Enquanto para outras regiões do Brasil, valores diversos foram observados. Em Ponta Grossa, Paraná, Beruski, Pereira e Sentelhas (2015) obtiveram elevados valores de R^2 , na faixa de 0,98 a 0,99. De Souza *et al.* (2016) em 3 cidades de Alagoas registraram R^2 de 0,46 a 0,85. Bexaira *et al.* (2018) em 13 cidades do Rio Grande do Sul apresentaram R^2 variando de 0,81 a 0,98. Da Silva *et al.* (2021) em Goiânia, Goiás, revelaram um R^2 de 0,86.

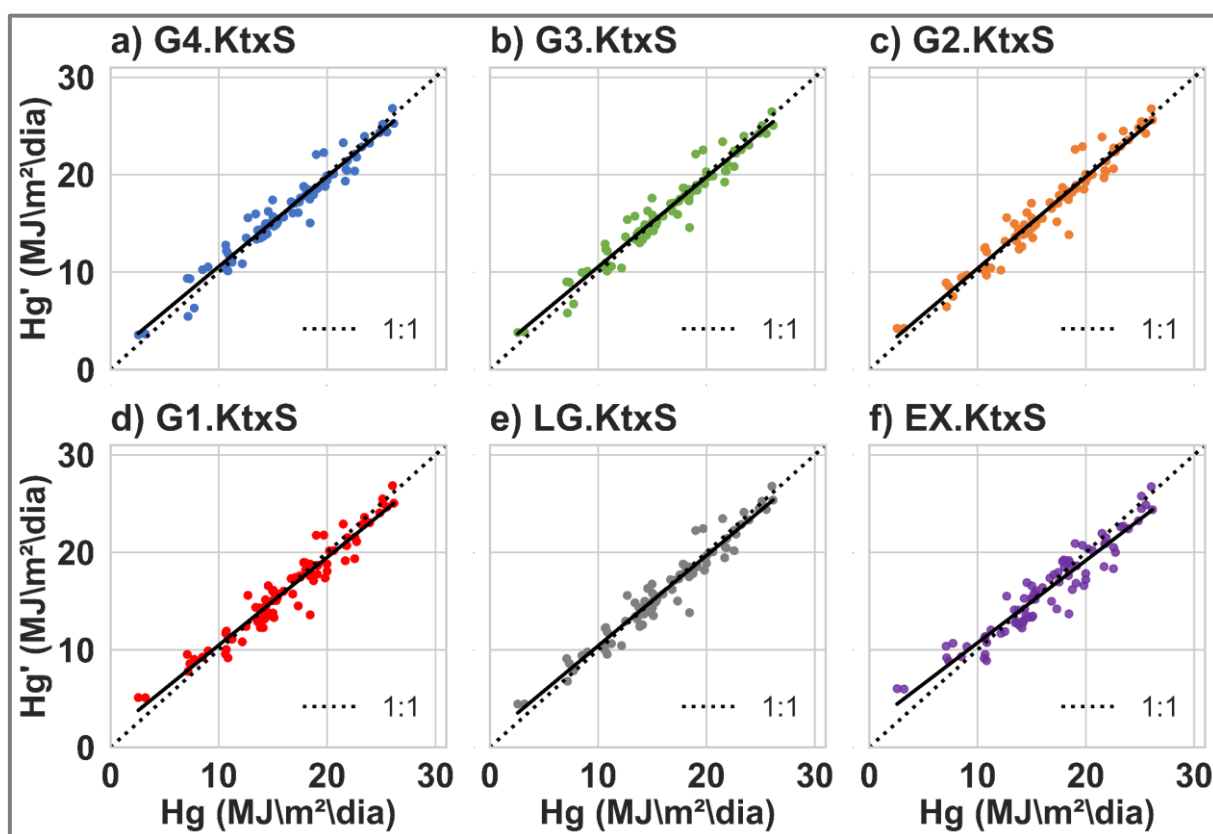
Tabela 2 - Modelos propostos para estimar H_g (dados de treinamento)

Modelo	R_a^2	Equação
G4.KtxS	0,9292*	$K_t = 0,151^* + 1,511^*(S) - 3,163^*(S)^2 + 3,913^*(S)^3 - 1,717^*(S)^4$
G3.KtxS	0,9275*	$K_t = 0,161^* + 1,133^*(S) - 1,193^*(S)^2 + 0,632^*(S)^3$
G2.KtxS	0,9234*	$K_t = 0,179^* + 0,798^*(S) - 0,282^*(S)^2$
G1.KtxS	0,9087*	$K_t = 0,215^* + 0,523^*(S)$
LG.KtxS	0,9230*	$K_t = 0,187^* + 0,762^*\ln(S)$
EX.KtxS	0,8704*	$K_t = -0,050^* + 0,304^*\exp(S)$

Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial; * Indica significância estatística ao nível de 5%.

A Figura 12 apresenta a dispersão entre as medidas de Hg e a irradiação solar global estimada (Hg') pelos modelos G4.KtxS a EX.KtxS, utilizando o conjunto de dados de teste de desempenho. Nota-se que os valores estimados pelos modelos empíricos estão próximos aos valores medidos de Hg, indicando forte correlação positiva. No entanto, o modelo baseado na função exponencial (EX.KtxS) apresenta maior tendência em superestimar as medidas de Hg em valores menores que 10 MJ/m²/dia e maior tendência em subestimar as medidas de Hg em valores acima de 15 MJ/m²/dia, em comparação com os demais modelos, conforme aponta a reta ideal pontilhada (1:1).

Figura 12 - Dispersão entre Hg e Hg' (dados de teste)



A Tabela 3 exibe os resultados do teste de desempenho dos modelos empíricos de Hg por meio dos indicadores considerados. Os modelos apresentam valores de MBE variando de -0,2734 MJ/m²/dia a 0,0732 MJ/m²/dia e rMBE de -1,6670% a 0,4466%, sendo que os modelos G4.KtxS e G3.KtxS demonstram tendência em superestimar as medidas, enquanto os demais modelos tendem a subestimar. Quanto ao restante dos indicadores, os valores de RMSE oscilam de 1,1825 MJ/m²/dia a

1,6528 MJ/m²/dia, rRMSE de 7,2109% a 10,0788% (excelente precisão), e r de 0,9509 a 0,9739.

Resultados semelhantes foram observados por Da Silva *et al.* (2017) em Botucatu, São Paulo (MBE de -0,5 a 0,2; rMBE de -3,0 a 1,1; RMSE de 2,3 a 2,7; rRMSE de 13,1 a 15,7; r de 0,94). Valores aproximados para alguns indicadores também foram vistos em outras localidades por Trnka *et al.* (2005) em 10 localidades na Áustria e República Tcheca (MBE de -0,5 a 0,3; rMBE de -4,1 a 3,1; RMSE de 1,4 a 1,8; rRMSE de 13,0 a 17,3), por Beruski, Pereira e Sentelhas (2015) em Ponta Grossa, Paraná (RMSE de 1,2 a 1,6), por Medeiros, Silva e Bezerra (2017) em 4 cidades do Rio Grande do Norte (MBE de -0,1 a 1,1; RMSE de 1,0 a 1,9; r de 0,89 a 0,96), e por Da Silva *et al.* (2021) em Goiânia, Goiás (RMSE de 0,8; r de 0,93).

Além disso, os resultados apresentados neste estudo se mostraram melhores aos encontrados por Lam *et al.* (2008) em 40 cidades da China (MBE de -2,9 a 1,8; rMBE de -14,9 a 18,7; RMSE de 1,2 a 3,6; rRMSE de 6,9 a 32,6), por Wan *et al.* (2008) para 41 localidades na China (MBE de -3,0 a 2,0; rMBE de -16,2 a 19,0; RMSE de 1,2 a 3,8; rRMSE de 6,8 a 32,3), por De Souza *et al.* (2016) em 3 cidades de Alagoas (MBE de -0,9 a 0,9; RMSE de 1,9 a 4,5), e por Bexaira *et al.* (2018) em 13 cidades do Rio Grande do Sul (MBE de -0,6 a 1,3; RMSE de 1,8 a 3,8).

Tabela 3 - Desempenho dos modelos empíricos de Hg (dados de teste)

Modelo	MBE (MJ/m ² /dia)	rMBE (%)	RMSE (MJ/m ² /dia)	rRMSE (%)	r
G4.KtxS	0,0732	0,4466	1,1825	7,2109	0,9739
G3.KtxS	0,0357	0,2179	1,1945	7,2840	0,9732
G2.KtxS	-0,0173	-0,1054	1,2502	7,6241	0,9702
G1.KtxS	-0,1627	-0,9923	1,3632	8,3127	0,9656
LG.KtxS	-0,0620	-0,3784	1,2384	7,5519	0,9710
EX.KtxS	-0,2734	-1,6670	1,6528	10,0788	0,9509

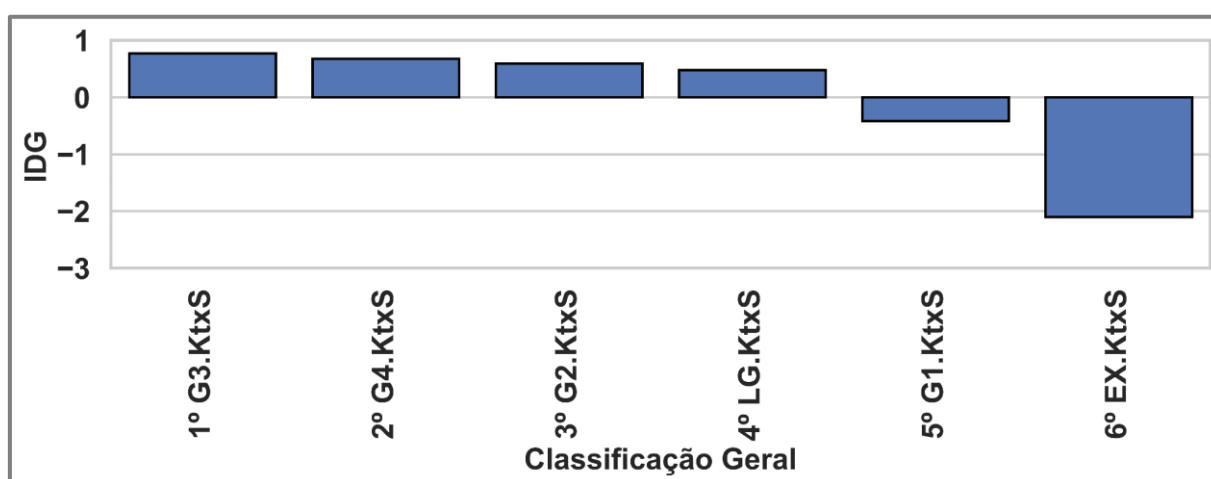
Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial.

Ao avaliar o desempenho individual dos modelos empíricos propostos com base nos indicadores de desempenho e no IDG, apresentado na Figura 13, destaca-se que o modelo EX.KtxS evidenciou o menor desempenho em relação a todos os indicadores considerados, incluindo MBE (-0,2734 MJ/m²/dia), rMBE (-1,6670%), RMSE (1,6528 MJ/m²/dia), rRMSE (10,0788%) e r (0,9509). Como resultado, o IDG

associado a esse modelo foi o mais baixo, atingindo -2,1040, indicando um desempenho geral inferior em comparação com os demais modelos.

Em contrapartida, o modelo G2.KtxS se destacou positivamente em relação aos indicadores MBE (-0,0173 MJ/m²/dia) e rMBE (-0,1054%). Por outro lado, o modelo G4.KtxS demonstrou melhor desempenho nos indicadores RMSE (1,1825 MJ/m²/dia), rRMSE (7,2109%) e r (0,9739). No entanto, o modelo G3.KtxS obteve maior equilíbrio entre os indicadores, com melhor desempenho em termos de MBE e rMBE em comparação com o modelo G4.KtxS, além de superar o modelo G2.KtxS em relação ao RMSE, rRMSE e r. Deste modo, o modelo com polinômio de grau 3 (G3.KtxS), se sobressaiu em relação aos demais para estimar Hg, com um IDG de 0,7705.

Figura 13 - IDG dos modelos empíricos de Hg (dados de teste)



Em outras regiões do mundo, o uso do modelo com polinômio de grau 3 tem demonstrado superioridade, conforme evidenciado por Bahel, Bakhsh e Srinivasan (1987) em um estudo abrangendo 48 cidades ao redor do globo. Também se mostrou mais vantajoso para Ulgen e Hepbasli (2004) em 3 cidades da Turquia, para Jin, Yezheng e Gang (2005) em 69 localidades na China, para Mecibah *et al.* (2014) em 6 localidades na Argélia, para Teke e Yıldırım (2014) em 4 cidades da Turquia, e para Yaniktepe e Genc (2015) em Osmaniye, Turquia. Além de ser recomendado por Aras, Balli e Hepbasli (2006) em 12 cidades na Turquia e por Rensheng *et al.* (2006) para 86 localidades na China.

4.2 Modelos empíricos de irradiação solar difusa

Os modelos desenvolvidos a partir do conjunto de dados de treinamento para estimar H_d são descritos na Tabela 4 (Modelos G4.KdxS a EX.KdxKtxS), e os resíduos correspondentes são detalhados no Apêndice B. Na tabela, nota-se que os valores de R_a^2 oscilam de 0,8590 (modelo de função logarítmica baseado na variável independente Kt) a 0,9182 (modelo com polinômio de grau 4 baseado nas variáveis independentes Kt e S em conjunto). Em termos gerais, esses valores são mais elevados quando comparados ao que foi observado por Marques Filho *et al.* (2016) na cidade do Rio de Janeiro, que alcançaram um R^2 de 0,86.

Em estudos semelhantes abrangendo diferentes regiões do mundo, foram encontrados valores aproximados de R^2 . Jiang (2009a) obteve um R^2 de 0,92 para Pequim, China, enquanto Jiang (2009b) encontrou R^2 variando de 0,84 a 0,95 para 13 localidades na China. Bortolini *et al.* (2013) demonstraram R^2 variando de 0,88 a 0,93 para 44 localidades em toda a Europa. Por outro lado, para outras localidades, foram observados diversos valores. Rensheng *et al.* (2004) encontraram R^2 variando de 0,74 a 0,93 para 16 localidades na China. Aras, Balli e Hepbasli (2006) alcançaram um R^2 elevado de 0,99 para 12 localidades na Turquia, enquanto Jamil e Akhtar (2017) obtiveram um R^2 de 0,76 para Aligarh, Índia.

Tabela 4 - Modelos propostos para estimar H_d (dados de treinamento)

Modelo	R_a^2	Equação
Categoria I		
G4.KdxS	0,8791*	$K_d = 0,912^* - 1,555^*(S) + 3,178^*(S)^2 - 3,958(S)^3 + 1,493(S)^4$
G3.KdxS	0,8788*	$K_d = 0,904^* - 1,226^*(S) + 1,466^*(S)^2 - 1,107^*(S)^3$
G2.KdxS	0,8733*	$K_d = 0,872^* - 0,640^*(S) - 0,130(S)^2$
G1.KdxS	0,8724*	$K_d = 0,889^* - 0,767^*(S)$
LG.KdxS	0,8618*	$K_d = 0,924^* - 1,101^*\ln(S + 1)$
EX.KdxS	0,8699*	$K_d = 1,295^* - 0,455^*\exp(S)$
Categoria II		
G4.KdxKt	0,9106*	$K_d = 0,869^* + 1,082(Kt) - 8,004(Kt)^2 + 13,607(Kt)^3 - 9,367(Kt)^4$
G3.KdxKt	0,9103*	$K_d = 1,013^* - 0,937(Kt) + 0,958(Kt)^2 - 2,030(Kt)^3$
G2.KdxKt	0,9094*	$K_d = 0,038(Kt) - 1,629^*(Kt)^2$
G1.KdxKt	0,8799*	$K_d = 1,173^* - 1,403^*(Kt)$
LG.KdxKt	0,8590*	$K_d = 1,257^* - 1,976^*\ln(Kt + 1)$
EX.KdxKt	0,9001*	$K_d = 1,979^* - 0,900^*\exp(Kt)$

Categoria III		
G4.KdxSxKt	0,9094*	$Kd = 1,061^* - 0,068(S) + 0,064(S)^2 - 0,106(S)^3 - 0,198(S)^4 - 0,984^*(Kt)$
G3.KdxSxKt	0,9097*	$Kd = 1,062^* - 0,115(S) + 0,295(S)^2 - 0,486(S)^3 - 0,981^*(Kt)$
G2.KdxSxKt	0,9090*	$Kd = 1,056^* + 0,178(S) - 0,419^*(S)^2 - 1,025^*(Kt)$
G1.KdxSxKt	0,8969*	$Kd = 1,058^* - 0,358^*(S) - 0,781^*(Kt)$
LG.KdxSxKt	0,8891*	$Kd = 1,092^* - 0,418^*\ln(S + 1) - 0,896^*(Kt)$
EX.KdxSxKt	0,9051*	$Kd = 1,256^* - 0,216^*\exp(S) - 0,783^*(Kt)$
G4.KdxKxtS	0,9182*	$Kd = 0,874^* + 0,925(Kt) - 7,062(Kt)^2 + 13,746(Kt)^3 - 10,068(Kt)^4 - 0,260^*(S)$
G3.KdxKtxS	0,9177*	$Kd = 1,028^* - 1,243^*(Kt) + 2,559(Kt)^2 - 3,053^*(Kt)^3 - 0,258^*(S)$
G2.KdxKtxS	0,9153*	$Kd = 0,881^* + 0,201(Kt) - 1,367^*(Kt)^2 - 0,228^*(S)$
LG.KdxKtxS	0,8899*	$Kd = 1,065^* - 0,879^*\ln(Kt + 1) - 0,447^*(S)$
EX.KdxKtxS	0,9075*	$Kd = 1,650^* - 0,622^*\exp(Kt) - 0,251^*(S)$

Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial; *Indica significância estatística ao nível de 5%.

A Figura 14 exibe a dispersão entre as medidas de Hd e a irradiação solar difusa estimada (Hd') pelos modelos G4.KdxS a EX.KdxKtxS, utilizando o conjunto de dados de teste de desempenho. É notável que os valores exibem uma correlação positiva, uma vez que as estimativas se aproximam dos valores medidos de Hd. Entretanto, é importante destacar que os modelos tendem a superestimar as medidas de Hd quando estas estão abaixo de 4 MJ/m²/dia. Adicionalmente, alguns modelos tendem a subestimar as medidas quando estas se aproximam de 12 MJ/m²/dia, especialmente os modelos lineares (G1) e logarítmicos (LG), conforme aponta a reta ideal pontilhada (1:1).

Figura 14 - Dispersão entre Hd e Hd' (dados de teste)

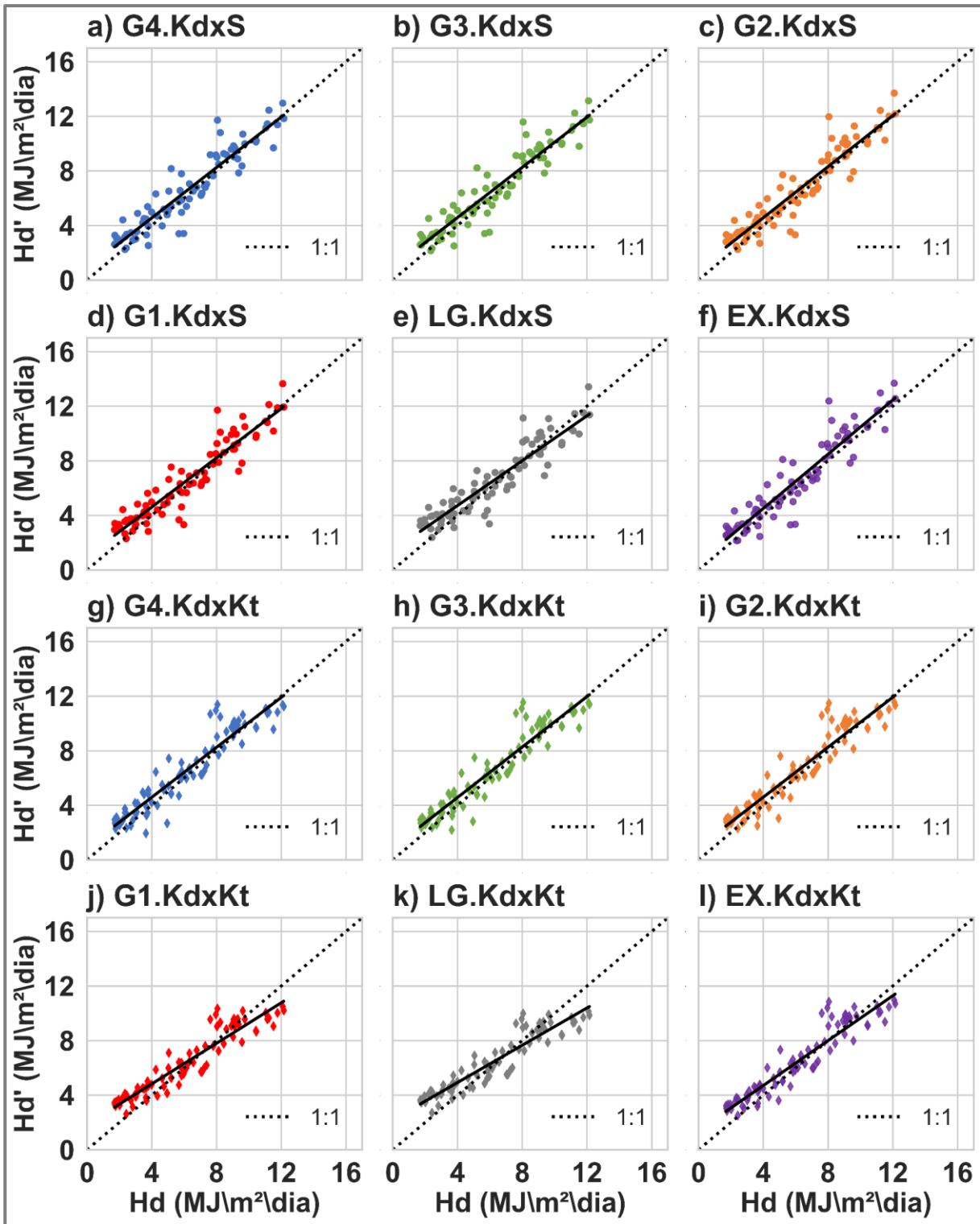
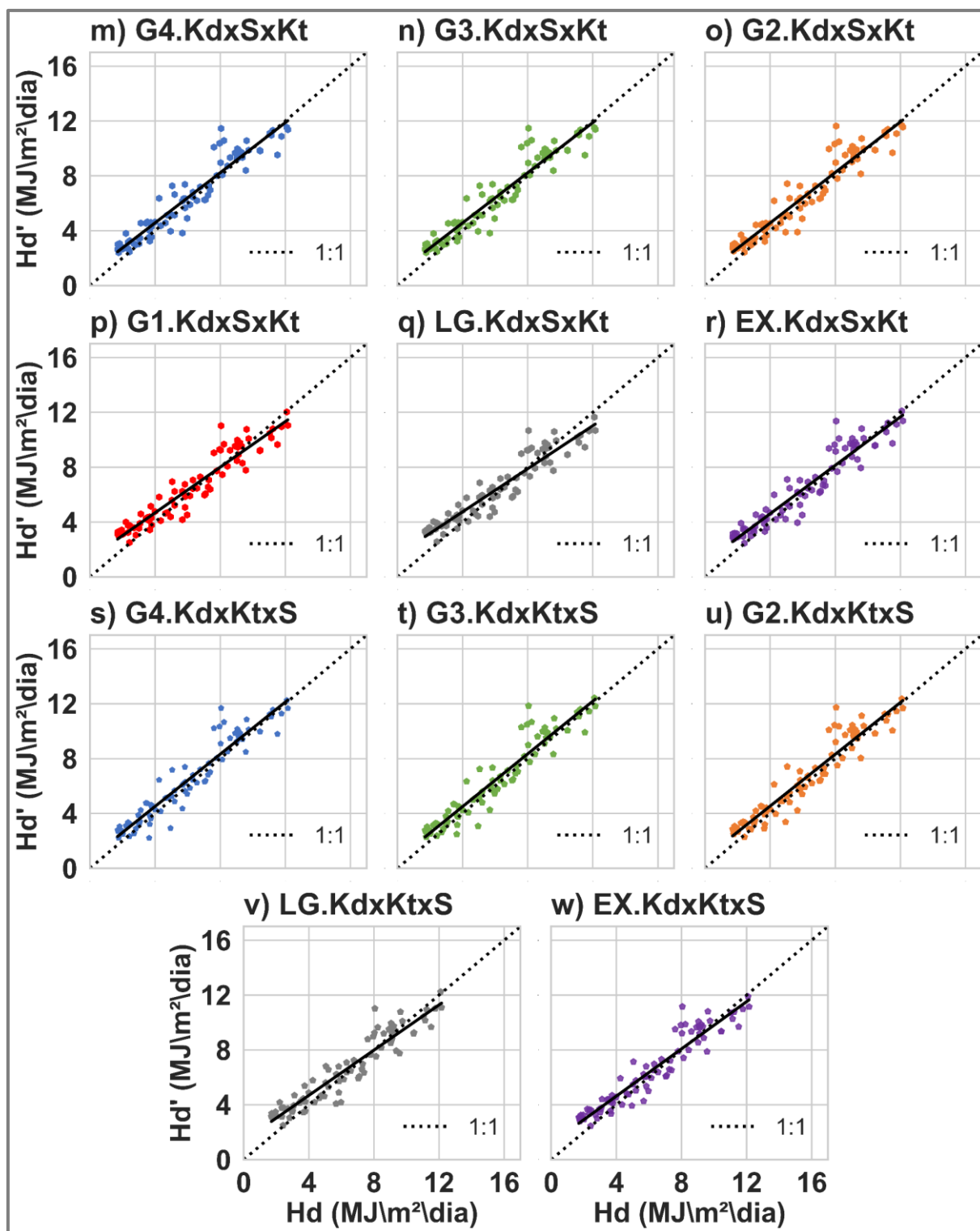


Figura 14 - (continuação)



A Tabela 5 apresenta os resultados do teste de desempenho dos modelos empíricos de Hd por meio dos indicadores. Os modelos apresentam valores de MBE variando de 0,2339 $MJ/m^2/day$ a 0,4906 $MJ/m^2/day$ e rMBE de 3,7807% a 7,9314%, demonstrando que os modelos propostos mostram tendência em superestimar as

medidas de Hd. Quanto aos demais dos indicadores, os valores de RMSE oscilam de 0,9766 MJ/m²/dia a 1,2450 MJ/m²/dia, rRMSE de 15,7874% a 20,1261% (precisão variando de boa para baixa), e r de 0,9278 a 0,9528.

Resultados aproximados foram observados, para alguns indicadores, nos estudos de Trabea (1999) em 6 localidades no Egito (MBE de -0,60 a 0,80; RMSE de 0,41 a 0,86; r de 0,90), de Oliveira *et al.* (2002) na cidade de São Paulo (MBE de -0,03; RMSE de 1,34), de Jiang (2009b) em 13 localidades na China (MBE de -0,44 a -0,43; RMSE de 0,61 a 1,00), de Boukelia, Mecibah e Meriche (2014) em 6 localidades na Argélia (MBE de -0,07 a 0,06; RMSE de 0,60 a 0,90), de Jamil e Akhtar (2017) em Aligarh, Índia (MBE de -0,41; RMSE de 0,90), de Ali, Jamil e Fakhrudin (2019) em Puna, Índia (MBE de 0,01; RMSE de 0,97; r de 0,90).

Tabela 5 - Desempenho dos modelos empíricos de Hd (dados de teste)

Modelo	MBE (MJ/m ² /dia)	rMBE (%)	RMSE (MJ/m ² /dia)	rRMSE (%)	r
Categoria I					
G4.KdxS	0,3852	6,2275	1,1086	17,9210	0,9385
G3.KdxS	0,4023	6,5030	1,1131	17,9935	0,9385
G2.KdxS	0,4236	6,8475	1,1210	18,1212	0,9393
G1.KdxS	0,3903	6,3094	1,1173	18,0626	0,9368
LG.KdxS	0,3266	5,2798	1,1669	18,8645	0,9278
EX.KdxS	0,4906	7,9314	1,1729	18,9615	0,9411
Categoria II					
G4.KdxKt	0,3985	6,4423	1,0958	17,7140	0,9403
G3.KdxKt	0,4055	6,5559	1,0910	17,6372	0,9415
G2.KdxKt	0,4043	6,5364	1,0817	17,4870	0,9422
G1.KdxKt	0,2644	4,2745	1,1435	18,4859	0,9397
LG.KdxKt	0,2339	3,7807	1,2450	20,1261	0,9345
EX.KdxKt	0,3167	5,1196	1,0639	17,1988	0,9429
Categoria III					
G4.KdxSxKt	0,3767	6,0889	0,9982	16,1358	0,9509
G3.KdxSxKt	0,3745	6,0538	0,9985	16,1413	0,9507
G2.KdxSxKt	0,3821	6,1764	0,9941	16,0703	0,9517
G1.KdxSxKt	0,3022	4,8854	1,0088	16,3087	0,9494
LG.KdxSxKt	0,2716	4,3898	1,0591	17,1215	0,9466
EX.KdxSxKt	0,3417	5,5233	0,9766	15,7874	0,9522
G4.KdxKtxS	0,4004	6,4723	1,0062	16,2666	0,9521
G3.KdxKtxS	0,4079	6,5941	1,0071	16,2803	0,9528
G2.KdxKtxS	0,4059	6,5615	1,0071	16,2812	0,9519
LG.KdxKtxS	0,3000	4,8499	1,0334	16,7063	0,9464
EX.KdxKtxS	0,3253	5,2587	0,9819	15,8733	0,9517

Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial.

Ao avaliar o desempenho individual dos modelos empíricos propostos na Categoria I, com base nos indicadores de desempenho e no IDG, apresentado na Figura 15a, destaca-se que o modelo EX.KdxS demonstrou o menor desempenho nos indicadores MBE (0,4906 MJ/m²/dia), rMBE (7,9314%), RMSE (1,1729 MJ/m²/dia) e rRMSE (18,9615%), enquanto o modelo LG.KdxS obteve o menor desempenho no indicador r (0,9278). Devido ao desempenho inferior em relação aos outros indicadores, o modelo EX.KdxS atingiu um IDG de -1,0171, sendo o menor valor da categoria.

Em contrapartida, o modelo LG.KdxS apresentou o melhor desempenho nos indicadores MBE (0,3266 MJ/m²/dia) e rMBE (5,2798%), enquanto o modelo G4.KdxS se destacou nos indicadores RMSE (1,1086 MJ/m²/dia) e rRMSE (17,9210%). Por sua vez, o modelo EX.KdxS obteve o melhor desempenho em relação ao indicador r (0,9411). No entanto, quando se considera o indicador geral, o modelo G4.KdxS se destacou em relação aos demais da Categoria I, obtendo um IDG de -0,4683.

Entre os modelos da Categoria II, o modelo G3.KdxKt obteve menor desempenho em relação aos indicadores MBE (0,4055 MJ/m²/dia) e rMBE (6,5559%), enquanto o modelo LG.KdxKt teve desempenho inferior nos indicadores RMSE (1,2450 MJ/m²/dia), rRMSE (20,1261%) e r (0,9345). Portanto, o IDG para este modelo foi o mais baixo da categoria, atingindo um valor de -0,5484.

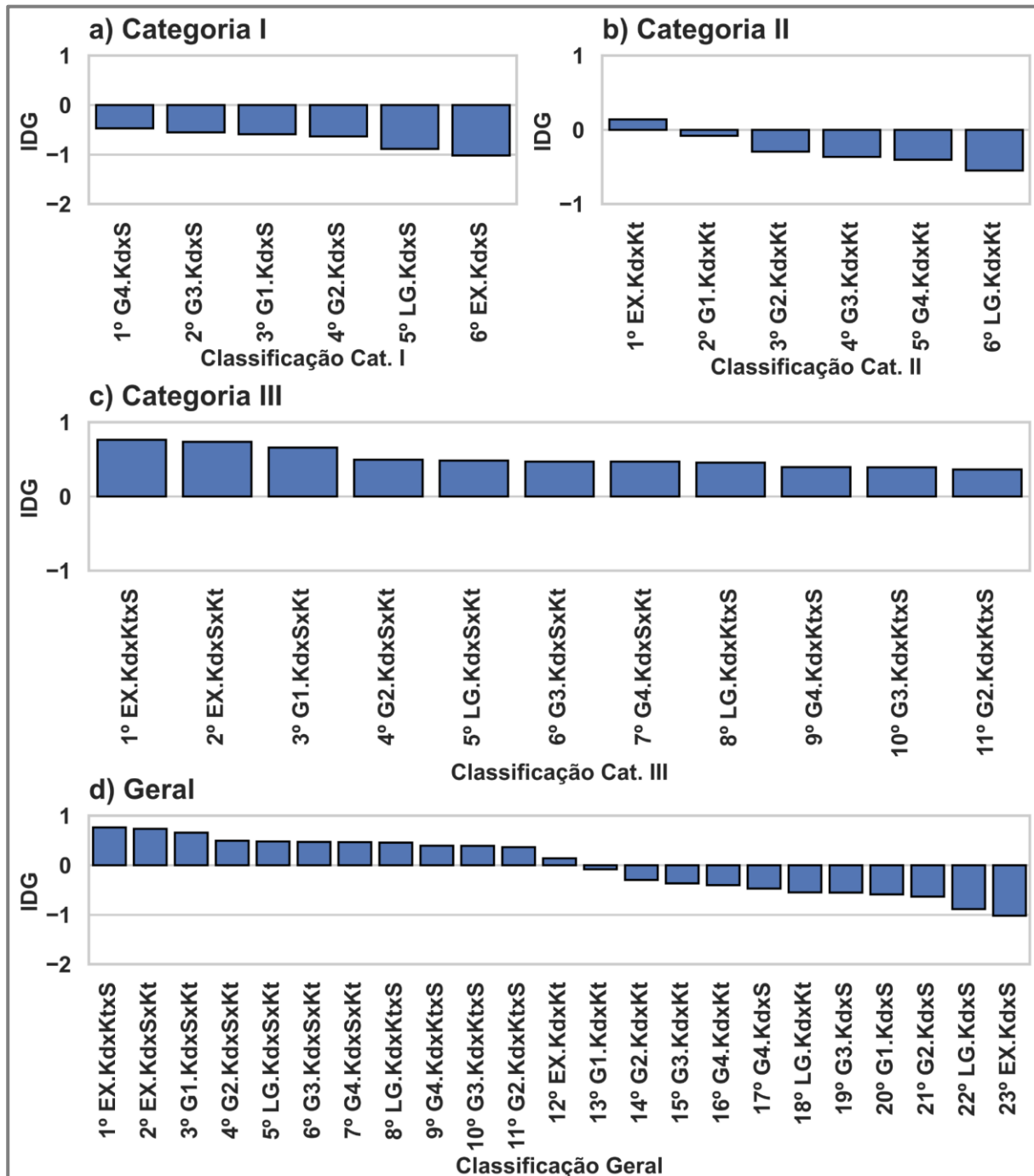
Contudo, o modelo LG.KdxKt apresentou um desempenho superior nos indicadores MBE (0,2339 MJ/m²/dia) e rMBE (3,7807%). Enquanto isso, o modelo EX.KdxKt se destacou nos indicadores RMSE (1,0639 MJ/m²/dia), rRMSE (17,1988%), e r (0,9429). Deste modo, o IDG para este modelo foi o maior na Categoria II, se destacando em relação aos demais modelos, com um IDG de 0,1407.

Para os modelos da Categoria III, o modelo G3.KdxKtxS obteve um desempenho inferior em relação aos indicadores MBE (0,4079 MJ/m²/dia) e rMBE (6,5941%), enquanto o modelo LG:KdxSxKt apresentou desempenho inferior nos indicadores RMSE (1,0591 MJ/m²/dia) e rRMSE (17,1215%), e o modelo LG.KdxKtxS para o indicador r (0,9464). No entanto, o modelo G2.KdxKtxS apresentou o menor valor de IDG (0,3648), sendo considerado o menor desempenho da categoria.

Em contraste, o modelo LG.KdxSxKt apresentou desempenho superior nos indicadores MBE (0,2716 MJ/m²/dia) e rMBE (4,3898%). Por outro lado, o modelo EX.KdxSxKt se destacou nos indicadores RMSE (0,9766 MJ/m²/dia) e rRMSE (15,7874%), e o modelo G3.KtxKtxS obteve a melhor pontuação no indicador r

(0,9528). No entanto, por apresentar maior equilíbrio entre os indicadores, o modelo exponencial (EX.KdxKtxS) se destacou em relação aos demais modelos considerados, com um IDG de 0,7638, sendo o mais adequado para estimar Hd.

Figura 15 - IDG dos modelos empíricos de Hd (dados de teste)



O uso simultâneo das variáveis independentes Kt e S na estimativa de Hd revelou-se benéfico em estudos prévios. Essa observação foi corroborada por Trabea (1999) em seus resultados abrangendo 6 localidades no Egito, bem como por Jiang

(2009a) em Pequim, China, e por Jiang (2009b) em 13 cidades da China. Khorasanizadeh, Mohammadi e Mostafaeipour (2014) constataram a utilidade dessa abordagem em Tabas, Irã, enquanto Bakirci (2015) a confirmou para 8 cidades da Turquia. Além disso, El-Sebaei *et al.* (2010) recomendaram a incorporação dessas variáveis em Jidá, Arábia Saudita, ao correlacioná-los de maneira conjunta tanto com Kd quanto com Ktd.

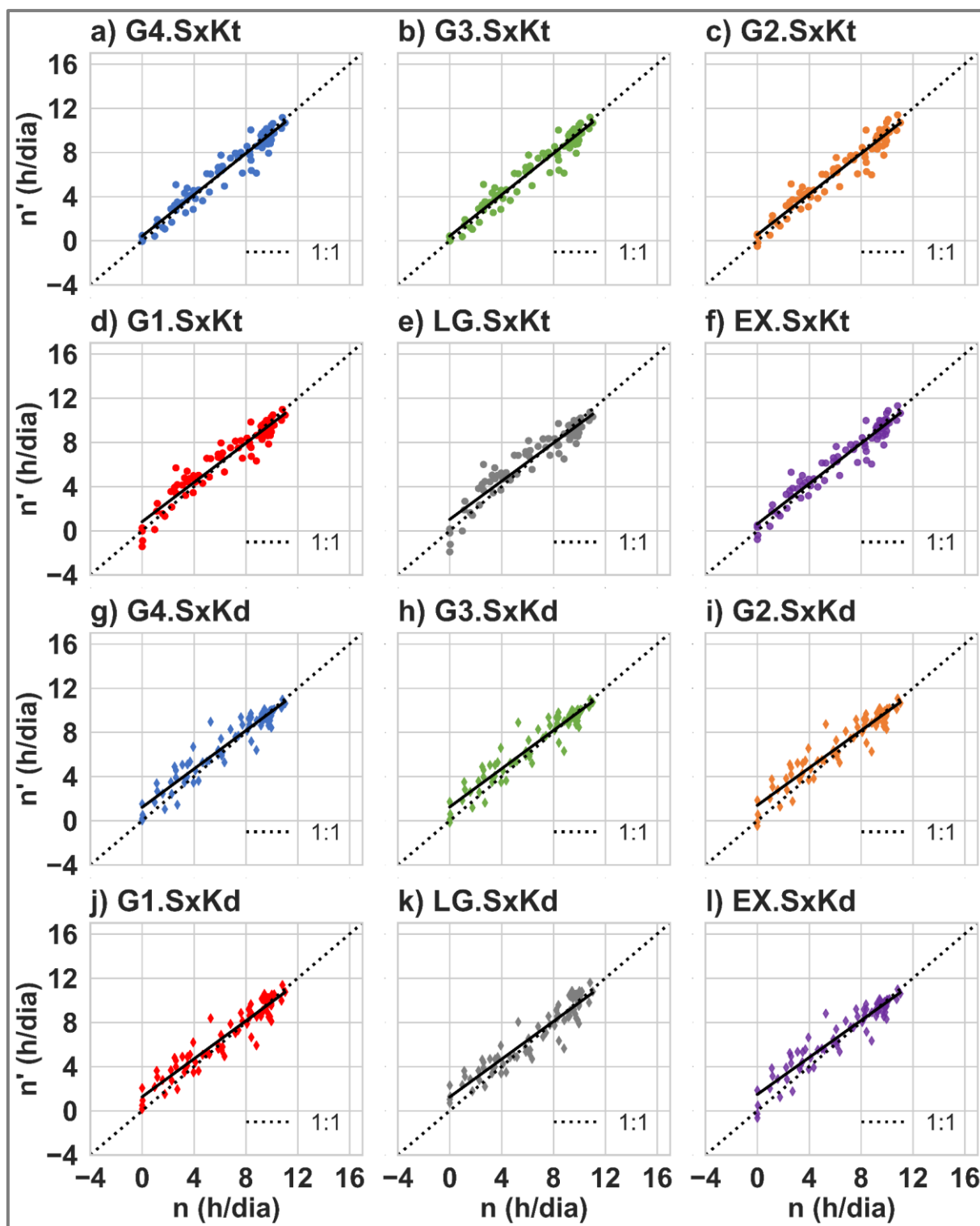
4.3 Modelos empíricos de horas de brilho solar

Os modelos desenvolvidos a partir do conjunto de dados de treinamento para estimar n são descritos na Tabela 6 (Modelos G4.SxKt a EX.SxKd), enquanto os resíduos desses modelos são detalhados no Apêndice C. Na tabela, se observa que os valores de R_a^2 oscilam de 0,8551 (modelo de função logarítmica baseado na variável independente Kd) a 0,9212 (modelo com polinômio de grau 3 baseado na variável independente Kt). Valores mais elevados quando comparados ao estudo de Blanco e Sentelhas (2002) em Piracicaba, São Paulo, com R^2 de 0,84.

Tabela 6 - Modelos propostos para estimar n (dados de treinamento)

Modelo	R_a^2	Equação
Categoria I		
G4.SxKt	0,9210*	$S = 0,018 - 0,605(Kt) + 3,629(Kt)^2 + 0,534(Kt)^3 - 2,699(Kt)^4$
G3.SxKt	0,9212*	$S = 0,059 - 1,187(Kt) + 6,211*(Kt)^2 - 3,971*(Kt)^3$
G2.SxKt	0,9184*	$S = -0,138* + 0,720*(Kt) + 1,150*(Kt)^2$
G1.SxKt	0,9087*	$S = -0,322* + 1,737*(Kt)$
LG.SxKt	0,8944*	$S = -0,430* + 2,456*\ln(Kt + 1)$
EX.SxKt	0,9175*	$S = -1,307* + 1,107*\exp(Kt)$
Categoria II		
G4.SxKd	0,8807*	$S = 1,012* - 1,072(Kd) + 2,152(Kd)^2 - 5,198(Kd)^3 + 3,091(Kd)^4$
G3.SxKd	0,8805*	$S = 0,922* + 0,054(Kd) - 2,151*(Kd)^2 + 1,100*(Kd)^3$
G2.SxKd	0,8791*	$S = 1,004* - 0,681*(Kd) - 0,459*(Kd)^2$
G1.SxKd	0,8724*	$S = 1,086* - 1,138*(Kd)$
LG.SxKd	0,8551*	$S = 1,162* - 1,653*\ln(Kd)$
EX.SxKd	0,8784*	$S = 1,671* - 0,676*\exp(Kd)$
Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial; *Indica significância estatística ao nível de 5%.		

A Figura 16 apresenta a dispersão entre as medidas de n e as horas de brilho solar estimadas (n') pelos modelos G4.SxKt a EX.SxKd. É possível notar que os modelos G2.SxKt (Figura 16c) a EX.SxKt (Figura 16f) da Categoria I exibem tendência em gerar estimativas negativas para valores de n próximos a 0 h/dia. Essa mesma tendência é observada para os modelos G3.SxKd (Figura 16h), G2.SxKd (Figura 16i) e EX.SxKd (Figura 16l) da Categoria II. Além disso, ao observar os pontos em torno da reta ideal pontilhada (1:1), fica evidente que os modelos da Categoria II exibem maior dispersão em comparação com os modelos da Categoria I.

Figura 16 - Dispersão entre n e n' (dados de teste)

A Tabela 7 mostra os resultados do teste de desempenho dos modelos empíricos de n por meios dos indicadores considerados. Os modelos apresentam valores de MBE variando de -0,0203 h/dia a 0,3720 h/dia e rMBE de -0,3010% a 5,5094%, sendo que os modelos G4.SxKt a G2.SxKt mostram tendência de

subestimar as medidas de n , enquanto o restante dos modelos apresentam tendência em superestimar. Quanto ao restante dos indicadores, os valores de RMSE oscilam de 0,8129 h/dia a 1,1096 h/dia, rRMSE de 12,0384% a 16,4320% (indicando boa precisão), e r de 0,9479 a 0,9691.

Tabela 7 - Desempenho dos modelos empíricos de n (dados de teste)

Modelo	MBE (h/dia)	rMBE (%)	RMSE (h/dia)	rRMSE (%)	r
Categoria I					
G4.SxKt	-0,0203	-0,3010	0,8129	12,0384	0,9691
G3.SxKt	-0,0188	-0,2782	0,8167	12,0952	0,9688
G2.SxKt	-0,0077	-0,1142	0,8510	12,6028	0,9662
G1.SxKt	0,0671	0,9940	0,9401	13,9222	0,9592
LG.SxKt	0,1082	1,6023	1,0452	15,4788	0,9497
EX.SxKt	0,0125	0,1844	0,8641	12,7970	0,9652
Categoria II					
G4.SxKd	0,3258	4,8243	1,0280	15,2238	0,9564
G3.SxKd	0,3356	4,9705	1,0313	15,2730	0,9566
G2.SxKd	0,3567	5,2824	1,0781	15,9665	0,9534
G1.SxKd	0,3073	4,5506	1,0471	15,5073	0,9542
LG.SxKd	0,2670	3,9535	1,0933	16,1905	0,9479
EX.SxKd	0,3720	5,5094	1,1096	16,4320	0,9510

Legenda: G4 = Polinômio de grau 4; G3 = Polinômio de grau 3; G2 = Polinômio de grau 2; G1 = Polinômio de grau 1; LG = Função logarítmica; EX = Função exponencial.

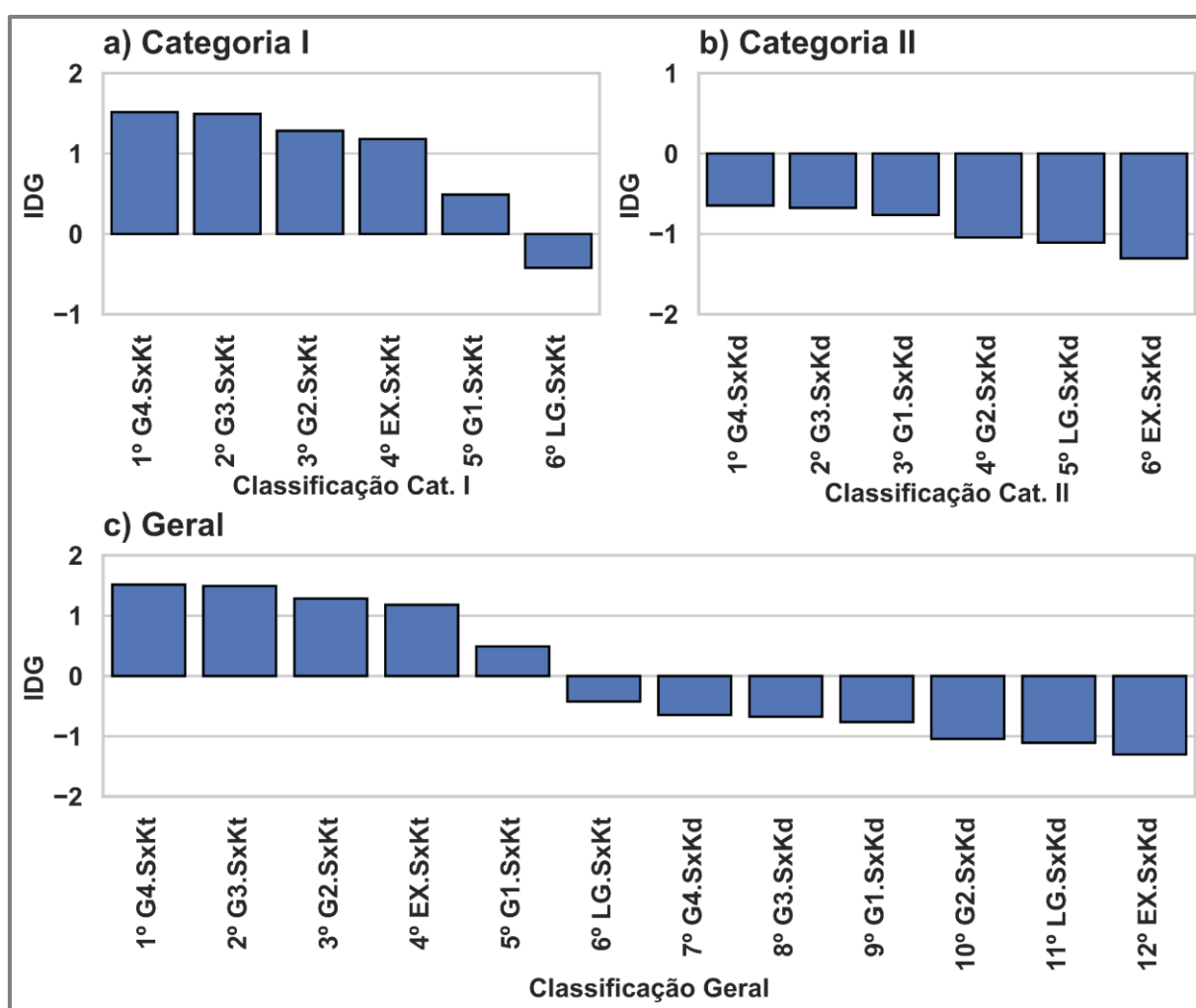
Ao avaliar o desempenho individual dos modelos empíricos propostos na Categoria I, com base nos indicadores de desempenho e no IDG, apresentado na Figura 17a, destaca-se que o modelo LG.SxKt demonstrou o menor desempenho em todos os indicadores considerados, MBE (0,1082 h/dia), rMBE (1,6023%), RMSE (1,0452 h/dia), rRMSE (15,4788%) e r (0,9497). Deste modo, este modelo também atingiu o menor valor de IDG (-0,4214), indicando o desempenho mais baixo na categoria.

Em contraste, o modelo G2.SxKt apresentou o melhor desempenho nos indicadores MBE (-0,0077 h/dia) e rMBE (-0,1142%). Enquanto o modelo G4.SxKt se destacou nos indicadores RMSE (0,8129 h/dia), rRMSE (12,0384%) e r (0,9691). Deste modo, o IDG para este modelo foi o mais alto, considerando ambas as categorias, atingindo 1,5150 e classificando-se como o modelo empírico mais adequado para estimar n .

Entre os modelos da Categoria II, o modelo EX.SxKd exibiu desempenho inferior em relação aos indicadores MBE (0,3720 h/dia), rMBE (5,5094%), RMSE (1,1096 h/dia) e rRMSE (16,4320%), enquanto o modelo LG.SxKd apresentou menor desempenho para r (0,9479). Devido ao desempenho inferior em relação aos outros indicadores, o modelo EX.SxKd atingiu um IDG de -1,3044, apresentando o menor desempenho, considerando ambas as categorias.

Contudo, o modelo LG.SxKd mostrou melhor desempenho para os indicadores MBE (0,2670 h/dia) e rMBE (3,9535 %), enquanto o modelo G4.SxKd se destacou nos indicadores RMSE (1,0280 h/dia) e rRMSE (15,2238 %), e o modelo G3.SxKd se sobressaiu em relação ao indicador r (0,9566). No entanto, por apresentar maior equilíbrio entre os indicadores, o modelo G4.SxKd se sobressaiu aos demais modelos na Categoria II, com um IDG de -0,6472.

Figura 17 - IDG dos modelos empíricos de n (dados de teste)



Conforme evidenciado por Blanco e Sentelhas (2002) e confirmado pelo desempenho dos modelos da Categoria I, o princípio de correlação da equação de Angstrom-Prescott revela-se altamente útil na estimativa de n utilizando medidas de Hg. Assim, os modelos da Categoria I, em particular o modelo G4.SxKt, podem ser empregados na estimativa diária de n para o município de Botucatu. Esses modelos têm potencial para auxiliar na caracterização do clima local, em atividades agrícolas, monitoramento ambiental e em estudos agroecológicos (Blanco e Sentelhas, 2002; Wang *et al.*, 2021).

5 CONCLUSÕES

Por meio de dados de brilho solar coletados de maneira automatizada e padronizada, o estudo possibilitou desenvolver modelos empíricos para estimar a irradiação solar global e irradiação solar difusa no município de Botucatu, São Paulo, Brasil. Além disso, por meio de medidas de irradiação solar, permitiu criar modelos empíricos para estimar o brilho solar nos dias atuais. Modelos que representam ferramentas valiosas para pesquisadores em locais com condições climáticas semelhantes às de Botucatu. A partir dos resultados apresentados, se obteve as seguintes conclusões:

- A introdução do Índice de Desempenho Global (IDG) simplificou a análise de desempenho dos modelos empíricos, consolidando os resultados individuais dos indicadores em um único valor. Essa abordagem facilitou a seleção dos modelos com desempenho superior, simplificando a avaliação e a comparação entre os diferentes modelos propostos;
- Quanto aos modelos empíricos para estimar H_g , foi observado que 3 modelos apresentaram desempenho elevado e próximo, conforme indicado pelo IDG. No entanto, o modelo G3.KtxS se destacou como o modelo empírico com melhor desempenho para estimar H_g , com a seguinte equação matemática:

$$K_t = 0,161 + 1,133(S) - 1,193(S)^2 + 0,632(S)^3$$

- Em relação aos modelos empíricos para estimar H_d , observou-se que os modelos baseados na relação de K_d com S e K_t apresentaram maior desempenho. Além disso, 3 modelos evidenciaram um desempenho elevado e próximo, conforme indicado pelo IDG. Contudo, o modelo EX.KdxKtxS se sobressaiu como o mais adequado para estimar H_d , seguindo a equação matemática:

$$K_d = 1,650 - 0,622\exp(K_t) - 0,251(S)$$

- Para os modelos empíricos de n , foi visto que os modelos baseados na relação de S para com K_t apresentaram melhores resultados. Bem como, 2 modelos

exibem um desempenho elevado e próximo, segundo os valores de IDG. Entretanto, o modelo G4.SxKt atingiu o melhor desempenho para estimar n, com a equação matemática:

$$S = 0,018 - 0,605(Kt) + 3,629(Kt)^2 + 0,534(Kt)^3 - 2,699(Kt)^4$$

Assim, o presente estudo oferece modelos confiáveis para estimar tanto a irradiação solar global e difusa quanto as horas de brilho solar para o município de Botucatu. Estes modelos constituem ferramentas valiosas para preencher lacunas nas medições e contribuir para a caracterização do clima local. Além disso, desempenham um papel fundamental no suporte à tomada de decisões relacionadas a projetos e simulações de energia solar e agrícolas. Sua utilidade se estende a outros setores, incluindo turismo, monitoramento ambiental, design arquitetônico e modelagem hidrológica.

REFERÊNCIAS

- ADARAMOLA, M. S. Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akure, Nigeria. **Renewable Energy**, v. 47, p. 38-44, 2012.
- AKPABIO, L. E.; ETUK, S. E. Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Onne, Nigeria. **Turkish Journal of Physics**, v. 27, p. 161-167, 2003.
- ALAM, S.; KAUSHIK, S. C.; GARG, S. N. Assessment of diffuse solar energy under general sky condition using artificial neural network. **Applied Energy**, v. 86, n. 4, p. 554-564, 2009.
- ALI, M.; JAMIL, B., FAKHRUDDIN. Estimating diffuse solar radiation in India: performance characterization of generalized single-input empirical models. **Urban Climate**, v. 27, p. 314-350, 2019.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using Sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1529-1535, 2004.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 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.
- ARAS, H.; BALLI, O.; HEPBASLI, A. Global solar radiation potential, part 1: model development. **Energy Sources**, v. 1, p. 303-315, 2006.
- BADESCU, V.; DUMITRESCU, A. New models to compute solar global hourly irradiation from point cloudiness. **Energy Conversion and Management**, v. 67, p. 75-91, 2013.
- BAHEL, V.; BAKHSH, H.; SRINIVASAN, R. A correlation for estimation of global solar radiation. **Energy**, v. 12, p. 131-135, 1987.
- BAILEK, N. *et al.* A new empirical model for forecasting the diffuse solar radiation over Sahara in the Algerian Big South. **Renewable Energy**, v. 117, p. 530-537, 2018.
- BAKIRCI, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. **Energy**, v. 34, p. 485-501. 2009.
- BAKIRCI, K. Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in Turkey, **Energy**, v. 82, p. 827-838, 2015.

BASHAHU, M. Statistical comparison of models for estimating the monthly average daily diffuse radiation at a subtropical African site. **Solar Energy**, v. 75, p. 43-51, 2003.

BAYRAKÇI, H. C.; DEMIRCAN, C.; KEÇEBAŞ, A. The development of empirical models for estimating global solar radiation on horizontal surface: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2771-2782, 2018.

BEHAR, O.; KHELLAF, A.; MOHAMMEDI, K. Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate: the case of direct irradiance. **Energy Conversion and Management**. v. 98, p. 236-251, 2015.

BELÚCIO, L. P. *et al.* Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 494-504, 2014.

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

BEXAIRA, K. P. *et al.* Coeficientes de Angström-Prescott para Estimar a Radiação Solar no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 401-411, 2018.

BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 295-300, 2002.

BORTOLINI, M. *et al.* Multi-location model for the estimation of the horizontal daily diffuse fraction of solar radiation in Europe. **Energy Conversion and Management**, v. 67, p. 208-216, 2013.

BOUKELIA, T. E.; MECIBAH, M.; MERICHE, I. E. General models for estimation of the monthly mean daily diffuse solar radiation (Case study: Algeria). **Energy Conversion and Management**, v. 81, p. 211-219, 2014.

CALÇA, M. V. C. *et al.* Outliers Detection in a Quality Control Procedure for Measurements of Solar Radiation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 17, n. 11, p. 1815-1822, 2019.

CARVALHO, D. F. *et al.* Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 838-844, 2011.

COULIBALY, O.; OUEDRAOGO, A. Correlation of global solar radiation of eight synoptic stations in burkina faso based on linear and multiple linear regression methods. **Journal of Solar Energy**, v. 1, p. 1-9, 2016.

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

DA SILVA, E. P. P. B. *et al.* Parametrização das Equações de Hargreaves & Samani e Ångström-PreScott Para Estimativa da Radiação Solar em Goiânia-GO. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 683-688, 2021.

DA 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.

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.

DESPOTOVIC, M. *et al.* Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. **Renewable and Sustainable Energy**, v. 56, p. 1869-1880, 2015.

DE SOUZA, J. L. *et al.* Empirical models of daily and monthly global solar irradiation using sunshine duration for Alagoas State, Northeastern Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 14, p. 35-45, 2016.

DOS SANTOS, C. M. *et al.* On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. **Energy**, v. 71, p. 388-398, 2014.

EBRAHIMI, A.; GHORBANI, B.; ZIABASHARHAGH, M. Exergy and economic analyses of an innovative integrated system for cogeneration of treated biogas and liquid carbon dioxide using absorption–compression refrigeration system and ORC/Kalina power cycles through geothermal energy. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 158, p. 257-281, 2022.

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.

EL-SEBAIL, A. A. *et al.* Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, v. 87, p. 568-576, 2010.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, p. 293-302, 1982.

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA LAGEADO - EML. **Estações meteorológicas**. Disponível em: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.php>. Acesso em: 28 fev. 2023.

ESTAÇÃO SOLARIMÉTRICA LAGEADO - ESL. **Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar**. Disponível em: <http://solarimetria.fca.unesp.br>. Acesso em: 28 fev. 2023.

FAN, J. *et al.* Evaluation and development of temperature-based empirical models for estimating daily global solar radiation in humid regions. **Energy**, v. 144, p. 903-914, 2018.

FRANCO, J. R. *et al.* Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, v. 28, n. 1, 2023.

FRANCO, J. R. *et al.* Análise Comparativa entre medidas meteorológicas da estação convencional e automática da fazenda Lageado no município de Botucatu, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v. 37, n. 2, p. 223-232, 2022.

FURLAN, C. *et al.* The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation. **Applied Energy**, v. 92, p. 240-54, 2012.

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

GUEYMARD, C. A. A reevaluation of the solar constant based on a 42-year total solar irradiance time series and a reconciliation of spaceborne observations. **Solar Energy**, v. 168, p. 2-9, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama do município de Botucatu - SP**. Cidades: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 28 fev. 2023.

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

JAMIL, B.; AKHTAR, N. Comparison of empirical models to estimate monthly mean diffuse solar radiation from measured data: Case study for humid-subtropical climatic region of India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 1326-1342, 2017.

JAMIL, B.; SIDDIQUI, A. T. Estimation of monthly mean diffuse solar radiation over India: performance of two variable models under different climatic zones. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 25, p. 161-180, 2018.

JAMIL, B.; SIDDIQUI, A. T. Generalized models for estimation of diffuse solar radiation based on clearness index and sunshine duration in India: Applicability under different climatic zones. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 157, p. 16-34, 2017.

JANJAI, S.; PRADITWONG, P.; MOONIN, C. A new model for computing monthly average daily diffuse radiation for Bangkok. **Renewable Energy**, v. 9, p. 1283-1286, 1996.

JIANG, Y. Correlation for diffuse radiation from global solar radiation and sunshine data at Beijing, China. **Journal of Energy Engineering**, v. 135, n. 4, p. 107-111, 2009a.

JIANG, Y. Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. **Applied Energy**, v. 86, n. 9, p. 1458-1464, 2009b.

JIN, Z.; YEZHENG, W.; GANG, Y. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China. **Energy Conversion and Management**, v. 46, p. 257-268, 2005.

KARAKOTI, I.; DAS, P. K.; SINGH, S. K. Predicting monthly mean daily diffuse radiation for India. **Applied Energy**, v. 91, p. 412-425, 2012.

KHORASANIZADEH, H.; MOHAMMADI, K. Diffuse solar radiation on a horizontal surface: reviewing and categorizing the empirical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 338-362, 2016.

KHORASANIZADEH, H.; MOHAMMADI, K.; GOUDARZI, N. Prediction of horizontal diffuse solar radiation using clearness index based empirical models: A case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 21888-21898, 2016.

KHORASANIZADEH, H.; MOHAMMADI, K.; MOSTAFAEIPOUR, A. Establishing a diffuse solar radiation model for determining the optimum tilt angle of solar surfaces in Tabass, Iran. **Energy Conversion and Management**, v. 78, p. 805-814, 2014.

KUMAR DASH, P. K. *et al.* Efficient machine learning algorithm with enhanced cat swarm optimization for prediction of compressive strength of GGBS-based geopolymer concrete at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132814, 2023.

LAM, J. C. *et al.* Climatic influences on solar modelling in China. **Renewable Energy**, v. 33, p. 1591-1604, 2008.

LAM, J. C.; LI, D. H. W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. **Building and Environment**, v. 31, p. 527-535, 1996.

LI, H. *et al.* Estimating monthly average daily diffuse solar radiation with multiple predictors: a case study. **Renewable Energy**, v. 36, p. 1944-1948, 2011.

LI, H. *et al.* Further investigation of empirically derived models with multiple predictors in estimating monthly average daily diffuse solar radiation over China. **Renewable Energy**, v. 44, p. 469-473, 2012.

LI, M. F. *et al.* General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. **Energy Conversion and Management**, v. 70, p. 139-148, 2013.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p. 1-19, 1960.

LIU, D. L.; SCOTT, B. J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n. 1, p. 41-59, 2001.

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.

LUHANGA, P. V. C.; ANDRINGA, J. Characteristics of solar radiation at Sebele, Gaborone, Botswana. **Solar Energy**, v. 44, p. 77-81, 1990.

MAKADE, R. G.; JAMIL, B. Statistical analysis of sunshine based global solar radiation (GSR) models for tropical wet and dry climatic Region in Nagpur, India: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 87, p. 22-43, 2018.

MARQUES FILHO, E. P. *et al.* Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling. **Renewable Energy**, v. 91, p. 64-74, 2016.

MARWAL, V. K. *et al.* A comparative study of correlation functions for estimation of monthly mean daily global solar radiation for Jaipur, Rajasthan (India). **Indian Journal of Science and Technology**, v. 5, p. 2729-2732, 2012.

MECIBAH, M. S. *et al.* Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 36, p. 194-202, 2014.

MEDEIROS, F. J.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G. Calibration of Ångström-Prescott Equation to Estimate Daily Solar Radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 409-461, 2017.

MOHAMMADI, K. *et al.* Support vector regression based prediction of global solar radiation on a horizontal surface. **Energy Conversion and Management**, v. 91, p. 433-441, 2015.

MUNEER, T.; GUL, M. S. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. **Energy Conversion and Management**, v. 41, n. 5, p. 461-482, 2000.

NWOKOLO, S. C.; OGBULEZIE, J. C. A qualitative review of empirical models for estimating diffuse solar radiation from experimental data in Africa, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 92, p. 353-393, 2018.

OLIVEIRA, A. P.; MACHADO, A. J.; ESCOBEDO, J. F. A New Shadow-Ring Device for Measuring Diffuse Solar Radiation at the Surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 698-708, 2002.

OLIVEIRA, A. P. *et al.* Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of Sao Paulo, Brazil. **Applied Energy**, v. 71, p. 59-73, 2002.

- 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.
- PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, v. 64, p. 114-125, 1940.
- RAJA, I. A.; TWIDELL, J. W. Distribution of global insolation over Pakistan. **Solar Energy**, v. 44, p. 63-71, 1990.
- RANIERO, M. R. *et al.* Software for automated reading of sunshine duration by Digital Image Processing. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 9, p. 1599-1605, 2021.
- RANIERO, M. R. **SunCounter: Programa computacional para contagem automatizada de horas de brilho solar registradas por heliógrafos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.
- RENSHENG, C. *et al.* Estimating daily global radiation using two types of revised models in China. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 7-8, p. 865-878, 2006.
- RENSHENG, C. *et al.* Estimation of horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China. **Renewable Energy**, v. 29, p. 717-726, 2004.
- 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.
- SABZPOOSHANI, M.; MOHAMMADI, K. Establishing new empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation in city of Isfahan, Iran. **Energy**, v. 69, p. 571-577, 2014.
- SANCHEZ-LORENZO, A. *et al.* New insights into the history of the Campbell-Stokes sunshine recorder. **Weather**, v. 68, p. 327-331, 2013.
- SGARBOSSA, C. K.; VIRGENS FILHO, J. S. Estimation of daily global solar irradiance from the air temperature in the state of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 512-519, 2020.
- SONG, Z. *et al.* General models for estimating daily and monthly mean daily diffuse solar radiation in China's subtropical monsoon climatic zone. **Renewable Energy**, v. 145, p. 318-332, 2020.
- SOUZA, A. P. *et al.* Diurnal Evolution and Estimates of Hourly Diffuse Radiation Based on Horizontal Global Radiation, in Cerrado-Amazon Transition, Brazil. **Atmosphere**, v. 14, p. 1289, 2023.

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.

SPENCER, J. W. A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation, **Solar Energy**, v. 29, p. 19-32, 1982.

SRIVASTAVA, R. C.; PANDEY, H. Estimating Angstrom-Prescott coefficients for India and developing a correlation between sunshine hours and global solar radiation for India. **International Scholarly Research Notices Renewable Energy**, v. 1, p. 1-7, 2013.

SUTHAR, M.; SINGH, G. K.; SAINI, R. P. Effects of air pollution for estimating global solar radiation in India. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 36, n. 1, p. 20-27, 2014.

TAHIR, Z. R. *et al.* Estimation of daily diffuse solar radiation from clearness index, sunshine duration and meteorological parameters for different climatic conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 47, p. 101544, 2021.

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.

TRABEA, A. A. A multiple linear correlation for diffuse radiation from global solar radiation and sunshine data over Egypt. **Renewable Energy**, v. 17, p. 411-420, 1999.

TRNKA, M. *et al.* Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formula. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 54-76, 2005.

ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Solar radiation models. Part 2: comparison and developing new models. **Energy Sources**, v. 26, p. 521-530, 2004.

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

VEERAN, P. K.; KUMAR, S. Analysis of monthly average daily global radiation and monthly average sunshine duration at two tropical locations. **Renewable Energy**, v. 3, p. 935-939, 1993.

WAN, K. K. W. *et al.* An analysis of thermal and solar zone radiation models using an Angstrom-Prescott equation and artificial neural networks. **Energy**, v. 33, p. 1115-1127, 2008.

WANG, Y. *et al.* A review on sunshine recorders: Evolution of operation principle and construction. **Measurement**, v. 186, p. 110138, 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. Geneva: World Meteorological Organization, n. 8, 2021.

WU, G.; LIU, Y.; WANG, T. Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data: A case study in Nanchang station, China. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p. 2447-2452, 2007.

XIAO, T. *et al.* Life cycle assessment of the solar thermal power plant integrated with air-cooled supercritical CO₂ Brayton cycle. **Renewable Energy**, v. 182, p. 119-133, 2022.

YACEF, R. *et al.* New combined models for estimating daily global solar radiation from measured air temperature in semi-arid climates: application in Ghardaïa, Algeria. **Energy Conversion and Management**, v. 79, p. 606-615, 2014.

YANG, K.; KOIKE, T. Estimating surface solar radiation from upper-air humidity. **Solar Energy**, v. 72, n. 2, p. 177-186, 2002.

YANIKTEPE, B.; GENÇ, Y. A. Establishing new model for predicting the global solar radiation on horizontal surface. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, p. 15278-15283, 2015.

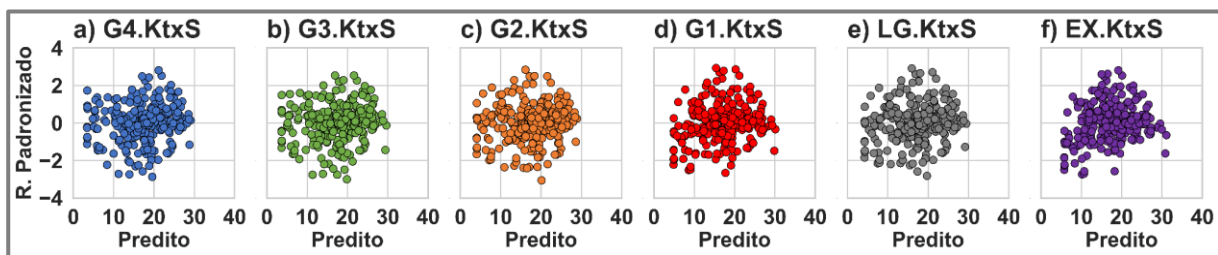
YOHANNA, J. K.; ITODO, I. N.; UMOGBAI, V. I. A model for determining the global solar radiation for Makurdi, Nigeria. **Renewable Energy**, v. 36, p. 1989-1992, 2011.

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.

APÊNDICE A - Resíduos dos modelos de irradiação solar global

A dispersão entre os valores preditos dos modelos empíricos de Hg e os resíduos padronizados é apresentada na Figura A1.

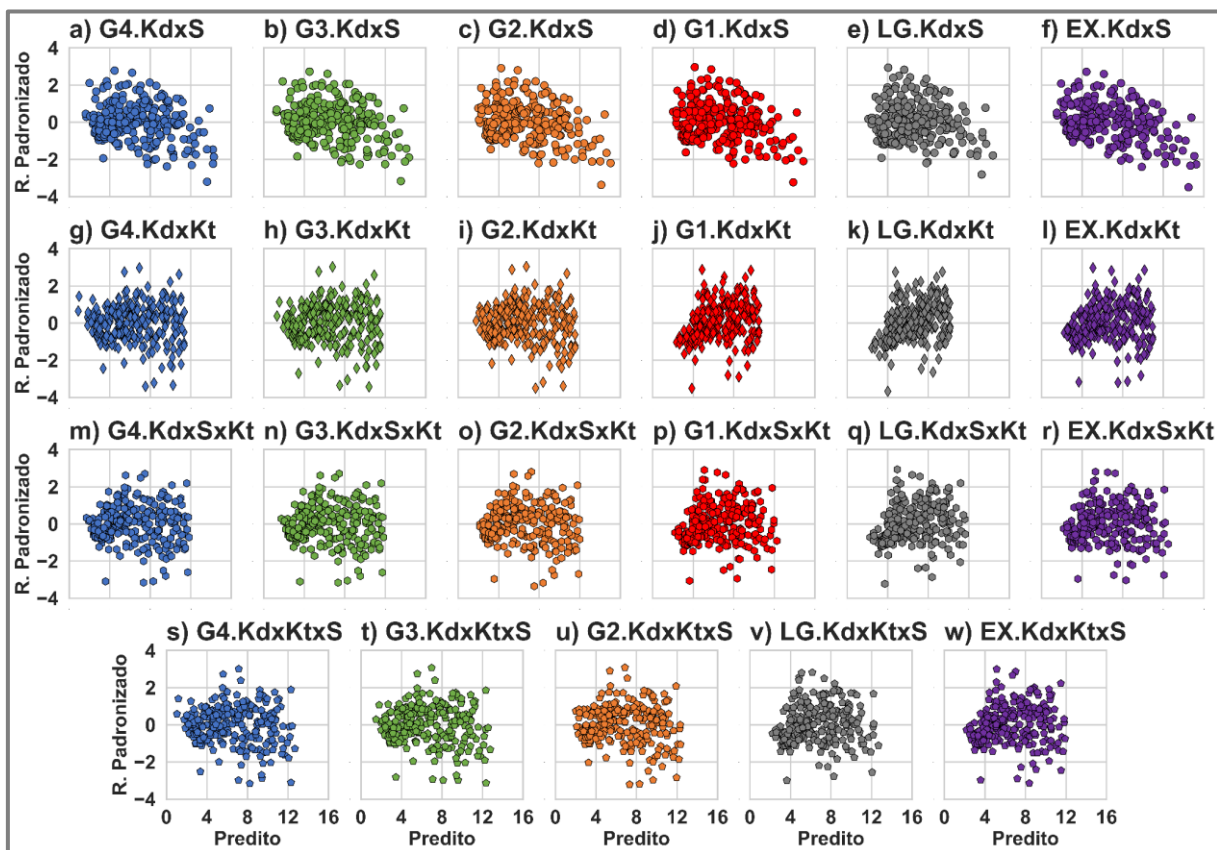
Figura A1 - Dispersão entre os valores preditos de Hg e resíduos padronizados (dados de treinamento)



APÊNDICE B - Resíduos dos modelos de irradiação solar difusa

A dispersão entre os valores preditos dos modelos empíricos de H_d e os resíduos padronizados é apresentada na Figura B1.

Figura B1 - Dispersão entre os valores preditos de H_d e resíduos padronizados (dados de treinamento)



APÊNDICE C - Resíduos dos modelos de horas de brilho solar

A dispersão entre os valores preditos dos modelos empíricos de n e os resíduos padronizados é apresentada na Figura C1.

Figura C1 - Dispersão entre os valores preditos de n e resíduos padronizados (dados de treinamento)

