Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA INCIDENTE EM NATAL-RN

Empirical model for estimating direct solar irradiation in Natal, Brazil

Modelo empírico para estimar la radiación solar directa incidente en Natal, Brasil

Magno Luiz Vidotto
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
magnovidotto@outlook.com

Rafael Maia Frenhe
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
rmaia.meteo@gmail.com

Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
reginaldo.santos@unioeste.br

Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
cecn1@yahoo.com.br

Jair Antônio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
jair.siqueira@unioeste.br

Noe Barroso dos Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
noesantos.ea@gmail.com

Agostinho Rodrigues Zitha
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
agostinhorodrigueszitha@gmail.com

Resumo: A radiação solar desempenha um papel crucial em uma infinidade de processos terrestres, que englobam desde fenômenos biológicos à eventos meteorológicos. Seu monitoramento é essencial em estudos agrícolas, na previsão do tempo e em projetos de energia solar. Para aplicações simples, como aquecimento solar de água ou geração de energia elétrica em usinas fotovoltaicas, basta conhecer os níveis de radiação solar global e difusa. Contudo, para os concentradores de energia solar térmica, é necessário conhecer a componente direta da radiação solar, que raramente é medida nas estações meteorológicas devido ao elevado custo dos equipamentos envolvidos. Com base nisso, este estudo buscou desenvolver um modelo logístico para estimar a radiação solar direta incidente no município de Natal-RN a partir das correlações da radiação solar global e difusa com o índice de claridade. Para isso, foram utilizados dois anos de dados provenientes da estação solarimétrica instalada no Centro Regional do Nordeste. O modelo proposto foi validado comparando seu desempenho ao desempenho dos modelos de Erbs e de Bourges por meio dos indicadores estatísticos MBE, RMSE e NSE. Para o modelo logístico, foram obtidos os seguintes resultados: MBE = 0,35%, RMSE = 17,78% e NSE = 96,10%. Concluiu-se que o modelo proposto apresentou forte correlação com os dados observados e o seu desempenho foi superior aos modelos de comparação. O modelo elaborado poderá ser utilizado em simulações de radiação solar direta, desde que os dados de irradiância estejam na partição horária e as características climáticas do local se assemelhem às de Natal.
Palavras-chave: Climatologia Física. Índice de claridade. Energia solar. Estimativa horária.

Abstract: Solar radiation plays a crucial role in a variety of terrestrial processes, ranging from biological phenomena to meteorological events. Its monitoring is essential in agricultural studies, weather forecasting, and solar energy projects. For simple applications, such as solar water heating or electricity generation in photovoltaic power stations, it is sufficient to know the levels of global and diffuse solar radiation. However, for solar thermal concentrators, it is necessary to measure the direct component of solar radiation, which is rarely measured at meteorological stations due to the high cost of the equipment involved. Based on this, the aim of this study was to develop a logistic model to estimate the direct solar radiation in the city of Natal, Brazil, from the correlations between global and diffuse solar radiation with the clearness index. For this purpose, two years of data from the solarimetric station installed at the Northeast Regional Center were used. The proposed model was validated by comparing its performance against the Erbs and Bourges models using the statistical indicators MBE, RMSE, and NSE. For the logistic model, the following results were obtained: MBE = 0.35%, RMSE = 17.78%, and NSE = 96.10%. It was concluded that the proposed model showed a strong correlation with the observed data, achieving a performance slightly superior to the comparison models. The present model may be used in direct solar radiation simulations, as long as the irradiance data is provided on an hourly basis and the climate features of the location are similar to those found in Natal.
Keywords: Physical Climatology. Clearness index. Solar energy. Hourly estimation.

Resumen: La radiación solar desempeña un papel crucial en una variedad de procesos terrestres, que van desde fenómenos biológicos hasta eventos meteorológicos. Su monitoreo es esencial en estudios agrícolas, pronósticos del tiempo y proyectos de energía solar. Para aplicaciones simples, como el calentamiento solar de agua o la generación de electricidad en centrales fotovoltaicas, conocer los niveles de radiación global y difusa es suficiente. Sin embargo, para los concentradores de energía solar, es necesario conocer su componente directa, que rara vez se mide en las estaciones meteorológicas debido al elevado costo de los equipos involucrados. Con base en esto, este estudio buscó desarrollar un modelo logístico para estimar la radiación solar directa incidente en Natal, Brasil, a partir de las correlaciones de la radiación global y difusa con el índice de claridad. Para este fin, se

utilizaron dos años de datos de la estación solarimétrica instalada en el Centro Regional del Noreste. El modelo propuesto fue validado comparando su desempeño con los modelos de Erbs y Bourges mediante los indicadores estadísticos MBE, RMSE y NSE. Para el modelo logístico, se obtuvieron los siguientes resultados: MBE = 0,35%, RMSE = 17,78% y NSE = 96,10%. Se concluyó que el modelo propuesto mostró una fuerte correlación con los datos observados y tuvo un desempeño superior a los modelos de comparación. El modelo podrá ser utilizado en simulaciones de energía solar, desde que los datos de irradiancia estén en la partición horaria y las características climáticas del lugar se asemejen a las de Natal.

Palabras clave: Climatología Física. Índice de claridad. Energía solar. Estimación horaria.

Submetido em: 20/05/2024
Aceito para publicação em: 14/12/2024
Publicado em: 16/12/2024

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar desempenha um papel central como principal fonte de energia em uma infinidade de processos terrestres, que englobam desde os aspectos biológicos, como a fotossíntese e a transpiração das plantas, até eventos meteorológicos, como a formação de tempestades e o aquecimento da atmosfera (Souza *et al.*, 2005). Por conta disso, o monitoramento dos níveis de radiação que incidem sobre a superfície terrestre e de sua flutuação ao longo do tempo é essencial no desenvolvimento de estudos voltados à agricultura, iluminação, conforto térmico, eficiência energética, meteorologia, climatologia física e na análise de viabilidade de projetos relacionados à energia solar (Zamadei *et al.*, 2018; Marques Filho *et al.*, 2016).

Ao contrário das fontes convencionais de energia, a energia solar é caracterizada por sua intermitência temporal e variabilidade espacial, sendo fortemente influenciada pelas condições meteorológicas locais e por fatores astronômicos associados aos movimentos orbitais e de rotação do planeta (Martins *et al.*, 2017; Domínguez-Álvarez *et al.*, 2021). Conforme explica Rondon *et al.* (2020), a atmosfera terrestre atua como um filtro que interfere diretamente nas diferentes parcelas da radiação solar e na quantidade de energia que chega ao solo. Ao atravessar a atmosfera e interagir com seus constituintes, a radiação solar é submetida a processos de reflexão, difusão e absorção. Como resultado, ela chega ao chão de três formas distintas: radiação direta (proveniente diretamente do Sol); radiação difusa (energia solar dispersa pela atmosfera); e radiação global (soma das duas anteriores) (Marin, 2021).

Segundo Echer *et al.* (2006), o vapor de água, as nuvens, os gases atmosféricos, os aerossóis e uma variedade de poluentes interagem com a radiação solar, resultando em processos complexos de absorção, dispersão e reflexão, que modificam seus comprimentos de onda e sua distribuição espectral. Ainda, de acordo com esses autores, a cobertura de nuvens é o fator que mais influencia os processos de absorção e dispersão da energia radiante que atinge a Terra. Por esse motivo, compreender a condição de nebulosidade por meio do índice de claridade atmosférica (Kt) é fundamental para estudos que buscam otimizar o aproveitamento da radiação solar.

O índice de claridade, ou índice de transmissividade atmosférica, é uma medida que relaciona a radiação solar incidente na superfície terrestre com a radiação extraterrestre incidente em um determinado local e momento. Na literatura, o Kt é frequentemente utilizado como um indicador dos processos de absorção e espalhamento da radiação solar (Dal Pai e Escobedo, 2015). Segundo Escobedo *et al.* (2009), valores baixos de Kt sugerem grande presença de nuvens (indicado elevada quantidade de água na atmosfera) ou uma baixa radiação solar global em comparação à extraterrestre. Por outro lado, valores altos de Kt indicam céu claro ou com pouca nebulosidade e estão associados a elevados valores de radiação solar direta.

Apesar da importância desse assunto, o monitoramento da radiação solar, primordial para o desenvolvimento de atividades econômicas que dependem dessa fonte, enfrenta desafios. A maioria das estações meteorológicas brasileiras mede apenas a radiação solar global horizontal, enquanto as componentes direta e difusa são raramente registradas devido ao alto custo dos equipamentos e à complexidade de sua manutenção (Dal Pai e Escobedo, 2007; Ricieri et al., 1999). Nas localidades em que esses dados não estão disponíveis, torna-se necessário o uso de modelos empíricos ou paramétricos para estimar essas frações a partir da radiação global (Yao et al., 2014).

Segundo Boland *et al.* (2013), para aplicações simples, como aquecimento solar de água em residências ou conversão de energia solar em eletricidade em usinas fotovoltaicas estacionárias, o levantamento dos níveis de radiação global e difusa é suficiente. No entanto, para o uso em concentradores de energia solar térmica, é necessário que se conheça a radiação global e a sua fração direta. Por esse motivo, diversos pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de métodos para estimar a componente direta da radiação solar, buscando solucionar os problemas decorrentes da falta de informações e de equipamentos.

Conforme aponta Gomes (2006), os modelos empíricos, considerados mais simples, são representados por equações matemáticas ajustadas aos dados observados por meio de regressão linear ou polinomial enquanto os modelos paramétricos são mais complexos e exigem informações detalhadas sobre as condições atmosféricas locais, como turbidez atmosférica, concentração de ozônio, de aerossóis, de vapor de água, entre outros. Dentre os modelos mais difundidos, estão os do tipo empírico que seguem as correlações entre a fração

difusa (Kd) e o Kt inicialmente propostas por Liu e Jordan em 1960. Entretanto, em 2013, Boland e sua equipe mostraram ser possível estimar a radiação direta a partir de um modelo logístico desenvolvido por eles em 2010 para calcular a fração difusa, abrindo um novo caminho de pesquisa (Boland, Huang e Ridley, 2013). Este artigo busca avançar nesta direção.

O objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo logístico para estimar a radiação solar direta incidente no município de Natal-RN a partir das correlações entre a radiação difusa com o índice de claridade. Além disso, analisou-se o comportamento do índice de claridade na atenuação da fração direta, visando fornecer informações sobre o efeito da nebulosidade na disponibilidade de radiação solar local, indispensáveis em estudos de otimização e desenvolvimento de projetos voltados à energia solar.

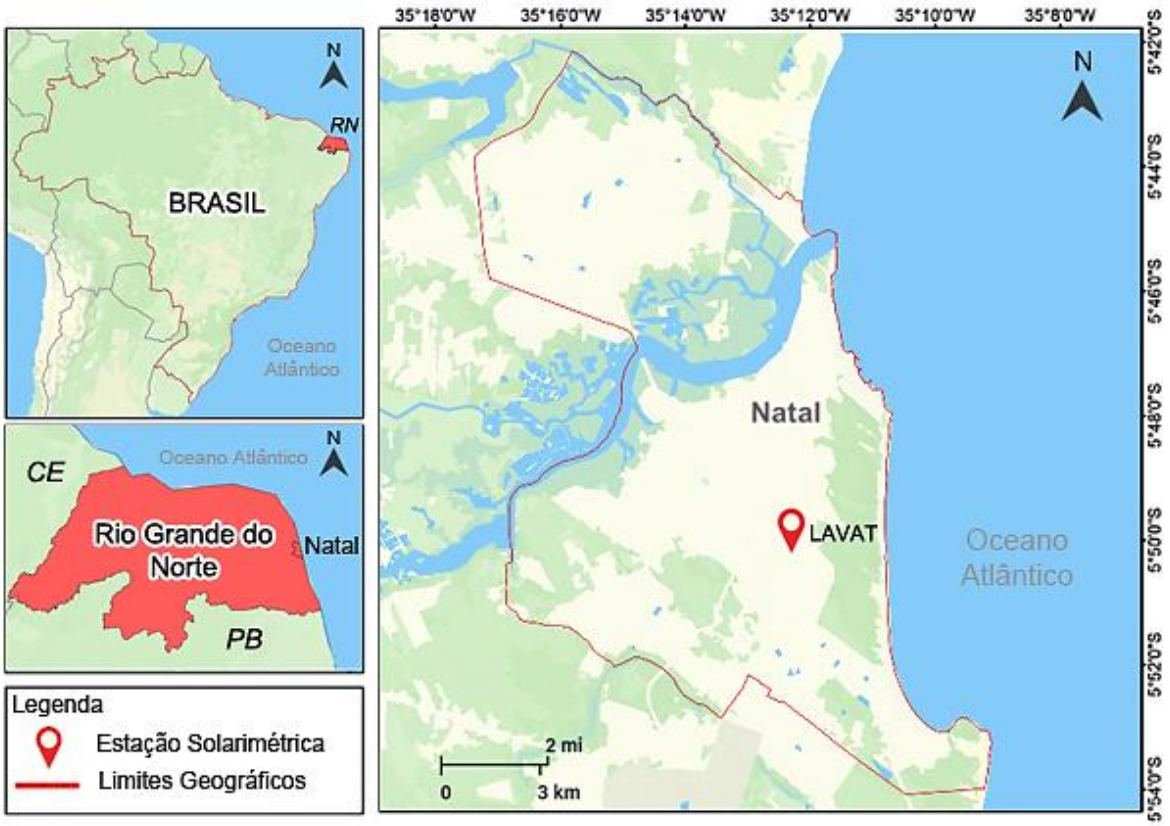
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A cidade de Natal está localizada no litoral do estado do Rio Grande do Norte, em um dos pontos mais orientais da costa do Atlântico Sul, entre as latitudes 5°42'S e 5°54'S e longitudes 35°08'W e 35°18'W (Figura 1). De acordo com a classificação climática de Köppen, seu clima é do tipo tropical chuvoso (As) apresentando chuvas mais intensas no período de outono e inverno, temperaturas médias de 27°C, umidade relativa de 76% e precipitação anual de cerca de 1583 mm (Bezerra *et al.*, 2023).

Conhecida como a "Cidade do Sol", Natal desfruta de cerca de 2184 horas anuais de insolação e de níveis elevados de radiação solar, boa parte difusa, por estar próxima a linha do equador (Silva *et al.*, 2008b). Essas características fazem de Natal um local propício para pesquisas e ações na área de energia solar, o que justifica sua escolha como foco deste estudo. Além disso, o estado do Rio Grande do Norte, situado na região Nordeste do Brasil, se destaca pelo grande potencial de aproveitamento da energia solar, graças à alta incidência de radiação ao longo do ano em seu território (Araujo, Ferreira Neto e Silva, 2022). Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) indicam que o Rio Grande do Norte possui, atualmente, cerca de 1,23 GW de potência solar instalada, além de 9,72 GW em projetos outorgados ou em fase de construção, sinalizando um aumento expressivo na produção de energia solar nos próximos anos (ANEEL, 2024).

Figura 1 - Localização geográfica da cidade de Natal com identificação da estação solarimétrica usada como fonte de dados.



Fonte: Adaptado de Amorim *et al.* (2019).

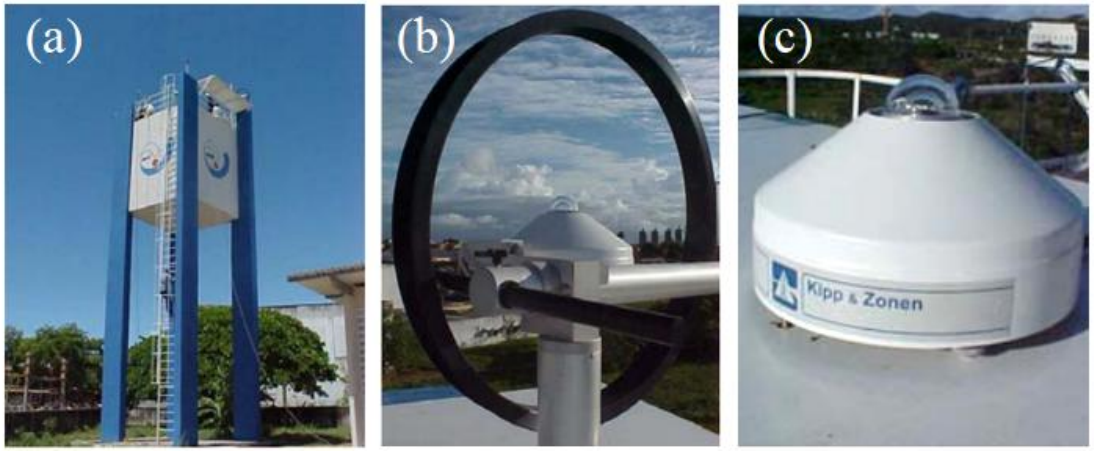
2.2 Base de Dados

No desenvolvimento do presente estudo foram utilizados dados de irradiância global e difusa provenientes da Estação Solarimétrica do Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais (LAVAT) localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Centro Regional do Nordeste. A estação solarimétrica do LAVAT conta com dois piranômetros modelo CM11 da Kipp & Zonen, um com anel de sombreamento para medir a radiação difusa e outro sem anel para medir a radiação global (Figura 2). Ela está montada no topo de uma caixa d'água, a 58m acima do nível do mar, nas coordenadas geográficas 05°50'12"S e 35°12'23"W (Silva *et al.*, 2008a).

Na estação solarimétrica do LAVAT o armazenamento dos valores médios de irradiância solar é feito a cada 1 minuto por um *datalogger* Campbell modelo CR10X (Silva, *et al.*, 2008b). Os dados coletados são disponibilizados de forma gratuita na plataforma online

do Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) pertencente ao INPE (INPE, 2024a).

Figura 2 – Instrumentos da estação solarimétrica de Natal.



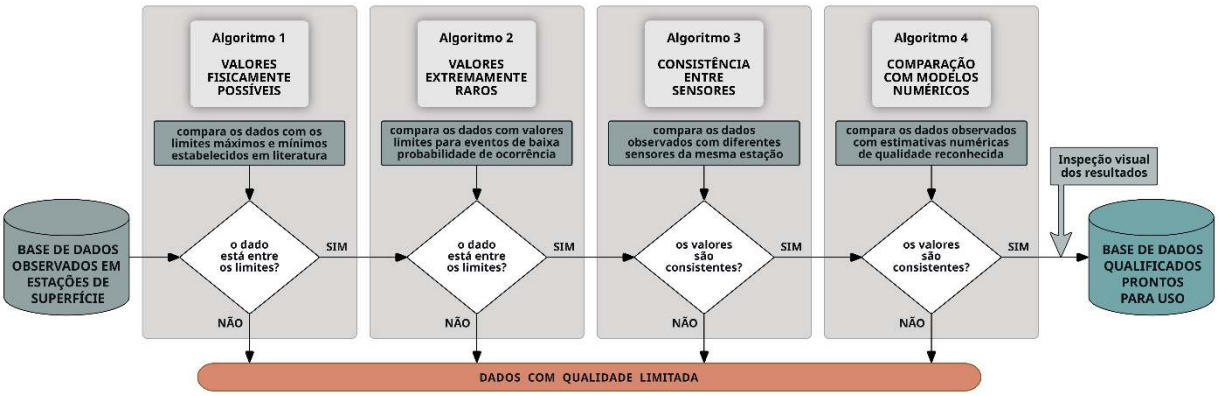
Legenda: (a) Estação Solarimétrica de Natal, (b) piranômetro de radiação difusa e (c) piranômetro de radiação global. **Fonte:** Adaptado de Silva *et al.* (2008b).

Os dados de radiação solar global e difusa utilizados nesta pesquisa cobrem o período de janeiro de 2015 a dezembro de 2016. Esse intervalo foi selecionado por dois motivos: 1) representa o maior período consecutivo com dados completos e ininterruptos, coletados pela estação solarimétrica de Natal e disponibilizados no SONDA; 2) apresenta a menor quantidade de dados perdidos ou classificados como suspeitos pelo algoritmo de validação empregado no SONDA. Em outras palavras, a escolha desse conjunto se deu pela sua baixa incerteza de medição em um número maior de anos de dados. Os dados originais podem ser obtidos pelo *link* disponibilizado na seção de referências do presente artigo.

2.3 Tratamento e Manuseio dos Dados

Antes de serem disponibilizados na rede do SONDA, os dados de irradiância do LAVAT são submetidos a um processo de validação capaz de detectar inconsistências e possíveis erros de coleta. Esse processo segue o protocolo de controle de qualidade de dados da *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN), conforme descrito por Gueymard (2014). O controle de qualidade é composto por quatro etapas progressivamente mais rigorosas, começando com filtros mais simples e finalizando com filtros mais refinados. Esses algoritmos sinalizam quando um dado é considerado suspeito, conforme detalham as etapas do fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo de qualificação dos dados solarimétricos.



Fonte: Paraíba, 2023.

O algoritmo de validação só permite que um dado avance para a próxima etapa após a aprovação na fase anterior. Se o dado não for aprovado, o processo é interrompido, e ele recebe um código indicando suspeita de erro. Caso aprovado, o dado avança e recebe um código de confirmação. É importante ressaltar que o algoritmo utilizado pelo SONDA não corrige os dados, apenas sinaliza possíveis inconsistências, gerando um código de 4 dígitos para cada registro, que pode ser consultado pelos usuários, que decidem sobre a utilização ou não do valor suspeito (INPE, 2024b).

Antes de serem utilizados nesta pesquisa, as medições passaram por uma cuidadosa inspeção visual para assegurar a qualidade do conjunto de dados. Após a análise visual, optou-se por desconsiderar os registros sinalizados como suspeitos pelo algoritmo de validação do SONDA. O percentual de dados considerados suspeitos nas três primeiras etapas, para a radiação difusa de onda curta, foi de 0,58% em 2015 e de 0,66% em 2016. Os zeros absolutos foram excluídos devido a limitação matemática das equações utilizadas.

Após essa filtragem, foram calculadas as médias horárias dados válidos. Em seguida, calculou-se a radiação solar extraterrestre incidente no topo da atmosfera terrestre (I_0), em W/m², por meio das Equações 1 e 2 (Spencer, 1971):

$$I_0 = I_{SC} \cdot (1{,}000110 + 0{,}034221cos(x) + 0{,}001280sen(x) - 0{,}000719\cos(2x) + 0{,}000077sen(2x)) \quad (1)$$

$$x = \frac{2\pi}{365{,}25}(N-1) \quad (2)$$

Em que: I_{SC} é a constante solar (1366,1 W/m²) e N é o dia Juliano.

A partir da estimativa da irradiância extraterrestre e com os dados de irradiância global, em média horária, calculou-se os valores do índice de claridade conforme Equação 3:

$$K_t = \frac{I}{[I_o \cdot \max(0{,}065; \cos(\theta_z))]} \quad (3)$$

Onde: I é a radiação solar global incidente na superfície terrestre (W/m²) e θ_z é o ângulo zenital calculado por meio da Equação 4.

$$cos\theta_z = cos\left(\frac{\phi\pi}{180}\right)cos(\delta)cos\left(\frac{\omega\pi}{180}\right) + sen\left(\frac{\phi\pi}{180}\right)sen(\delta) \quad (4)$$

Onde: ϕ é a latitude local (graus); δ é a declinação solar, em radianos, obtida por meio das relações trigonométricas da Equação 5 definidas por Spencer (1970) e ω é o ângulo horário, em graus, calculado pelas Equações de 6 a 9.

$$\delta = 0{,}006918 - 0{,}399912cos(x) + 0{,}070257sen(x) - 0{,}006758cos(2x) + 0{,}000907sen(2x) - 0{,}002697\cos(3x) + 0{,}001480sen(3x) \quad (5)$$

$$\omega = (LST - 12) \cdot 15 \quad (6)$$

$$LST = LT + \frac{(\lambda - LSTM) \cdot 4 + E_oT}{60} \quad (7)$$

$$LSTM = 15 \cdot \Delta T_{GMT} \quad (8)$$

$$E_oT = 229{,}18 \cdot (0{,}0000075 + 0{,}001868\cos(x) - 0{,}032077sen(x) - 0{,}014615cos(2x) - 0{,}040849\, sen(2x)) \quad (9)$$

Em que: LST é a hora solar; LT é a hora local; λ é a longitude local (graus); $LSTM$ é o meridiano do tempo padrão local; ΔT_{GMT} é a diferença entre o fuso local e o fuso de referência do meridiano de Greenwich e E_oT é a equação do tempo (minutos).

Na sequência, calculou-se os valores da fração direta (K_b) observados na estação solarimétrica de Natal por meio da Equação 10:

$$K_b = 1 - \frac{I_d}{I} \quad (10)$$

Onde: I_d é a irradiância difusa medida na estação solarimétrica (W/m²).

Por fim, a irradiância direta foi calculada por meio da Equação 11:

$$I_b = K_b \cdot I \quad (11)$$

Em que: I_b é a irradiância solar direta (W/m²).

2.4 Determinação dos Coeficientes Empíricos

Após o tratamento e o manuseio dos dados, utilizou-se uma função logística para representar a correlação de Kb em função de Kt. Segundo Boland *et al.* (2013), o uso de uma equação logística é uma boa maneira de se modelar a variação da fração solar direta em relação ao índice de claridade, principalmente em localidades cujas estimativas por meio de modelos polinomiais não se mostram adequadas. Todavia, como não é possível extrair os coeficientes empíricos diretamente da regressão logística, se faz necessário uma adaptação matemática para deixá-la na forma y = ax+b. Tal adaptação foi feita conforme descrevem as Equações de 12 a 14. Normalmente a equação logística se apresenta da seguinte forma:

$$y = \frac{1}{1 + e^{(ax+b)}} \tag{12}$$

Entretanto, para se obter os coeficientes a e b é necessário substituir a equação linear por uma função logarítmica auxiliar conforme expresso na Equação 13:

$$ax + b = ln\left(\frac{1}{y} - 1\right) \tag{13}$$

Ou seja:

$$Y_e = \ln\left(\frac{1}{y} - 1\right) \therefore \; Y_e = ax + b \tag{14}$$

Onde: Y_e é a variável dependente; y é a fração direta (Kb) observada na estação solarimétrica; x é o índice de claridade local (Kt) e a e b são os coeficientes empíricos estimados pela análise de regressão linear. Para evitar a ocorrência de extremos na equação de Y_e foram utilizados apenas valores de Kb ≥ 0,001. Ao todo, foram considerados 7831 pontos na construção do modelo de regressão logística.

Com base nas correlações matemáticas citadas acima, foi gerado um gráfico de Y_e por Kt no software Microsoft Excel 2016 e, através de regressão linear, se obteve os coeficientes a e b. Em posse desses coeficientes empíricos e do índice de claridade local foi possível aplica-los na equação logística para gerar um segundo gráfico mostrando o comportamento da fração direta estimada (K_{be}) em função de Kt, sob referência da fração direta observada (Kb) em função de Kt. Por fim, criou-se um terceiro tipo de gráfico contendo a correlação horária

entre a Irradiância Direta Estimada pelo modelo desenvolvido com a Irradiância Direta Observada na estação solarimétrica do LAVAT.

2.5 Indicadores Estatísticos

Para avaliar a performance do modelo de estimativa horária desenvolvido neste trabalho foram utilizados os indicadores estatísticos MBE (Erro Médio de Estimativa), o RMSE (Erro Quadrático Médio) e a NSE (Eficiência de Nash-Sutcliffe) (Equações 15, 16 e 17). Quanto mais baixos os valores de MBE e RMSE, mais preciso é o modelo, sendo zero a condição perfeita. Para a NSE, quanto mais próxima de 1 melhor é o desempenho do modelo.

$$MBE = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(s_i - o_i)}{m} \cdot 100\% \quad (15)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(s_i - o_i)^2}}{m} \cdot 100\% \quad (16)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{1}^{n}(o_i - s_i)^2}{\sum_{1}^{n}(o_i - m)^2} \quad (17)$$

Em que: o_i representa os valores observados; s_i representa os valores estimados; m é a média dos dados observados e n é o número total de observações.

2.6 Cenários de Nebulosidade

Para analisar a influência da atmosfera na transmissividade da fração direta foram adotados os intervalos/critérios de classificação do índice de claridade definidos por Escobedo *et al.* (2009): I – nublado 0<Kt≤0,35; II – parcialmente nublado 0,35<Kt≤0,55; III – ensolarado 0,55<Kt≤0,65 e IV – muito ensolarado 0,65<Kt≤ 1,0.

2.7 Comparação com Modelos da Literatura

Os resultados obtidos com o modelo de regressão logística elaborado neste trabalho foram comparados, por meio de gráficos e dos indicadores estatísticos apresentados anteriormente, aos resultados obtidos pelos modelos polinomiais de Erbs *et al.* (1982), representado pela Equação 18, e de Bourges (1992), expresso na Equação 19, aplicados à

mesma localidade. Esta comparação permitiu avaliar a eficácia e a precisão do modelo proposto em relação a abordagens já estabelecidas na literatura. Além disso, possibilitou identificar possíveis limitações dos modelos polinomiais quando aplicados em um contexto climático e geográfico diferente daquele de origem.

$$K_b = 1 - \begin{cases} 1 - 0{,}09Kt; & Kt \leq 0{,}22 \\ 0{,}9511 - 0{,}1604Kt + 4{,}388Kt^2 - 16{,}638Kt^3 + 12{,}336Kt^4; & 0{,}22 < Kt \leq 0{,}8 \\ 0{,}165; & Kt > 0{,}8 \end{cases} \quad (18)$$

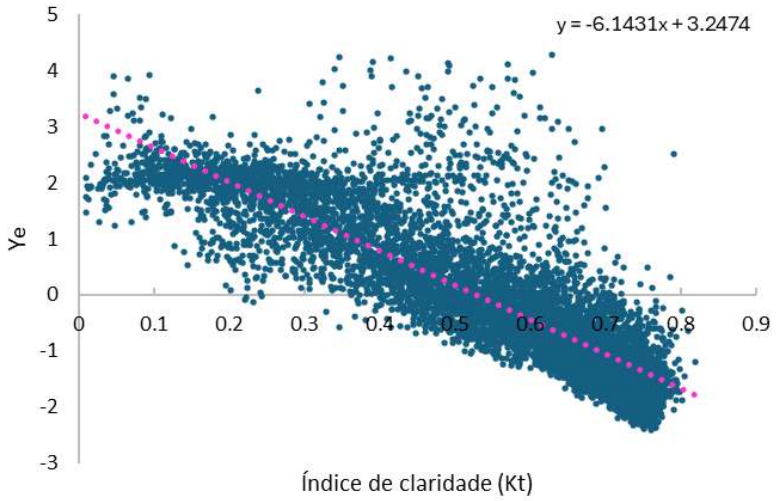
$$K_b = 1 - \begin{cases} 1{,}0; & Kt \leq 0{,}20 \\ 1{,}116 - 0{,}580K_t; & 0{,}20 < Kt \leq 0{,}35 \\ 1{,}557 - 1{,}840K_t; & 0{,}35 < Kt \leq 0{,}75 \\ 0{,}177; & Kt > 0{,}75 \end{cases} \quad (19)$$

O modelo de Erbs foi concebido a partir de correlações entre o índice de claridade e a fração difusa de 5 estações norte-americanas situadas entre as latitudes de 31° e 42°N e é amplamente utilizado no meio científico para estimar a parcela difusa da radiação global a partir do índice de transmissividade. Já o modelo de Bourges foi elaborado com base nos dados de irradiância global e difusa provenientes de 37 estações localizadas em diferentes regiões climáticas da Europa e apresenta ótima precisão na estimativa da fração difusa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 exibe o gráfico com o resultado da manipulação matemática realizada para extrair os coeficientes da reta e aplica-los à equação logística. A equação da reta que mais se adaptou ao conjunto de dados foi: Y_e= -6,1431Kt + 3,2474.

Figura 4 - Correlação entre os valores de Ye e Kt.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Inserindo, na Equação 12, os coeficientes empíricos obtidos com a regressão linear da Figura 4, chegou-se ao modelo de estimativa da fração direta mostrado na Equação 20.

$$K_{be} = \frac{1}{1 + e^{(-6{,}1431K_t + 3{,}2474)}}; \quad 0{,}001 \leq \mathrm{Kt} < 1 \qquad (20)$$

Onde: Kbe corresponde a fração direta estimada pelo modelo (adimensional).

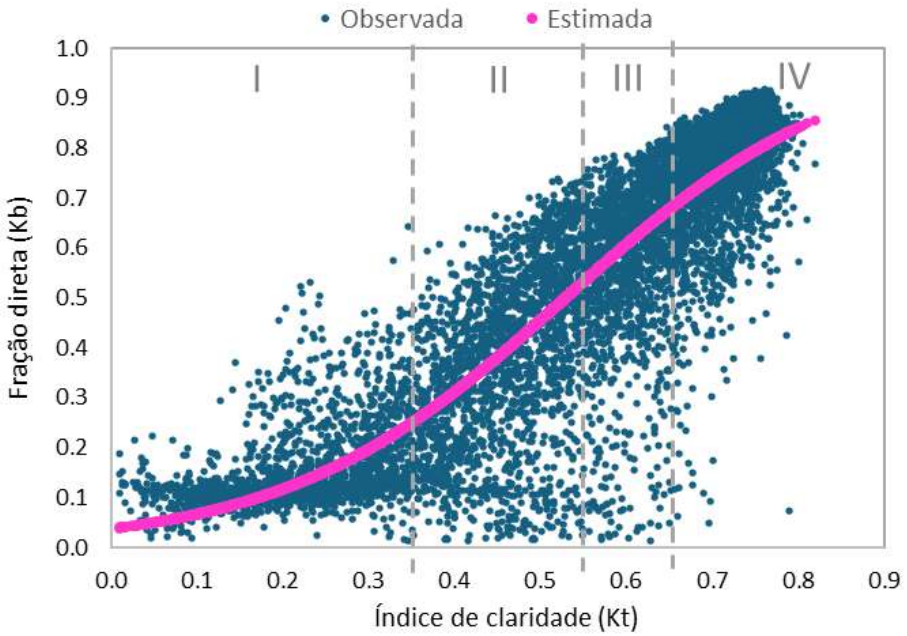
Substituindo a função da variável K_{be} na Equação 11 obteve-se o modelo de estimativa da irradiância direta em função da irradiância global horizontal e do índice de claridade para a localidade em estudo (Equação 21):

$$I_{be} = I \cdot \frac{1}{1 + e^{(-6{,}1431K_t + 3{,}2474)}}; \quad 0{,}001 \leq \mathrm{Kt} < 1 \qquad (21)$$

Em que: I_{be} corresponde à irradiância direta estimada (W/m²).

O gráfico da Figura 5 mostra as correlações horárias entre a fração direta estimada pelo modelo logístico (Kbe) em função de Kt (linha de ajuste rosa) sobrepostas as correlações horárias entre a fração direta observada (Kb) em função de Kt (pontos azuis). Este gráfico foi elaborado com base em 7.831 pontos válidos de médias horárias. Nota-se que o ajuste e a distribuição dos dados seguem um padrão crescente, não linear, semelhante ao padrão apresentado nos trabalhos de López *et al.* (2000), Gomes *et al.* (2007), Escobedo *et al.* (2007), Boland *et al.* (2013) e Lemos *et al.*, (2017).

Figura 5 - Correlações horárias de Kb e de Kbe em função de Kt para Natal.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Na Figura 5, verifica-se que não há correlação logística para valores de Kb e de Kt superiores a 0,82. Conforme observado por Porfirio e Ceballos (2017), é provável que isso ocorra devido a reflexões causadas por aerossóis, dunas de areia e pela proximidade com o mar, visto que a estação solarimétrica de Natal está localizada a menos de 3 km do litoral. Também é possível observar uma atenuação significativa de parte dos valores da fração direta no intervalo de 0,35≤ Kt ≤0,65. De acordo com Gomes *et al.* (2007), o elevado espalhamento da fração direta em sua partição horária se deve a variáveis que são dependentes das condições locais e que não foram contabilizados nessa estimativa. Nesta situação, a fração difusa aumenta consideravelmente, conforme demonstrado em vários estudos envolvendo essa componente (Boland *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2018; Guermoui *et al.*, 2020).

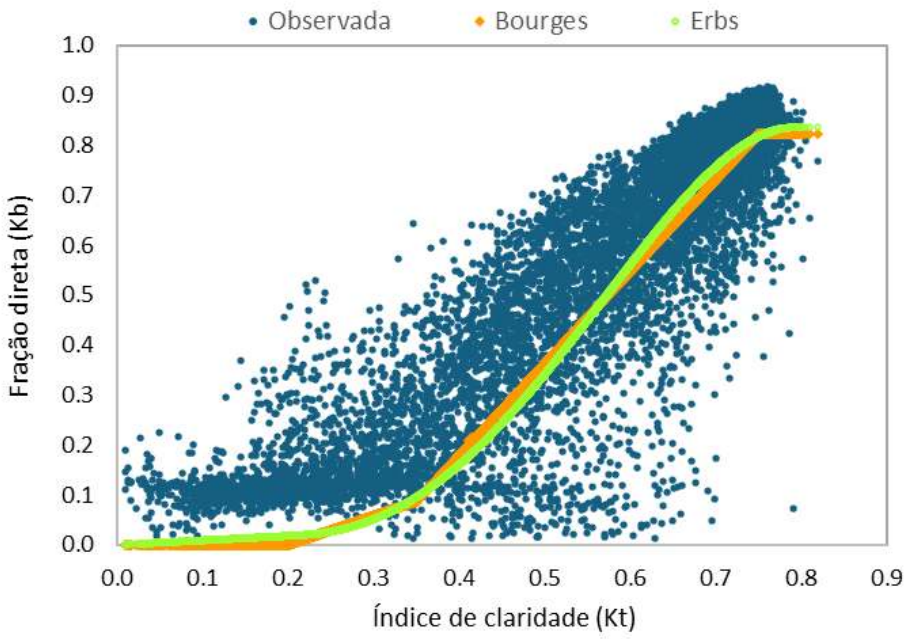
Considerando as categorias de nebulosidade propostas por Escobedo *et al.* (2009), observa-se que no intervalo I (céu muito nublado) a fração direta estimada se mantém próxima de 0, sofrendo uma elevação para 0,25 quando o Kt se aproxima de 0,35. Em condição de alta nebulosidade com predominância de radiação difusa (intervalo II), a Kbe sobe de 0,25 para 0,53. No cenário de baixa nebulosidade do intervalo III, a Kbe tem uma aumento de 0,53 para 0,68. Por fim, na condição de céu aberto com poucas nuvens do intervalo IV, a fração direta estimada se eleva de 0,68 para aproximadamente 0,85, atingindo sua máxima

transmissividade. De modo geral, o modelo elaborado apresenta discrepâncias mais acentuadas em dias de céu parcialmente nublado do que em dias de céu claro e nublados.

A Figura 6 mostra o comportamento horário da fração direta estimada pelos modelos de Erbs (linha verde) e de Bourges (linha laranja) em função de Kt sobrepostos as correlações horárias da fração direta observada em Natal. Percebe-se que os dois modelos apresentam limitações na estimativa de valores menores da fração direta, ou seja, apresentam discrepâncias maiores para dias nublados e parcialmente nublados do que para dias de céu claro.

De acordo com Boland *et al.* (2013), esse é um problema recorrente quando se aplica no Hemisfério Sul modelos de estimativa da radiação direta que foram desenvolvidos para localidades do Hemisfério Norte. Além disso, os dois modelos utilizam dados provenientes de regiões distantes do litoral, o que não é o caso de Natal que está situada em latitude tropical com forte influência do Oceano Atlântico. Nessas mesmas condições, o modelo desenvolvido neste trabalho parece fornecer resultados mais precisos e estáveis.

Figura 6 - Sobreposição de dados observados e de dados estimados pelos modelos de Erbs e de Bourges para a cidade de Natal.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Os resultados apresentados na Tabela 1 corroboram as observações feitas no parágrafo anterior. Nesta tabela, verifica-se que o modelo logístico forneceu estimativas mais próximas dos valores observados na estação solarimétrica do LAVAT, em comparação aos modelos polinomiais.

O modelo desenvolvido tende a superestimar em menos de 1% os valores de Kb, enquanto que os modelos de Erbs e de Bourges subestimam a mesma fração em 3% e 4% respectivamente. Com relação ao RMSE, os três modelos apresentaram valores similares, mostrando que o espalhamento da radiação solar na região é de aproximadamente 18%. Ou seja, a constante presença de nuvens em Natal reduz consideravelmente a quantidade de radiação direta que chega à superfície local, impactando a captação de energia solar.

Tabela 1 - Indicadores estatísticos MBE, RMSE e NSE para Natal

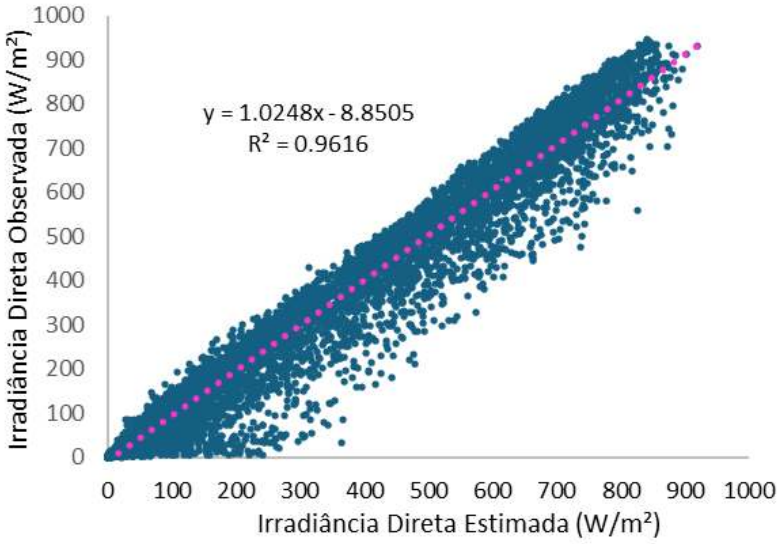
Modelo	MBE (%)	RMSE (%)	NSE (%)
Proposto	+0,35	17,78	96,10
Erbs *et al.* (1982)	-3,06	17,99	96,01
Bourges (1992)	-4,43	17,89	96,05

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

No que diz respeito à Eficiência de Nash-Sutcliffe, os três modelos apresentaram valores de aproximadamente 96%, com uma leve superioridade para o modelo proposto. Com base nesses resultados e nas análises realizadas por Moriasi *et al.* (2007), pode-se afirmar que os três modelos mostraram um ótimo desempenho na estimativa da radiação direta.

A Figura 7 mostra a correlação horária entre os níveis de irradiância estimados pelo modelo sugerido (I_{be}) em função da irradiância observada (I_b) em Natal. Verifica-se que a dispersão dos dados segue uma linha praticamente simétrica com quadrado residual (R^2) igual a 0,9616. Também é possível observar que o ângulo de inclinação da reta é próximo de 1 e o coeficiente de intercepção está relativamente próximo de 0. Isso indica que o modelo sugerido oferece excelente precisão na estimativa da radiação solar direta incidente na localidade, sendo tão preciso quanto os modelos de comparação utilizados neste trabalho.

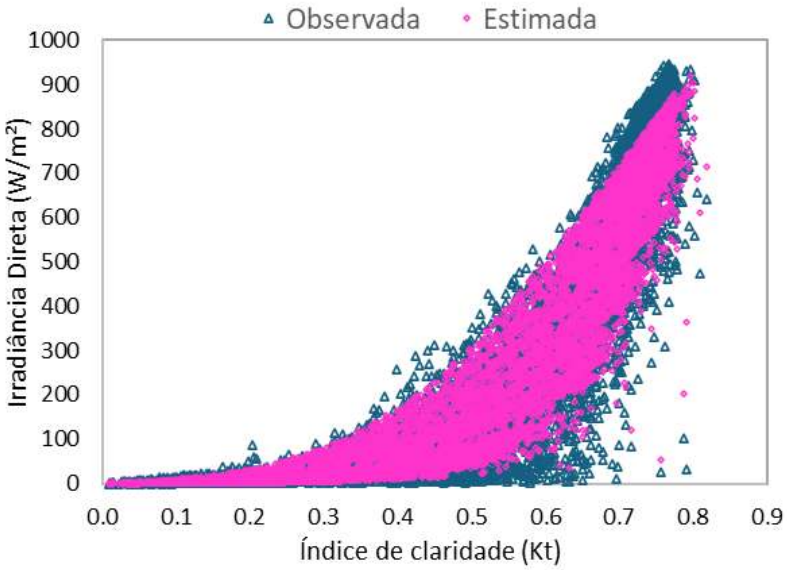
Figura 7 - Correlação horária entre a Irradiância Direta Observada e Estimada em Natal.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A correlação mostrada na figura anterior pode ser melhor visualizada no gráfico da Figura 8. Este gráfico apresenta a sobreposição da irradiância direta, estimada pelo modelo desenvolvido neste trabalho, aos dados observados na estação solarimétrica de Natal. Verifica-se, claramente, que o modelo proposto consegue se ajustar de forma satisfatória ao espalhamento e flutuação presentes nos dados horários de irradiância.

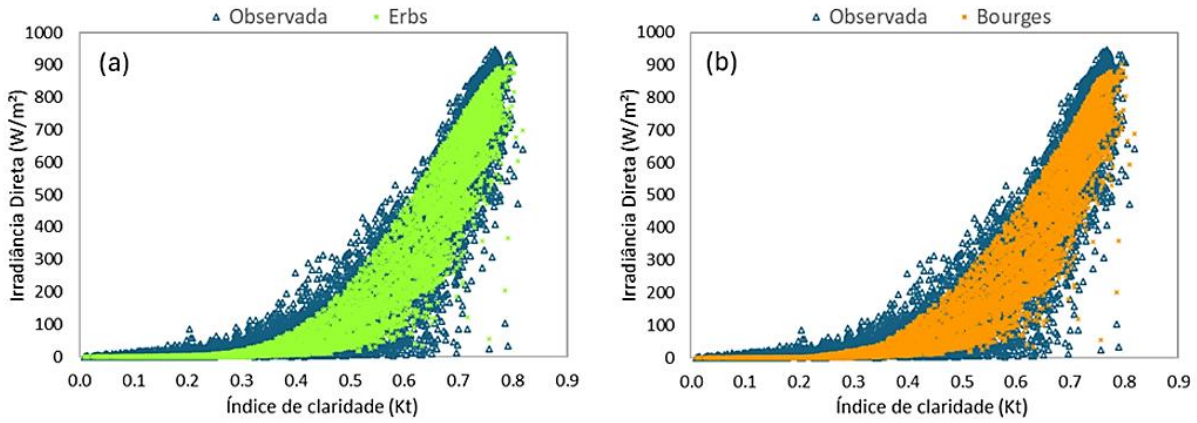
Figura 8 - Sobreposição de I_{be} e I_b em função de Kt para Natal.



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Por fim, os gráficos da Figura 9 exibem a sobreposição da irradiância observada e da irradiância estimada pelos modelos de Erbs e de Bourges, em função de Kt, para Natal. Observa-se que os referidos modelos possuem bom grau de generalização e demonstram um comportamento adequado aos dados, porém não são tão precisos quanto o modelo logístico apresentado na figura anterior.

Figura 9 - Sobreposição de irradiância direta observada e de irradiância estimada, em média horária, para Natal.



Legenda: Modelos de Erbs (a) e de Bourges (b) em função de e Kt.
Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste artigo, pode-se concluir que o modelo logístico aqui desenvolvido apresentou um padrão compatível com modelos difundidos na literatura. A análise dos indicadores estatísticos RMSE, MBE e NSE, revelou uma forte correlação entre o modelo proposto e os dados observados, superando ligeiramente o desempenho dos modelos de comparação polinomiais. Já a análise do índice de claridade mostrou que a constante presença de nuvens na atmosfera de Natal, devido à proximidade com o mar, reduz consideravelmente a radiação direta incidente na superfície local, podendo impactar na captação de energia solar.

Embora esta pesquisa tenha utilizado apenas dois anos de dados, todas as medições foram validadas com base no protocolo de controle de qualidade adotado pela BSRN, o que possibilitou obter um conjunto de dados com baixa incerteza de medição. Entretanto, é

importante destacar que séries temporais mais longas poderiam aumentar a precisão e a confiabilidade dos resultados, especialmente diante de variações interanuais provocadas por eventos climáticos atípicos. A ampliação da série de dados em estudos futuros reforçaria ainda mais a robustez do modelo desenvolvido.

Como sugestão de trabalho futuro, recomenda-se a elaboração de um modelo logístico para estimar a radiação solar direta no município de Caicó-RN, situado a 272 km de Natal. Apesar da estação solarimétrica de Caicó dispor de um número limitado de medições, os dados existentes se referem à radiação direta normal. Isso permitiria, pela proximidade dos municípios, uma comparação direta com o modelo proposto neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **SIGA - Sistema de Informações de Geração - Resumo Estatal do Rio Grande do Norte**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao. Acesso em: 09 out. 2024.

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A. Variabilidade dos Extremos de Precipitação Diária na Cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências** – UFRJ, v.42, n.4, p.284-295, 2019. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_4_284_295.

ARAUJO, P. A. A.; FERREIRA NETO, J. A.; SILVA, T. G. Comparação estatística da irradiação solar incidente entre as cidades de Natal/RN e Apodi/RN durante o verão. In: IX Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. 2022. Florianópolis, SC. **Anais** [...], 2022. DOI: https://doi.org/10.59627/cbens.2022.1234.

BEZERRA, A. P.; MEDEIROS, L. R. A; CUNHA, A. L. X.; SILVA, M. T.; SANTANA, C. F. D. Modelagem preditiva da precipitação para análise das inundações e suas consequências no município de Natal-RN. **Revista Geama**, v.9, n.1, p.29-41, 2023. Disponível em: https://journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/5293/482484877. Acesso em: 18 mai. 2024.

BOLAND, J.; HUANG, J.; RIDLEY, B. Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.28, p.749-756, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.023.

BOLAND, J.; RIDLEY, B.; BROWN, B. Models of diffuse solar radiation. **Renewable Energy**, v.33, n.4, p.575-584, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.012.

BOURGES, B. **Climatic data handbook for Europe: climatic data for the design of solar energy systems**. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 295p. 1992. Disponível em: https://link.springer.com/book/9780792317166. Acesso em: 18 mai. 2024.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Modelo de estimativa anisotrópica da radiação solar difusa horária, diária e mensal. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar CBENS, 2007. Fortaleza, **Anais** [...], 2007. DOI: https://doi.org/10.59627/cbens.2007.1299.

DAL PAI, E.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da radiação atmosférica em função dos índices radiométricos Kt e Kd para Botucatu-SP. **Energia na agricultura**, v.30, n.2, p172-179, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n2p172-179.

DOMÍNGUEZ-ÁLVAREZ, A.; DE-TENA-REY, M.-T.; GARCÍA-MORUNO, L. Modelling global solar radiation to optimise agricultural production. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.19, n.1, p. e0201-e0201, 2021. DOI: https://doi.org/10.5424/sjar/2021191-16813.

ECHER, M. P.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.28, p.341-352, 2006. DOI: https://doi.org/10.1590/S1806-11172006000300011.

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, n.4, p.293-302, 1982. DOI: https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90302-4.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; FURLAN JÚNIOR, C. R.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Estimativa das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (Kt) e razão de insolação (n/N). In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2007. Fortaleza. **Anais** [...], 2007. DOI: https://doi.org/10.59627/cbens.2007.1315.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Oxford, v.86, n.3, p.299-309, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013.

FAN, J.; HUANG, Q.; SUMNER, D. M.; WANG, D. A simple method for partitioning total solar radiation into diffuse/direct components in the United States. **International journal of green energy**, v.15, n.9, p.497-506, 2018. DOI: https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1484357.

GOMES, E. N. **Medidas e modelos de estimativa da radiação direta na incidência**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, SP. 97p. 2006. DOI: http://hdl.handle.net/11449/103457.

GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J. F.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Estimativa da radiação direta na incidência horária, diária e mensal em função do índice de claridade (Kt). In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS, 2007. Fortaleza. **Anais** [...], 2007. DOI: https://doi.org/10.59627/cbens.2007.1309.

GUEYMARD, C. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.39, p.1024-1034, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117.

GUERMOUI, M.; BOLAND, J.; RABEHI, A. On the use of BRL model for daily and hourly solar radiation components assessment in a semiarid climate. **The European Physical Journal Plus**, v.135, n.2, p.1-16, 2020. DOI: https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-019-00085-0.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Dados da estação solarimétrica de Natal.** SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, 2024a. Disponível em: https://sonda.ccst.inpe.br/basedados/natal.html. Acesso em: 09 out. 2024.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Processo de validação dos dados**. SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, 2024b. Disponível em: https://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html. Acesso em: 10 out. 2024.

LEMOS, L. F.; STARKE, A. R.; BOLAND, J., CARDEMIL, J. M.; MACHADO, R. D.; COLLE, S. Assessment of solar radiation components in Brazil using the BRL model. **Renewable energy**, v.108, p.569-580, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.077.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v.3, n.4, p.1-19, 1960. DOI: https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1.

LÓPEZ, G.; RUBIO, M. A.; BATLLES, F. J. Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain. **Renewable Energy**, v.21, n.2, p.175-186, 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00121-4.

MARIN, F. R. **Microclimatologia Agrícola: Uma Introdução Biofísica da Relação Planta-Atmosfera**. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz – FEALQ. Piracicaba, SP. 263p. 2021.

MARQUES FILHO, E. P.; OLIVEIRA, A. P.; VITA, W. A.; MESQUITA, F. L.; CODATO, G.; ESCOBEDO, J. F.; CASSOL, M.; FRANÇA, J. R. A. 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. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.040.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. DOI: http://doi.org/10.34024/978851700089.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. v.50, n.3, p.885-900. 2007. DOI: http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153.

PARAÍBA. SEIRH - Secretaria de Estado da Infraestrutura e dos Recursos Hídricos. **Atlas solarimétrico da Paraíba**. Cachoeira Paulista, SP: Centro de Gestão de Pesquisa,

Desenvolvimento e Inovação - CGPDI, 82p. 2023. Disponível em: https://atlassolar.pb.gov.br/atlas-pt/metodologia-pt.html. Acesso em: 10 out, 2024.

PORFIRIO, A. C.; CEBALLOS, J. C. A method for estimating direct normal irradiation from GOES geostationary satellite imagery: Validation and application over Northeast Brazil. **Solar Energy**, v.155, p.178-190, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.096.

RICIERI, R. P.; SANTOS, R. F.; SILVA, S. L.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da radiação solar difusa em função do índice de claridade. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Florianópolis. **Anais** [...], Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. 7p. Disponível em: https://sbagro.org/files/biblioteca/305.pdf. Acesso em: 18 mai. 2024.

RONDON, A. C. B.; DUCATI, J. R.; HAAG, R. Análise anual das componentes direta, difusa e global da radiação solar em Porto Alegre, RS. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS, 2020. Fortaleza. **Anais** [...], 2020. DOI: https://doi.org/10.59627/cbens.2020.727.

SILVA, F. R.; CARVALHO, M. J. M.; PEDRINI, A.; SILVA, F. M.; DUARTE, R. N. C.; CABÚS, R. C.; OLIVEIRA, H. S. M.; MARINHO, G. S. Implantação da estação solarimétrica de Natal - RN. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Florianópolis. **Anais** [...], p.1-10. 2008a. DOI: https://doi.org/10.59627/cbens.2008.1602.

SILVA, F. R.; OLIVEIRA, H. S. M.; MARINHO, G. S. Análise das componentes global e difusa da radiação solar em Natal-RN entre 2007 e 2008. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES. Florianópolis. **Anais** [...], 2008b. Disponível em: https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1334. Acesso em: 18 mai. 2024.

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v.30, p.1203–1220. 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.013.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, v.2, n.5, p.172, 1971.

YAO, W.; LI, Z.; LU, Y.; JIANG, F.; LI, C. New Models for Separating Hourly Diffuse and Direct Components of Global Solar Radiation. Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 261, 2014. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-39584-0_72.

ZAMADEI, T.; SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; ALMEIDA, F. T. Estimativas da radiação difusa diária com base na transmissividade atmosférica e insolação da transição Cerrado-Amazônia. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.23, 2018. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v23i0.48354.