



LUIZ GUILHERME PRINCE MARCONDES

**Efeito lente produzido por nuvens no estado do Maranhão:  
implicações para a energia solar.**

Itajubá - MG

Fevereiro/2023



LUIZ GUILHERME PRINCE MARCONDES

**EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NO ESTADO DO  
MARANHÃO: IMPLICAÇÕES PARA A ENERGIA SOLAR.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia do Instituto de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu

Coorientador: Prof. Dr. Ramon Moraes de Freitas

Itajubá - MG

Fevereiro/2023

Luiz Guilherme Prince Marcondes

Efeito lente produzido por nuvens no estado do Maranhão: implicações para a energia solar./ Luiz Guilherme Prince Marcondes. – Itajubá - MG, Fevereiro/2023-  
92 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu  
Coorientador: Prof. Dr. Ramon Moraes de Freitas

Monografia (Pós Graduação) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI  
Campus Itajubá

Pós Graduação Engenharia de Energia, Fevereiro/2023.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. 2. Palavra-chave3. I. Orientador. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Campus Itajubá. IV. Título

LUIZ GUILHERME PRINCE MARCONDES

**EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NO  
ESTADO DO MARANHÃO: IMPLICAÇÕES PARA A  
ENERGIA SOLAR.**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia, pela Universidade Federal de Itajubá, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Itajubá - MG, 13 de Fevereiro de 2023:

---

**Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu**

Orientador

Universidade Federal de Itajubá

---

**Dr. Ramon Moraes de Freitas**

Coorientador

Camargo Schubert

---

**Prof. Dr. Fernando Ramos Martins**

Avaliador externo

Universidade Federal de São Paulo

---

**Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho**

Avaliador interno

Universidade Federal de Itajubá

# AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados à minha família, meus orientadores, professores e amigos de trabalho do projeto EOSOLAR.

Agradecimentos à ANEEL, Gera Maranhão S.A. e Equatorial Energia S.A. (PD-00037-0042/2020), pelo financiamento ao Projeto EOSOLAR. Também ao CNPq e ao Instituto Nacional em Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF) pelo apoio.

*“O Universo, como já foi dito anteriormente, é um lugar  
desconcertantemente grande, um fato que, para continuar levando  
uma vida tranquila, a maioria das pessoas tende a ignorar.”*

*(Douglas Adams, Guia do Mochileiro das Galáxias)*

# RESUMO

Neste trabalho, o fenômeno do efeito lente produzido por nuvens, tido como um evento de intensificação de irradiância solar que atinge a superfície foi estudado usando dados de piranômetros e imagens de satélite em uma região costeira do Maranhão durante 382 dias de medições entre novembro de 2021 e dezembro de 2022. O método de Controle de Qualidade aplicado aos dados dos piranômetros permitem filtrar dados com desconfiança atrelados a incertezas das medições para uma correta detecção do efeito. Verificou-se que o fenômeno produziu irradiância adicional acima da constante solar em 31 dias distintos. A maior irradiância detectada foi de  $1565,9 \text{ W/m}^2$  e, em alguns casos, eventos que excederam  $1200 \text{ W/m}^2$  duraram desde alguns segundos até 7,6 minutos, o que poderia representar um risco para sistemas fotovoltaicos subdimensionados. O uso de imagens de satélites geoestacionários e o conceito de gradiente adiabático atmosférico foram utilizados para estimativa de altitude de topo de nuvens e revelou que estes eventos foram causados por nuvens de baixo e médio nível, variando de 2 a 8 km de altitude de topo. Os resultados sugerem que nuvens podem ter um impacto significativo na produção de energia solar ao aumentar significativamente os níveis de irradiância e devem ser levadas em consideração em estudos futuros e na modelagem do potencial de energia solar e sua importância considerada no projeto e operação de sistemas fotovoltaicos no Maranhão.

**Palavras-chave:** Efeito Lente. Sensoriamento Remoto. Altitude do topo da nuvem.

# ABSTRACT

In this work, the cloud enhancement effect produced by clouds as an intensification event of solar irradiance reaching the surface was studied using pyranometer data and satellite imagery in a coastal region of Maranhão during 382 days of measurements between November 2021 and December 2022. The Quality Control method applied to the pyranometer data allows the filtering of unreliable data linked to measurement uncertainties for a correct detection of the effect. The phenomenon was found to produce additional irradiance above the solar constant on 31 different days. The highest irradiance detected was  $1565.9 \text{ W/m}^2$ , and in some cases events exceeding  $1200 \text{ W/m}^2$  lasted from a few seconds up to 7.6 minutes, which could represent a risk for undersized photovoltaic systems. The use of geostationary satellite imagery and the atmospheric lapse rate concept were used for cloud top height estimation and revealed that these events were caused by low- and mid-level clouds, ranging from 2 to 8 km cloud top height. The results suggest that clouds can have a significant impact on solar energy production by significantly increasing irradiance levels and should be taken into consideration in future studies and modeling of solar energy potential and their importance considered in the design and operation of photovoltaic systems in Maranhão.

**Keywords:** Cloud enhancement. Remote Sensing. Cloud Top Height.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Histograma do índice de céu limpo ( $\kappa$ ) medindo irradiância global horizontal (GHI) em intervalos de 1 segundo durante 401 dias em Oahu, Havaí, nos Estados Unidos. . . . .	18
Figura 2 – Dados registrados na Universidade da Califórnia, usando modelo de céu limpo de Ineichen (tracejado). . . . .	19
Figura 3 – (a) <i>frame</i> da captura em vídeo do ELPN e (b) inspeção da intensidade de pixels para o canal vermelho da imagem. . . . .	20
Figura 4 – Perfil de irradiância para Água Branca, em Alagoas: (a) dia de céu limpo, (b) dia parcialmente nublado e (c) dia nublado. . . . .	21
Figura 5 – Céu durante um evento ELPN extremo com GHI igual a $1643W/m^2$ , medido em Brotas de Macaúbas no estado da Bahia. . . . .	23
Figura 6 – Períodos de tempo máximos de irradiação para verão de 2004. . . . .	24
Figura 7 – Frequência de distribuição com relação à fração de nuvens nos períodos de intensificação maiores que 300 (a), 200 (b), 100 (c), e $40 W/m^2$ (d) no verão de 2004 em Sylt, Alemanha. . . . .	25
Figura 8 – Distribuição de frequência do ângulo zenital solar nos períodos de intensificação da irradiância solar global, excedendo a referência de céu limpo de 1 a 10%, no verão de 2004. . . . .	26
Figura 9 – Ilustração do momento em que o fusível de um sistema FV foi queimado por conta de corrente em excesso causado por ELPN extremos. . . . .	28
Figura 10 – Controle de Qualidade aplicado para um ano (2016) na estação de Boulder. O GHI medido pelo piranômetro é representado pelas linhas vermelhas. Os eventos possivelmente causados pelo ELPN são marcados na cor verde e os dados errôneos devido a inconsistência são marcados com azul. A referência de céu limpo é representada pelas linhas tracejadas pretas. . . . .	31
Figura 11 – Gradeamento de satélites geoestacionários ao longo da longitude planetária em uma série histórica (Gridsat-B1) . . . . .	33
Figura 12 – Esquematização dos passos para o modelo de parâmetros BRASIL-SR . . . . .	37
Figura 13 – Localização geográfica e modelo digital de elevação do estado do Maranhão e regiões adjacentes. O ponto P1 indica o local da instalação da estação meteorológica e do rastreador solar. . . . .	40
Figura 14 – 1: <i>Solys2 Sun Tracker</i> ; 2: Estação Meteorológica. Equipamentos instalados na costa maranhense (Ponto P1) durante a campanha de pesquisa. . . . .	44
Figura 15 – Estrutura do conjunto de dados para os dados do <i>GridSat-B1</i> . . . . .	47

Figura 16 – Fluxograma de passos para obtenção do produto de cobertura de nuvens pelo método de condição de restrição dos dados GridSat-B1 . . . . .	48
Figura 17 – Metodologia empregada para a identificação da altitude de topo de nuvens em momentos de ELPN em alguns passos. . . . .	49
Figura 18 – Grade de 2x2 pixels (4x4 km) acima do ponto P1 é selecionado. . . . .	50
Figura 19 – Passo a passo para obtenção dos dados do piranômetro (1), do modelo de céu limpo (2) e aplicação do Controle de Qualidade e correta Detecção de ELPN nos dados (3). . . . .	52
Figura 20 – (a) fração de nuvens totais e tendência (b) fração de nuvens baixas e tendência (c) fração de nuvens médias e baixas e tendência . . . . .	53
Figura 21 – Médias mensais para a fração de cobertura de nuvens (a), nuvens baixas (b) e nuvens médias com baixas (c) para 33 anos de dados obtidos pelo GridSat-B1 . . . . .	55
Figura 22 – Irradiância durante os 382 dias de medições considerando escalas de tempo de (A) 5 segundos (B) média de 1 minuto e (C) valor máximo dentro de 1 minuto . . . . .	57
Figura 23 – Frequência de ocorrência dos valores de índice de céu limpo ( $\kappa$ ), destacando dados com desconfiança (em amarelo) e dados de ELPN extremos (em vermelho) . . . . .	59
Figura 24 – Mapa de calor do total de dados obtidos para GHI . . . . .	60
Figura 25 – Mapa de ocorrência de nuvens baixas e médias nos meses de março e junho do ano de 2022 . . . . .	64
Figura 26 – Frequência de eventos consecutivos detectados acima de 1200 W/m <sup>2</sup> de GHI . . . . .	65
Figura 27 – Dias com maiores durações de eventos consecutivos detectados nos dados acima de 1200 W/m <sup>2</sup> : (a) 2 de fevereiro de 2022 (b) 28 de março de 2022. . . . .	66
Figura 28 – Distribuição dos dados por intensidade do excesso de irradiância . . . . .	67
Figura 29 – Frequências de ocorrências dos eventos ELPN considerando o ângulo de zênite solar para diferentes faixas de GHI: (A) para GHI entre 0 e 300W/m <sup>2</sup> ; (B) para GHI entre 300 e 700W/m <sup>2</sup> ; (C) para GHI entre 700 e 1000W/m <sup>2</sup> e (D) para GHI maiores que 1000, 1200 e 1367W/m <sup>2</sup> . . . . .	68
Figura 30 – Histogramas da altitude do topo de nuvens durante eventos ELPN entre 1200 e 1367 W/m <sup>2</sup> e durante eventos ELPN extremos (maiores que 1367 W/m <sup>2</sup> ). . . . .	69

Figura 31 – Observações projetadas com os canais visíveis do satélite GOES-16 para gerar uma imagem de cores reais para os dias (a) 13 de março de 2022 com GHI de 1498W/m <sup>2</sup> (b) 26 de março de 2022 com GHI de 1477W/m <sup>2</sup> (c) 13 de março de 2022 com GHI de 1522W/m <sup>2</sup> e (d) 6 de novembro de 2022 com GHI de 1545W/m <sup>2</sup> . . . . .	70
Figura 32 – Observações projetadas com os canais 2,5 e 13 do satélite GOES-16 para gerar uma imagem de distinção da fase de nuvens para os dias (a) 13 de março de 2022 (b) 26 de março de 2022 (c) 13 de março de 2022 e (d) 6 de novembro de 2022 . . . . .	71
Figura 33 – Capacidade de energia solar fotovoltaica por estado em gigawatts. . . . .	73
Figura 34 – Evolução anual da capacidade de geração solar fotovoltaica distribuída no estado do Maranhão . . . . .	74
Figura 35 – Relação das Clases de Consumo de Geração Distribuída no estado do Maranhão . . . . .	74
Figura 36 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 1990-1995 . . . . .	82
Figura 37 – Cobertura de nuvens médias e baixo nível por estação, nos anos 1996-2001	83
Figura 38 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2002-2007 . . . . .	84
Figura 39 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2008-2013 . . . . .	85
Figura 40 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2014-2019 . . . . .	86
Figura 41 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2020-2022 . . . . .	87
Figura 42 – Calendário solarimétrico entre novembro de 2021 a abril de 2022. . . . .	88
Figura 43 – Calendário solarimétrico entre maio de 2022 a dezembro de 2022. . . . .	89

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição anual de energia solar (em % da irradiação anual) medida no local de Itiquira no estado do Mato Grosso, para diferentes faixas de irradiância (G) e diferentes períodos médios. . . . .	23
Tabela 2 – Condição de restrição para a classificação das nuvens. Os valores de temperatura de brilho estão em Kelvin. . . . .	41
Tabela 3 – Distribuição de GHI computados em 14 meses de medições . . . . .	56
Tabela 4 – Distribuição percentual de GHI que foram computados em 14 meses de medições em faixas de irradiância selecionadas . . . . .	58
Tabela 5 – Porcentagem de ocorrência dos eventos ELPN para os meses medidos em algumas faixas de horário. . . . .	61
Tabela 6 – Percentual de ELPN e valores médios e máximos de sua intensidade e duração por mês . . . . .	62
Tabela 7 – Percentual e quantidade de ELPN extremos e valores médios e máximos de sua intensidade e duração por mês . . . . .	63

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos e contribuições da dissertação</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do documento</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>O Efeito Lente Produzido por Nuvens (ELPN)</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Estado da arte do ELPN</b>	<b>20</b>
2.2.1	Estudos conduzidos no Brasil	21
2.2.2	Estudos internacionais	24
<b>2.3</b>	<b>Impactos da intensificação de irradiância causado pelo ELPN</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Qualidade dos dados solarimétricos</b>	<b>29</b>
<b>2.5</b>	<b>Sensoriamento remoto por satélite</b>	<b>31</b>
2.5.1	O GridSat-B1	32
2.5.2	Satélite GOES-16	34
<b>2.6</b>	<b>ELPN e a estimativa de radiação em superfície.</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>DADOS E METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Dados remotos</b>	<b>40</b>
3.2.1	Climatologia de cobertura de nuvens com o GridSat-B1	40
3.2.2	Observações com o GOES-16 e determinação de altitude de topo de nuvens	42
<b>3.3</b>	<b>Dados em solo</b>	<b>43</b>
3.3.1	Garantindo a correta detecção de eventos ELPN	45
<b>3.4</b>	<b>Trabalhando os dados no computador</b>	<b>45</b>
3.4.1	Dados dos satélites	47
3.4.1.1	Utilizando GridSat-B1 para climatologia de cobertura nuvens	47
3.4.1.2	Utilizando GOES-16 para encontrar altitude de topo de nuvens	48
3.4.2	Dados dos piranômetros	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Climatologia da ocorrência de nuvens no Maranhão</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização do ELPN a partir dos dados em solo</b>	<b>55</b>
4.2.1	Distribuição de energia solar	56
4.2.2	Distribuição mensal de GHI	57
4.2.3	Distribuição do índice de céu limpo	58

4.2.4	Interpretação geral dos dados e de dados ELPN . . . . .	59
4.2.5	Relação de ocorrência de ELPN com os períodos do dia . . . . .	60
4.2.6	Porcentual de ocorrências de ELPN . . . . .	61
4.2.7	Duração dos eventos ELPN . . . . .	64
4.2.8	Intensidade do excesso de irradiância . . . . .	66
4.2.9	ELPN e o ângulo de zênite solar . . . . .	67
<b>4.3</b>	<b>Padrão de nuvens durante o ELPN . . . . .</b>	<b>68</b>
4.3.1	Altitude do topo de nuvens durante o ELPN . . . . .	69
4.3.2	Propriedades ópticas e de fase das nuvens durante o ELPN . . . . .	70
<b>4.4</b>	<b>Implicações do ELPN para a Energia Solar no Maranhão . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões gerais sobre o trabalho . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>5.2</b>	<b>Recomendações para trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A – MAPAS DA CLIMATOLOGIA . . . . .</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE B – CALENDÁRIOS DE IRRADIÂNCIA . . . . .</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE C – EVENTOS EXTREMOS DE ELPN . . . . .</b>	<b>90</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As nuvens possuem papel fundamental nos processos radiativos da atmosfera participando no balanço de energia disponível, influenciando na quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre. A necessidade de entender o comportamento espacial e a interação das nuvens com o fluxo de radiação solar através da atmosfera revela grande importância, uma vez que o desempenho da geração de energia pelas tecnologias de utilização solar disponíveis no setor de energia nacional depende de boas condições do tempo.

Sob um comportamento particular que ocorre em determinadas configurações de nuvens de baixa altitude, os valores de irradiância — energia por unidade de área recebida do Sol — medidos em terra, ficam acima dos valores em condições de um céu livre de nuvens, ocasionado por um efeito que promove intensificação dessa energia. No Brasil, este efeito é comumente chamado de Efeito Lente Produzido por Nuvens e, neste trabalho, irá ser abreviado pelas iniciais “ELPN”. Há poucas pesquisas publicadas sobre o fenômeno ELPN no cenário nacional (ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014; ANDRADE; TIBA, 2016; PIACENTINI et al., 2011). Pesquisas mais recentes (MAYER, 2021; NASCIMENTO et al., 2019) mostram que o registro desse evento é bastante suprimido devido a diferentes resoluções dos instrumentos utilizados nas medições de irradiância solar.

O interesse em investigar e observar características de nuvens que provocam o ELPN pode ajudar a construir novos parâmetros que possibilitam melhorar as estimativas de radiação solar a partir de dados de sensoriamento remoto juntamente com outros dados climatológicos correlacionados já disponíveis. A saída desses modelos pode ser usada para uma variedade de aplicações, como projetos de sistemas de energia solar.

O projeto EOSOLAR<sup>1</sup> promove campanhas de medições micrometeorológicas para avaliação do potencial de geração de energia solar e eólica no estado do Maranhão. A presente dissertação está inserida no contexto deste projeto, sendo este essencial para alcançar seus objetivos através da adoção de equipamentos utilizados para a prospecção de energia renovável.

---

<sup>1</sup> Para mais informações sobre o projeto, acesse: <https://eosolar.equatorialenergia.com.br/> (ASSIREU et al., 2022)

## 1.2 Objetivos e contribuições da dissertação

Este estudo, portanto, é realizado particularmente para o estado brasileiro do Maranhão e visa investigar a variabilidade espaço-temporal de nuvens de baixo nível ao longo do estado em uma série histórica, bem como investigar as características de nuvens mais propícias à ocorrência do ELPN através de dados de sensoriamento remoto e de uma estação solarimétrica propriamente instalada. Registros de dados climáticos por satélites disponibilizados pelo serviço de meteorologia estadunidense formam o recurso principal para avaliar a distribuição temporal e espacial de nuvens, enquanto os dados da estação meteorológica fornecem dados para a caracterização solar em superfície.

Dessa forma o objetivo geral deste trabalho é:

- Explorar a combinação de dados de piranômetros com imagens de satélite na identificação para análise de eventos de intensificação de irradiância produzido por nuvens a fim de aumentar a compreensão deste fenômeno.

e os objetivos específicos são:

- Examinar as características espaciais de nuvens durante um evento de intensificação de irradiância detectado em superfície;
- Explorar as tendências climatológicas de cobertura de nuvens para avaliar as variações diurnas, sazonais e interanuais que se apresentam;
- Investigar métodos usualmente aplicados que auxiliem na quantificação de nuvens;
- Investigar as causas da intensificação a partir das observações de imagens de satélite e analisar prováveis tipos de nuvens durante a ocorrência dos eventos de intensificação;
- Avaliar o impacto dos itens anteriores para o aproveitamento solar no estado do Maranhão.

A estratégia para entender os dados surgiram da apropriação de métodos e abordagens feitas em trabalhos realizados por [Purbantoro et al. \(2018\)](#), [Muhsin \(2021\)](#) e [Yang, Yagli e Quan \(2018\)](#), o que permitiu alcançar os objetivos propostos.

É esperado que este trabalho contribua para o aprimoramento de modelos de simulação de processos radiativos, detecção e identificação de eventos de intensificação de irradiância sobre uma dada região de interesse e permitir abrir caminhos ao planejamento e modelagem em projetos de energia solar é possibilitado de forma barata, acessível e replicável, permitindo a melhoria técnica ao campo de estudo dos parâmetros meteorológicos e atmosféricos na dinâmica da radiação solar.

## 1.3 Estrutura do documento

Esta dissertação está organizado da seguinte forma: no [Capítulo 2](#) é apresentado uma contextualização teórica sobre o ELPN, bem como uma revisão da literatura do estado da arte condizente ao tema. Ainda nesse capítulo, é feita uma visita à literatura referente as metodologias do controle de qualidade de dados solarimétricos e também ao campo do sensoriamento remoto por satélites, que ajudará a entender as condições de nuvens durante os eventos. As metodologias e a descrição dos materiais utilizados para as análises residem no [Capítulo 3](#), bem como são apresentados os resultados no [Capítulo 4](#) e discussões das análises. Por fim, no [Capítulo 5](#) são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

A seguinte revisão da literatura introduz o estado da arte do efeito lente produzido por nuvens e, em seguida, avança sobre pesquisas de sensoriamento remoto. É válido ressaltar a distinção entre os termos “irradiância” e “irradiação”, muito recorrentes e passíveis de confusão: o termo irradiação se refere ao cálculo da integral dos valores da irradiância medidos ao longo de um determinado período de tempo. De certo modo, a irradiância pode ser entendida como um valor instantâneo da irradiação. Ademais, a medição da irradiação solar gira em torno de três componentes, normalmente obtidos por instrumentos chamados piranômetros. Isto é, a irradiância solar global no plano horizontal (GHI), a irradiância horizontal difusa (DHI) também em  $W/m^2$  e a irradiância normal direta (DNI). GHI é a irradiância solar total recebida em uma superfície horizontal (ao solo); DHI é a irradiância solar recebida em uma superfície horizontal que se deve à dispersão de moléculas, aerossóis e nuvens na atmosfera; e DNI é a irradiância solar recebida em um plano que é normal ao raio de sol.

### 2.1 O Efeito Lente Produzido por Nuvens (ELPN)

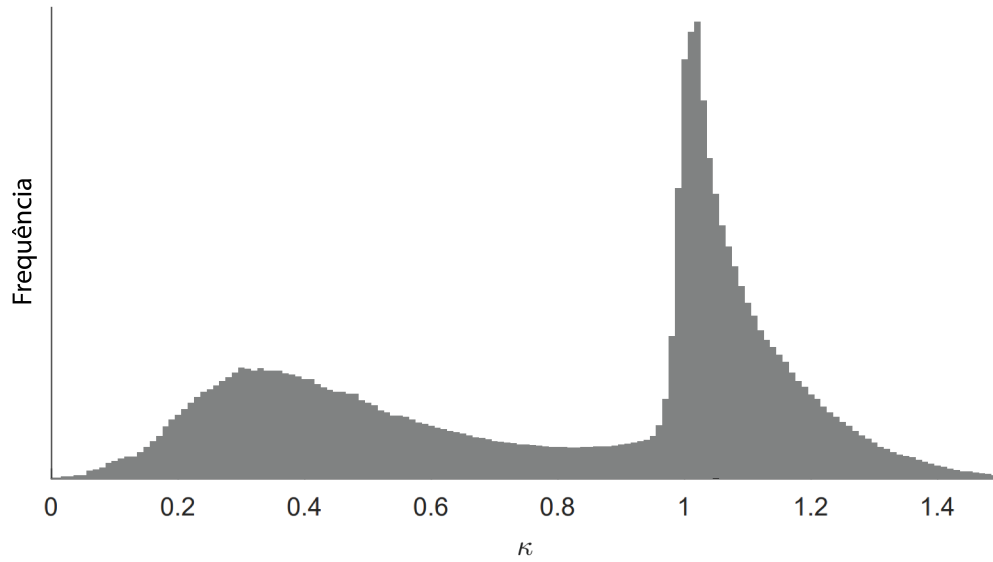
A variabilidade da radiação solar na superfície da Terra devido à cobertura de nuvens pode ser mais facilmente quantificada se a irradiância de um céu livre de nuvens for usada como referência. A relação encontrada entre a irradiância medida e a irradiância referencial é chamada de índice de céu limpo ([WIDÉN; SHEPERO; MUNKHAMMAR, 2017](#)) e é definido como:

$$\kappa = \frac{GHI}{GHI_{clr}} \quad (2.1)$$

onde GHI é a irradiância horizontal global, sendo a unidade de medida dada em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ), e  $GHI_{clr}$  é a irradiância de céu limpo também em  $W/m^2$ . A distribuição do índice de céu limpo varia entre locais, mas tipicamente tem dois picos pronunciados, um em torno de  $\kappa = 1$ , que corresponde a um céu livre de nuvens, e um pico em torno de  $\kappa = 0,5$  que tipicamente corresponde à um tempo nublado. Os valores de  $\kappa$  acima de 1 correspondem a níveis de irradiância mais altos do que para um céu desobstruído e para isso há uma explicação: a radiação solar ao nível do solo pode ser afetada pelas nuvens de tal forma que às vezes pode ser maior que a radiação em condições sem nuvens. Este efeito é chamado de intensificação de irradiância (ou ELPN) e pode ser notado na figura 1, que mostra a frequência do índice  $\kappa$  para uma cidade no Havaí nos Estados Unidos em um estudo conduzido por [Sengupta e Andreas \(2010\)](#). Esses valores

( $\kappa > 1$ ) excedem o padrão normal durante um dia limpo típico e isso ocorre principalmente quando há passagem de alguns tipos de nuvens ao redor do disco solar, a serem investigadas no decorrer desta dissertação.

**Figura 1** – Histograma do índice de céu limpo ( $\kappa$ ) medindo irradiância global horizontal (GHI) em intervalos de 1 segundo durante 401 dias em Oahu, Havaí, nos Estados Unidos.



Fonte: Retirado de [Sengupta e Andreas \(2010\)](#)

Para perceber os efeitos de intensificação de irradiância ao longo de um dia é necessário usar uma referência das condições de céu limpo ( $GHI_{clr}$ ) caracterizada pela curva em forma de sino da energia total do sol dado em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ). Esta condição pode ser obtida através de modelos tais como Ineichen, Atwater, REST2, dentre outros. Estes modelos levam em conta o ângulo de elevação solar, altitude do local, concentração de aerossol, vapor de água e várias condições atmosféricas. Uma análise comparativa da performance desses modelos é apresentada no trabalho de [Stein, Hansen e Reno \(2012\)](#).

O modelo de céu limpo de Ineichen ([INEICHEN; PEREZ, 2002](#)) é proposto como um modelo simples para a irradiância global e direta, onde é ajustada a massa de ar óptico com base nos valores de turbidez de Linke<sup>1</sup> e leva em consideração alguns parâmetros, tais como: a turbidez atmosférica; massa de ar; altitude local e a irradiação extraterrestre. Este é o modelo que melhor representa as condições de um dia de céu limpo padrão da região de interesse do presente estudo e é descrito pela equação:

$$G_{hcl} = a_1 \cdot I_o \cdot \text{sen}(h) \cdot \exp(-a_2 \cdot AM \cdot (f_{h1} + f_{h2} - (T_L - 1))) \quad (2.2)$$

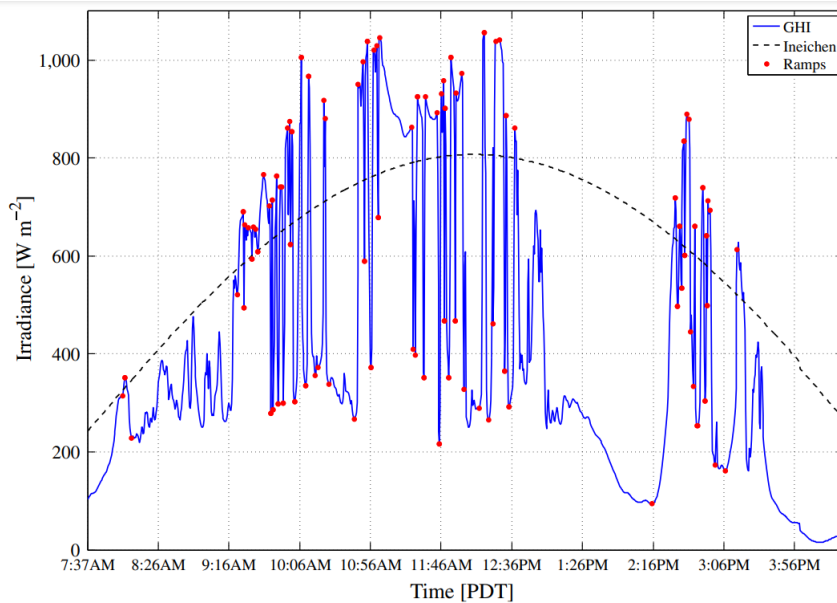
<sup>1</sup> A turbidez de Linke é uma aproximação muito adequada para modelar a absorção atmosférica e a dispersão da radiação extraterrestre em relação à atmosfera seca e limpa. Ela resume a turbidez da atmosfera e, portanto, a atenuação da radiação solar. Quanto maior este fator, maior a atenuação da radiação pela atmosfera de um céu limpo.

onde  $G_{hcl}$  é o modelo de céu limpo para radiação global expresso em  $W/m^2$ ;  $a_1 = 5.09 \cdot 10^{-5} \cdot altitude + 0.868$ ;  $a_2 = 3.92 \cdot 10^{-5} \cdot altitude + 0.868$ ;  $I_o$  é a constante solar em  $W/m^2$ ;  $h$  é o ângulo de elevação solar em graus;  $AM$  é a massa de ar óptica (ou caminho óptico);  $f_{h1} = \exp(-altitude/8000)$ ;  $f_{h2} = \exp(-altitude/1250)$  e  $T_L$  é o coeficiente de turbidez de Linke.

Inman, Chu e Coimbra (2016) afirmam que, por haver uma margem de erros nas medições de irradiância e também na modelagem de  $GHI_{clr}$ , os possíveis eventos ELPN estão associados a valores que excedem o modelo de céu limpo por pelo menos 5%, de modo que:

$$ELPN := GHI - GHI_{clr} > 1.05 \cdot GHI_{clr} \quad (2.3)$$

A figura 2 exemplifica um dia de dados solares medidos na Universidade da Califórnia, nos Estados Unidos (INMAN; CHU; COIMBRA, 2016), onde as rampas de GHI formam um perfil serrilhado. Os máximos e mínimos das rampas são destacadas em pontos vermelhos. É interessante verificar que, em muitas vezes, os valores de GHI ultrapassam o modelo de céu limpo (tracejado), indicando provável ocorrência do ELPN.

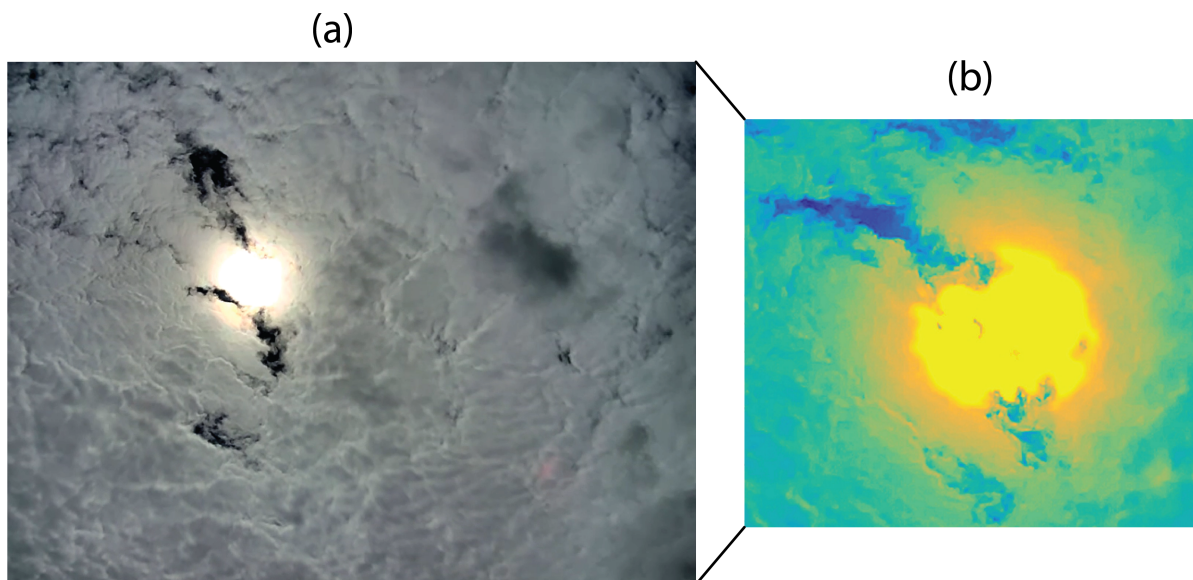


**Figura 2** – Dados registrados na Universidade da Califórnia, usando modelo de céu limpo de Ineichen (tracejado).

Fonte: Retirado de Inman, Chu e Coimbra (2016)

Segundo Yang, Yagli e Quan (2018), o alto GHI do evento de intensificação é causado pela exposição simultânea de alto DHI e alto DNI. Quando o piranômetro é exposto diretamente ao sol (alto DNI), os efeitos de dispersão das nuvens ao redor do disco solar podem contribuir com uma quantidade significativa de DIF, resultando em alto GHI. No trabalho de Yordanov (2015) é realizado uma análise de vídeo de um evento de intensificação na Noruega, onde houve um fator de multiplicação de 1,6 vezes das condições

de céu limpo. É perceptível que a região circunsolar em condições extremas de irradiação é mais difusa, de forma a espalhar o brilho do Sol entre as nuvens. A figura 3 representa esta situação na captura de vídeo<sup>2</sup>, e também uma inspeção da intensidade de pixels efetuado para o canal vermelho da imagem.



**Figura 3** – (a) *frame* da captura em vídeo do ELPN e (b) inspeção da intensidade de pixels para o canal vermelho da imagem.

Fonte: Adaptado de [Yordanov \(2015\)](#)

Uma discussão é referida ao tipo de nuvens que poderiam levar aos picos elevados de irradiância durante o evento, bem como suas características microfísicas e macrofísicas, propriedades ópticas, altura do topo e da base, a variabilidade espacial e propriedades geométricas, espalhamento Mie ([YORDANOV et al., 2012](#)) (que relaciona com a interação das ondas eletromagnéticas provenientes do Sol e a matéria), entre outras. As próximas seções desdobram o tema trazendo o estado da arte presentes em produções científicas que aprofundam e dão informações relevantes para o entendimento e o amparo de uma fundamentação teórica.

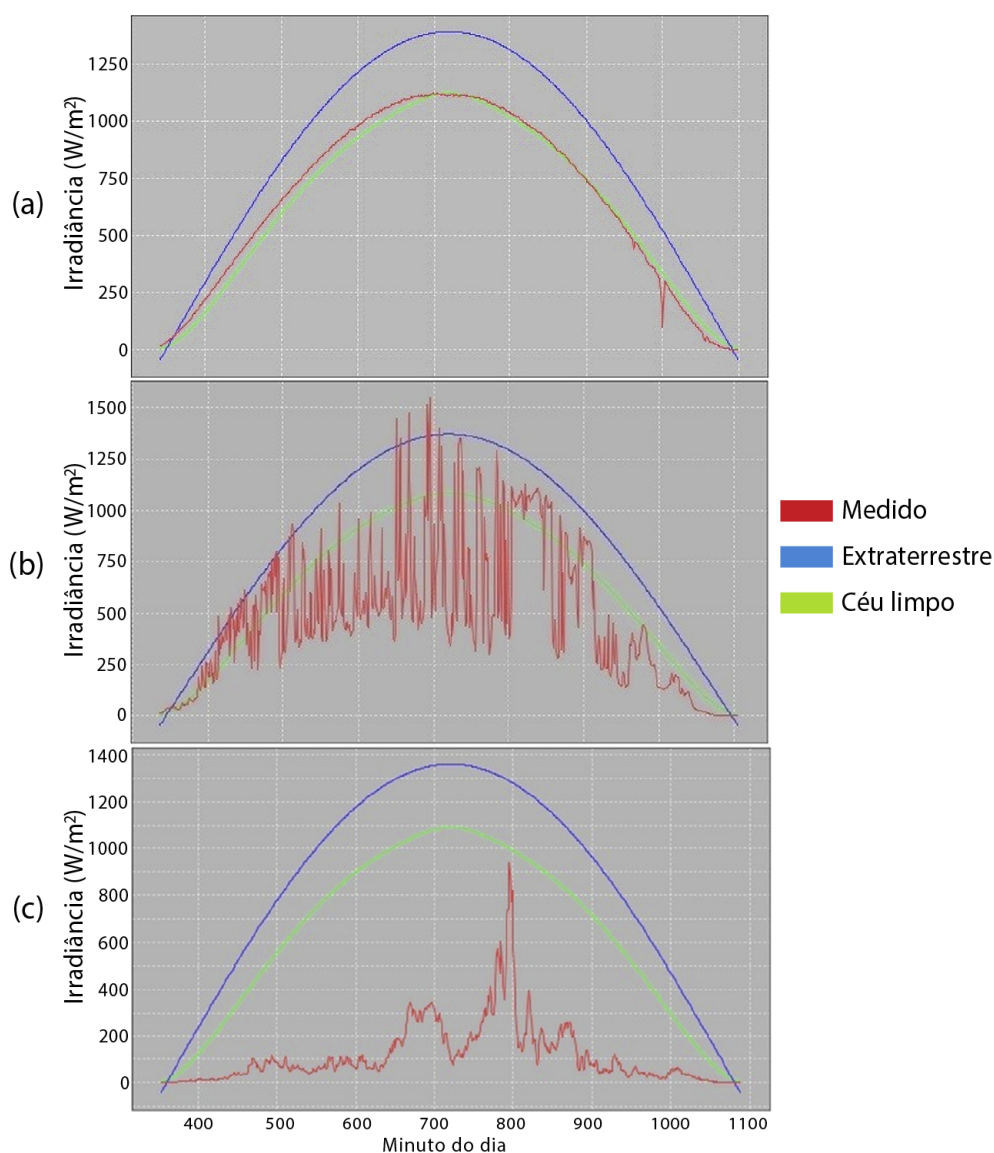
## 2.2 Estado da arte do ELPN

Alguns trabalhos que têm por vista entenderem o comportamento fenomenológico observados durante o ELPN são apreciados nesta seção. Parte deles se desenvolvem em âmbito nacional, contudo, o ELPN pôde ser notado em diversas localidades do mundo, em diversas condições climáticas e de altitude. As metodologias usadas nestes trabalhos delineiam padrões e exploram diversas variáveis e parâmetros dentro dos dados coletados.

<sup>2</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=MPo9zjWRjpA>

### 2.2.1 Estudos conduzidos no Brasil

Um estudo realizado por [Andrade e Tiba \(2016\)](#), no nordeste brasileiro, analisaram medições em estações solarimétricas distribuídas no estado de Alagoas ao longo do ano de 2008. Elaborou-se análises quantitativas detalhadas usando um banco de dados de medidas de oito locais diferentes obtidos em intervalos de 1 minuto. Com isso, foi possível perceber em alguns dados que, em períodos do dia parcialmente nublados, ocorria ampliação da irradiação solar global, ou seja, valores acima do esperado para um dia limpo (ver figura 4). Um brilho intenso nas bordas de nuvens cumulus puderam ser identificadas como as causas desse efeito.



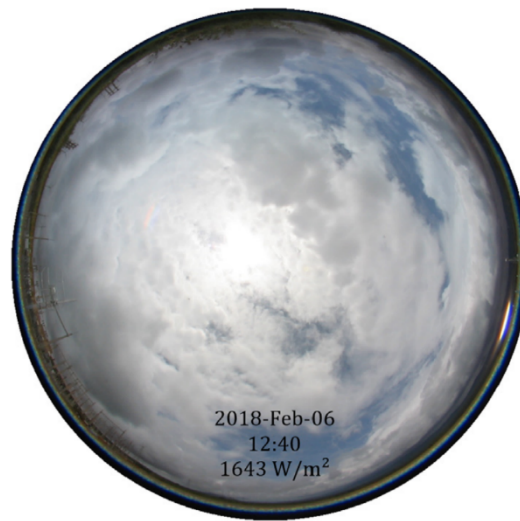
**Figura 4** – Perfil de irradiação para Água Branca, em Alagoas: (a) dia de céu limpo, (b) dia parcialmente nublado e (c) dia nublado.

Fonte: Retirado de [Andrade e Tiba \(2016\)](#)

Além do mais, os dados mostraram que o fenômeno não é incomum: a ocorrência do

fenômeno pôde ser notada em pelo menos um terço dos dias de um dado mês, sendo que a ocorrência mais acentuada foi registrada no valor de  $1650W/m^2$ . Sua duração acumulada (número de eventos consecutivos de 1 minuto) chegou até 34 minutos e notou-se um claro efeito sazonal. A probabilidade de ocorrência em uma base mensal mostrou dois picos, um em abril e outro em outubro. Para os autores (ANDRADE; TIBA, 2016) a região intertropical é favorável ao aparecimento de tipo de nuvens cumulus, o que cria uma possibilidade de uma intensificação periódica da irradiância solar, devido as reflexões nas bordas dessas nuvens e pelo espalhamento múltiplo no plano de nuvens. Os dias com céu limpo ou em condições de muita nebulosidade não produzem o efeito de amplificação de irradiação solar, por outro lado, dias com nebulosidade variável são os dias de picos de amplificação, e podem ser observados no período entre 11 e 12 horas, com o pico de irradiação acima dos níveis dos calculados para céu limpo e de irradiação extraterrestre. É também demonstrado que para locais em regiões costeiras de clima tropical, há uma mudança notável nos resultados, a duração média do evento de intensificação é maior que 2 minutos, e a duração cumulativa de minutos consecutivos atinge o dobro daquela observada na estação mais afastada do mar. Em resumo, em regiões costeiras de clima tropical é notável um considerável aumento da ocorrência do fenômeno, especialmente a duração, o número de eventos consecutivos e o total de dias mensais de ocorrência. Andrade e Tiba (2016) ainda incluem que seria difícil detectar este efeito a partir de instrumentos de satélite porque, nesse caso, a irradiação solar terrestre é normalmente derivada dos dados espaciais como uma média de informações provenientes de uma região bastante grande. Uma segunda dificuldade neste caso é causada pela duração dos eventos, que geralmente duram na ordem de aproximadamente 1-10 min e, na maioria dos casos, não são, portanto, resolvidos temporalmente por imagens de satélite.

Em outro estudo de âmbito nacional, Nascimento et al. (2019) analisaram estações de monitoramento em fazendas solares de grande escala em diferentes regiões climáticas do Brasil com o objetivo de detectar eventos de irradiância “extrema”, onde nesse caso significa dizer que são considerados apenas eventos acima do valor da constante solar, aqui adotado como aproximadamente  $1367W/m^2$ . O artigo também aborda os impactos e consequências desses eventos, especialmente em usinas de energia solar fotovoltaica de grande escala. A figura 5 mostra uma fotografia do céu na ocorrência do ELPN extremos.



**Figura 5** – Céu durante um evento ELPN extremo com GHI igual a  $1643W/m^2$ , medido em Brotas de Macaúbas no estado da Bahia.

Fonte: Retirado de [Nascimento et al. \(2019\)](#)

No trabalho de [Nascimento et al. \(2019\)](#), os dados de irradiação registrados usando períodos médios de 1 e 10 segundos mostram, em ambos os casos, que cerca de 22% da irradiação solar anual ( $kWh/m^2.ano$ ) ocorreu em níveis de irradiação iguais ou superiores a  $1000W/m^2$ , normalmente causados pelo ELPN. Usando médias horárias, o resultado é consideravelmente diferente e mostra que apenas cerca de 10% (menos da metade do valor anterior de 22%) da irradiação solar anual ocorre na mesma faixa de irradiação ( $\geq 1000W/m^2$ ) considerada para períodos de um segundo e dez segundos de média. Estes resultados, mostrados na tabela 1, demonstram que as médias horárias comumente usadas induzem a um artefato experimental que esconde informações importantes de energia e não são representativas do perfil real de distribuição de energia solar. Os autores apontam que estes diferentes resultados têm impacto direto no dimensionamento de inversores e no desempenho do sistema fotovoltaico.

**Tabela 1** – Distribuição anual de energia solar (em % da irradiação anual) medida no local de Itiquira no estado do Mato Grosso, para diferentes faixas de irradiância (G) e diferentes períodos médios.

Período de cálculo da média	Faixas de Irradiância ( $W/m^2$ )				
	$G < 300$	$300 \leq G < 700$	$700 \leq G < 1000$	$1000 \leq G < 1200$	$G \geq 1200$
1 s	11,1%	28,8%	37,9%	18,3%	3,8%
10 s	11,1%	28,9%	38,2%	18,2%	3,6%
1 min	11,0%	29,2%	39,1%	18,0%	2,8%
10 min	10,5%	30,8%	43,1%	15,1%	0,6%
1 h	9,7%	34,6%	45,3%	10,4%	0,0%

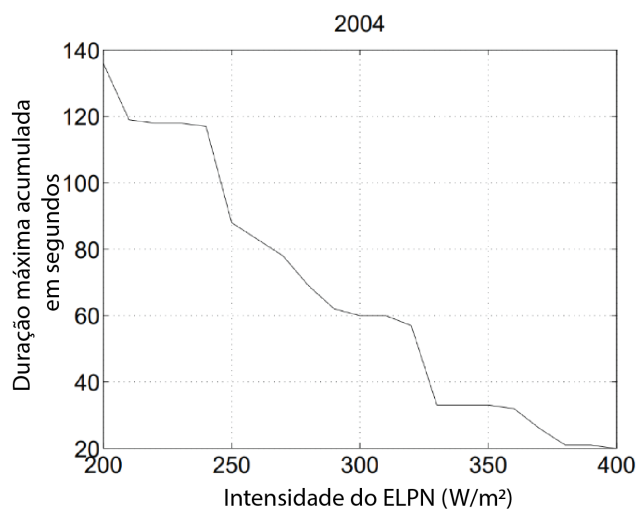
Fonte: Retirado de [Nascimento et al. \(2019\)](#)

## 2.2.2 Estudos internacionais

Um estudo feito no Observatoire de Haute Provence na França ([THUILLIER et al., 2013](#)) usou dados de sensoriamento remoto e medições com piranômetros acompanhado de câmeras de grande campo visual. Observou-se que o efeito intensificação de irradiância ocorre também em nuvens finas como as do tipo cirrus finas, relatando duração da ocorrência de cerca de duas horas. Para demonstrar a clara evidência do fenômeno, tomou-se a diferença entre dois dias de medições, um com a presença dessas nuvens e outro com sua ausência. Os pesquisadores notaram que a duração da intensificação é significativamente maior do que no caso de nuvens cumulus, no entanto, com uma amplitude menor.

Um outro estudo feito no município litorâneo de Westerland na Alemanha ([SCHADE et al., 2007](#)) contou com câmeras do tipo “all-sky imager”, piranômetros, instrumentos de medições meteorológicas, além de observações da cobertura de nuvens e tipo de nuvem através do serviço nacional de meteorologia do país. O objetivo era observar intensificação de irradiância solar locais no verão. Uma vez detectado um forte aumento da radiação solar, uma imagem era capturada para ilustrar a condição atmosférica. Revelou-se a presença dos tipos de nuvens altocumulus stratiformis, cirrus e cumulus de baixo nível ao redor do disco solar na ocorrência dos eventos de intensificação. O maior registro de intensificação foi produzido por uma combinação dos últimos dois tipos, atingindo surpreendentes  $522.33W/m^2$  acima da referência de céu limpo. Os autores também conseguiram estabelecer uma relação entre a frequência de aparecimento do evento de intensificação com a fração respectiva de nuvens, sua duração, amplitude e ângulo de zênite solar. Dentre essas relações nota-se que:

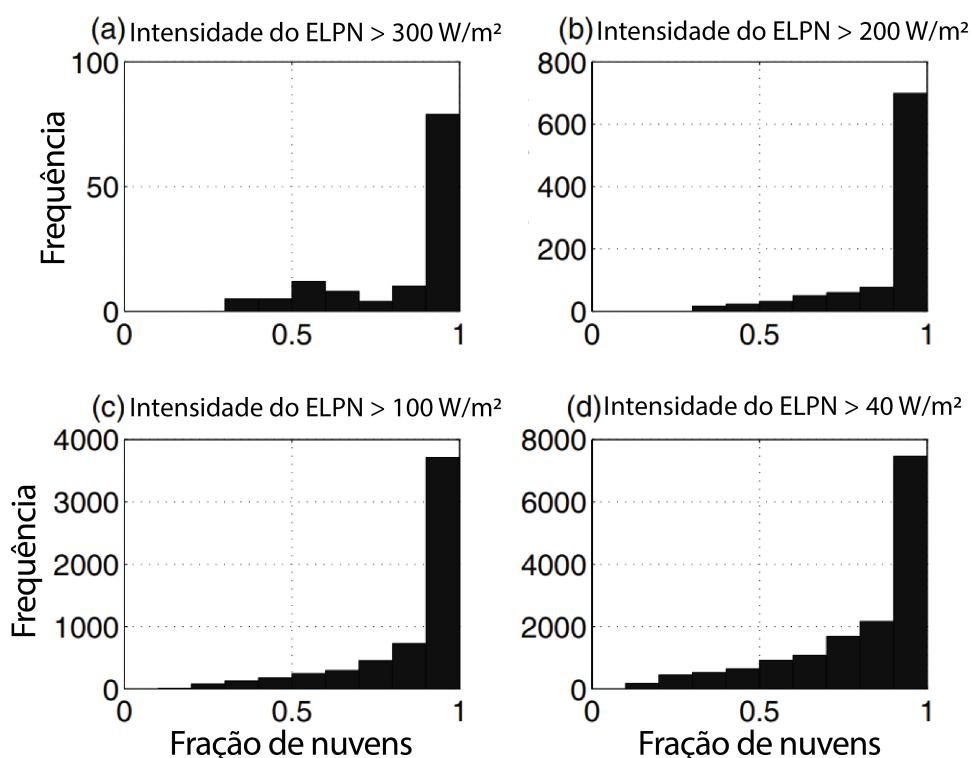
- A frequência dos eventos decresce drasticamente com quão maiores as intensidades produzidas (figura 6):



**Figura 6** – Períodos de tempo máximos de irradiação para verão de 2004.

Fonte: Retirado de [Schade et al. \(2007\)](#)

- Para qualquer intensidade, a frequência dos eventos evolui gradativamente quanto maior a **fração de nuvens** e se destaca quando o céu está completamente encoberto. Vale lembrar que a fração de nuvens<sup>3</sup>, ou “*fractional cloud cover*” (AN; WANG, 2015) obtida a partir de satélites e/ou aeronaves indica a área fracionária coberta por nuvens, conforme observado de cima (KASSIANOV; LONG; OVTCHINNIKOV, 2005). No caso apresentado na figura 7, a fração de nuvens indica quantidade total de nuvens que encobre o domo do céu no local onde a câmera *all-sky* é instalada em superfície pelos autores. Em todos os casos, as maiores frequências de ocorrência de ELPN aparecem próximos de situações encobertas (fração de nuvens próximos a 1):

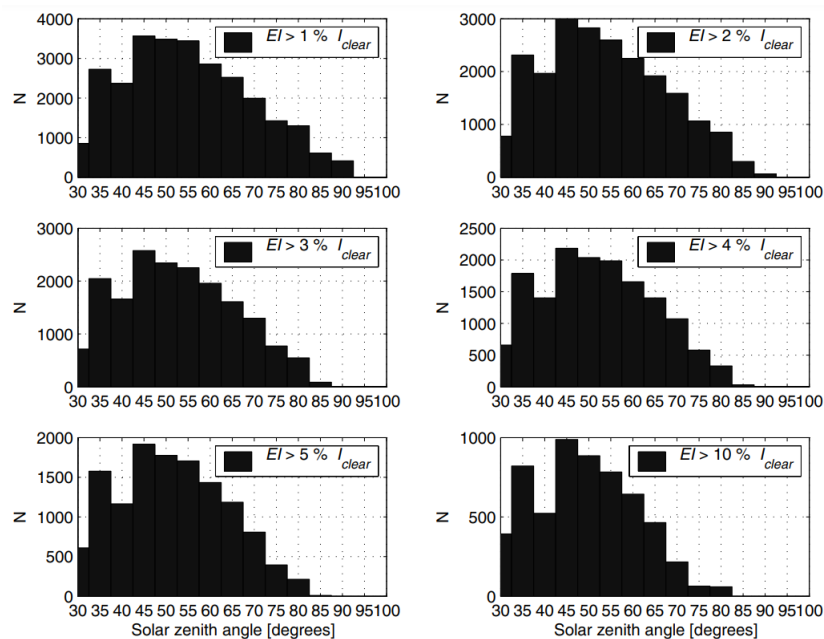


**Figura 7** – Frequência de distribuição com relação à fração de nuvens nos períodos de intensificação maiores que 300 (a), 200 (b), 100 (c), e 40  $W/m^2$  (d) no verão de 2004 em Sylt, Alemanha.

Fonte: Retirado de Schade et al. (2007)

- O máximo de ocorrências dos eventos é encontrado em torno de 45 graus do ângulo de zênite solar, o que corresponde a uma alta elevação solar do local no período dos experimentos. No entanto, grandes intensificações não se devem somente a isso, mas devido também, ligeiramente, a maiores quantidades de nuvens (figura 8):

<sup>3</sup> Kassianov, Long e Ovtchinnikov (2005) afirmam que métodos observacionais e modelos climáticos utilizam diferentes definições de fração de nuvens. Em estudos climatológicos por satélite a definição é tida como a fração da superfície da terra coberta por nuvens ou referido simplesmente como cobertura de nuvens. Já em estudos climatológicos de superfície, este termo é definido como "a fração de céu coberto por nuvens".



**Figura 8** – Distribuição de frequência do ângulo zenital solar nos períodos de intensificação da irradiância solar global, excedendo a referência de céu limpo de 1 a 10%, no verão de 2004.

Fonte: Retirado [Schade et al. \(2007\)](#)

Outra relação importante encontrada por [Schade et al. \(2007, p.301, tradução nossa, grifo nosso\)](#) é a seguinte:

“O período mais longo, de 138 segundos, aparece para intensificações acima de  $200 \text{ W/m}^2$ , decrescendo com o aumento da intensificação, chegando a 20 segundos para valores acima de  $400 \text{ W/m}^2$ . É notável que as intensificações extremas podem durar até 20 segundos. Uma inspeção visual das imagens **revela que as nuvens cumulus na região circumsolar produzem os maiores períodos de irradiação solar intensificados e que a duração das intensificações é determinada pela velocidade de deriva da nuvem.** [...] O tempo de intensificação mais frequente é de 6 segundos para todos os casos. Isto corresponde ao tamanho médio das nuvens cumulus passando ao longo da posição do Sol com a velocidade do vento dominante no regime de deriva do vento oeste europeu.”

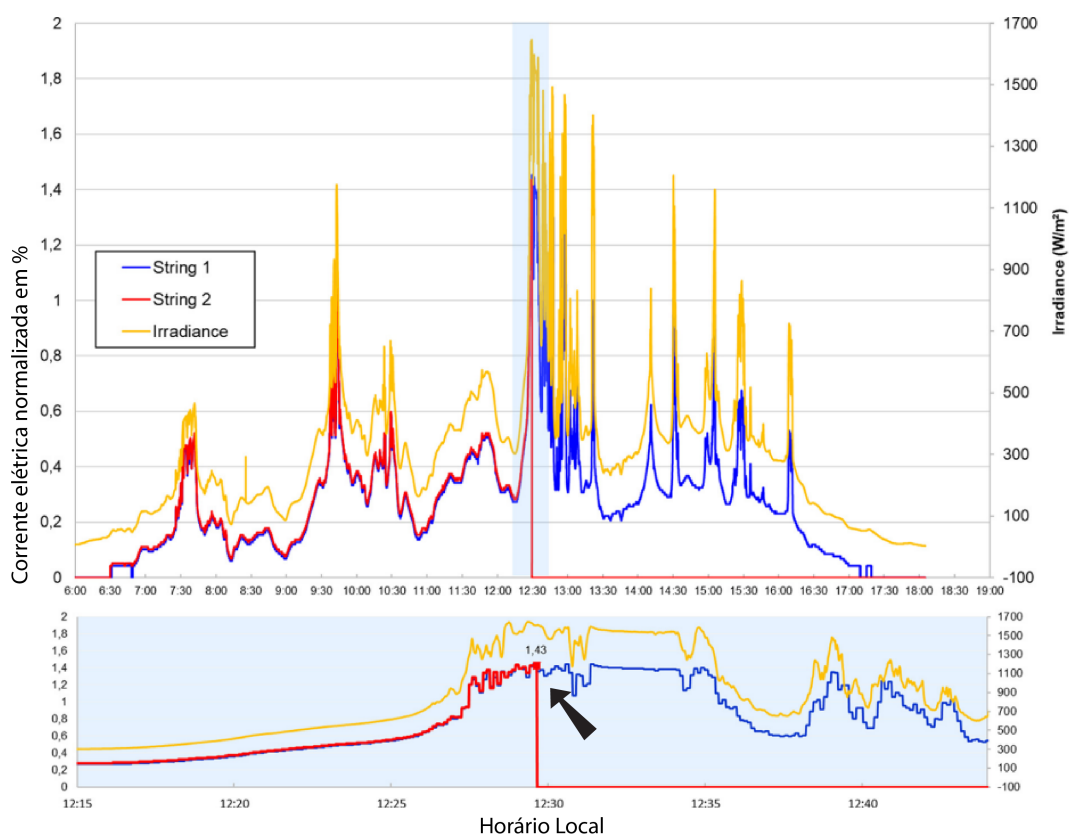
### 2.3 Impactos da intensificação de irradiância causado pelo ELPN

O excesso de irradiação causado pelas nuvens é um fenômeno que ocorre quando as nuvens refletem ou refratam as ondas eletromagnéticas provenientes do Sol de tal forma que causa um aumento na quantidade de radiação solar recebida na superfície. O fenômeno pode causar danos aos módulos fotovoltaicos (FV), assim como a outros dispositivos de coleta de energia solar, e também introduzir picos de tensão e outros distúrbios na rede elétrica. O excesso de irradiação também pode causar problemas nos sistemas de rastreamento que são usados em algumas usinas de energia solar. Estes sistemas usam

sensores para rastrear a posição do sol no céu e ajustar a orientação dos painéis solares, a fim de maximizar a quantidade de energia solar que é recebida. Entretanto, se os sensores detectarem altos níveis de radiação, eles podem ajustar automaticamente a orientação dos painéis para reduzir a quantidade de energia solar que é recebida. Isto pode resultar na não orientação ideal dos painéis, o que pode reduzir a produção total da usina FV (NSENGIYUMVA et al., 2018).

Também vale a pena mencionar que o ELPN pode trazer impactos econômicos, pois pode reduzir a eficiência e a vida útil dos painéis solares, o que pode levar ao aumento dos custos de manutenção e de substituição. Também pode causar perdas de energia e problemas de estabilidade da rede, levando ao aumento dos custos para as concessionárias e operadores de rede. Na figura 9, ilustra-se o momento em que houve a queima de um fusível quando é atingido um valor de corrente elétrica acima do esperado para as condições de teste padrão (no inglês “*Standard Test Conditions* ou STC”), onde a temperatura e a irradiação solar são indicados como os dois fatores principais que afetam o desempenho da célula fotovoltaica da qual a corrente de saída é diretamente proporcional à intensidade da radiação solar (CHUN; KWASINSKI, 2011). As condições de teste padrão para energia fotovoltaica (FV) referem-se às condições sob as quais o desempenho de um módulo ou sistema FV é medido e avaliado. Estas condições incluem um nível específico de irradiação, uma temperatura da célula específica e uma massa de ar específica (AM). Estas condições de teste padrão são estabelecidas por organizações como a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) (IEC, 2010) e o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) (WHITAKER; NEWMILLER, 1998) e são usadas para garantir que os módulos FV sejam testados sob condições consistentes e comparáveis. Os parâmetros nominais sob a condição de teste padrão são os que seguem:

- Irradiância: A intensidade da radiação eletromagnética emitida pelo Sol no módulo FV é medida em unidades de watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ). A condição de teste padrão para irradiância é de  $1000 W/m^2$ ;
- Temperatura da célula: A temperatura na qual uma célula FV opera é medida em graus Celsius ( $^{\circ}C$ ). A condição de teste padrão para a temperatura da célula é  $25^{\circ}C$ ;
- Massa de ar ou caminho óptico (AM): A massa de ar é uma medida da espessura da atmosfera através da qual a radiação eletromagnética emitida pelo Sol deve passar antes de alcançar o módulo FV. A condição padrão de teste da massa de ar é 1,5.



**Figura 9** – Ilustração do momento em que o fusível de um sistema FV foi queimado por conta de corrente em excesso causado por ELPN extremos.

Fonte: Retirado de Nascimento et al. (2019)

As “*String Boxes*” possuem a finalidade de receber todas as conexões dos circuitos de corrente elétrica vindos do painel fotovoltaico, contém dispositivos de proteção, formados por chaves seccionadoras, fusíveis, disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos (DPSs), produzindo uma saída em corrente contínua devidamente protegida que se conecta à entrada do inversor solar. Portanto, a “*String Box*” é o componente de proteção da parte corrente elétrica do sistema fotovoltaico, que conecta os cabos vindos dos módulos fotovoltaicos ao inversor, aloca as proteções dos equipamentos mais sensíveis do sistema fotovoltaico, e também evita problemas no local de instalação como incêndios, queima do local onde é instalado ou até do sistema elétrico onde é conectado. No entanto, no artigo de Yordanov, Saetre e Midtgård (2013), é afirmado que em casos de eventos de irradiância extrema, os módulos FV podem ter o potencial de iniciar arcos elétricos, o que pode iniciar incêndios e levar a danos significativos. Isso se deve ao fato de que o dimensionamento dos dispositivos de proteção e dos limitadores da geração de energia solar não estão preparados para atender esse tipo de eventualidade, uma vez que é necessário que nenhum excesso de energia possa ser gerado além do que os cabos comportam e precisam atender aos picos de corrente sob essas condições, que podem ser muito mais altos do que aqueles enquadrados no STC.

Além disso, [Damiani et al. \(2018\)](#) afirmam que os transientes rápidos gerados pelo ELPN podem ser prejudiciais às instalações fotovoltaicas. As flutuações rápidas e de alta amplitude da energia solar disponível na superfície que resultam da passagem de sombras são referidas na indústria energética e de energia como 'rampas'. Estas rampas têm um impacto marcante na eficiência da geração de energia em múltiplas escalas de espaço e tempo.

O Brasil possui várias condições diferentes e simultâneas devido a suas dimensões continentais, portanto qualquer dimensionamento é único e deve levar em conta as condições de cada local. Portanto, possíveis ajustes devem ser feitos principalmente com base no efeito da temperatura sobre os parâmetros especificados na ficha técnica de dispositivos de proteção contra sobrecorrente. Além disso, algumas usinas de energia solar utilizam modelos de previsão para prever a quantidade de irradiação solar que será recebida na superfície. Estes modelos levam em conta fatores como a cobertura de nuvens, condições atmosféricas e a posição do sol no céu. Isto pode ajudar a evitar o excesso de irradiação, permitindo que a usina FV reduza a saída de seus painéis solares quando são esperados altos níveis de radiação ([HONG; MARTINEZ; FAJARDO, 2020](#); [VOYANT; NOTTON, 2018](#); [URRACA et al., 2016](#)).

## 2.4 Qualidade dos dados solarimétricos

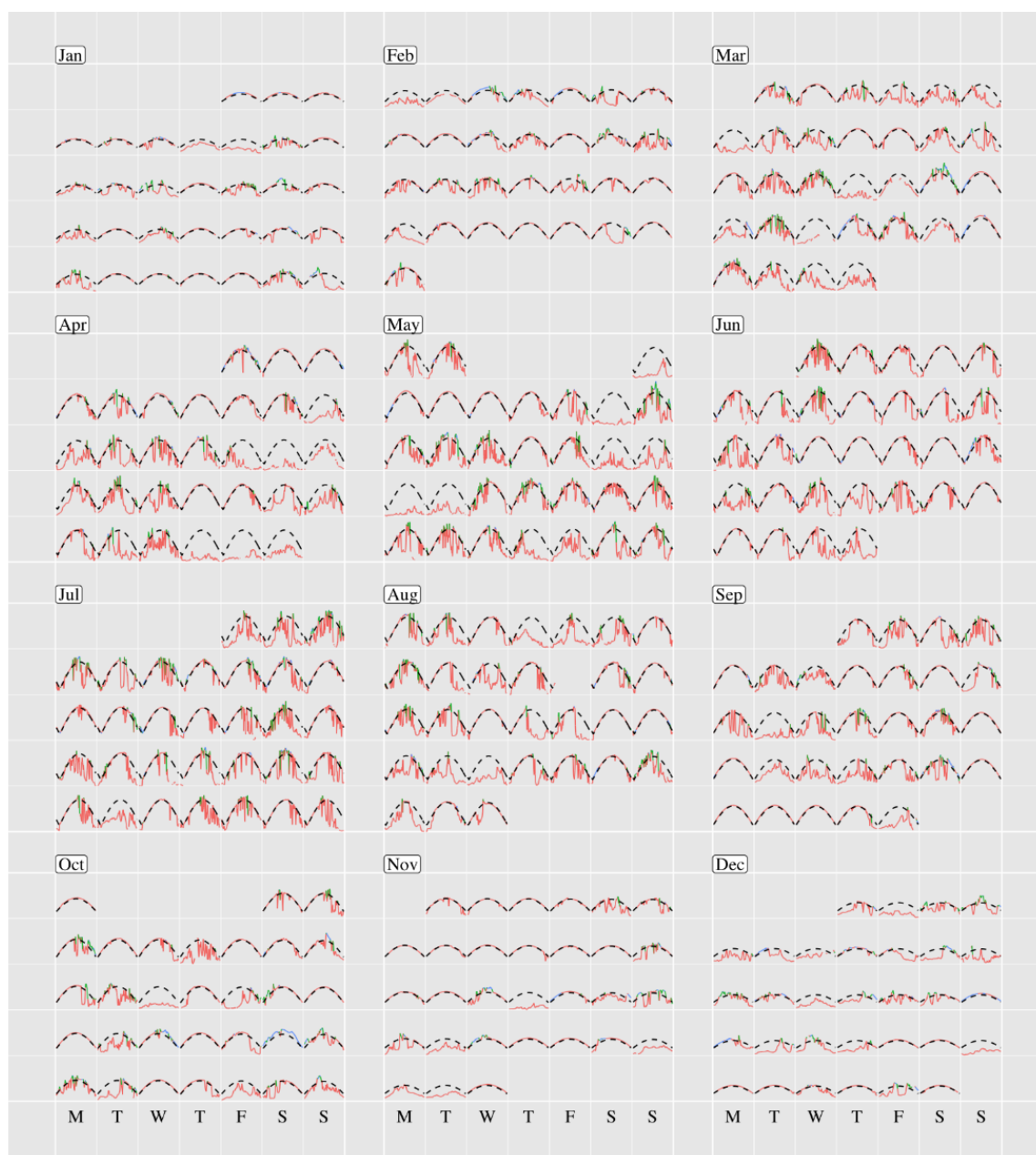
A resolução temporal da aquisição de dados de um piranômetro refere-se à frequência com que os dados de radiação solar são registrados pelo instrumento ao longo do tempo. É a capacidade do piranômetro em medir a radiação solar em intervalos regulares de tempo. Geralmente, a resolução temporal é definida em termos de intervalo de tempo entre cada leitura de dados, podendo variar de segundos a minutos, dependendo do tipo de piranômetro e das necessidades da aplicação em questão. A resolução temporal pode ser afetada por vários fatores, incluindo a capacidade do instrumento de medir a radiação de forma contínua, a frequência de amostragem do instrumento, e a capacidade do instrumento de lidar com variações rápidas na radiação solar.

Apesar de apontar a crescente melhoria na tecnologia de sensoriamento e o aumento da resolução de dados, [Yang, Yagli e Quan \(2018\)](#) colocam em discussão a falta da passagem por um teste de qualidade destes dados e propõem um procedimento de etapas de controle de qualidade. O controle de qualidade é uma técnica utilizada para garantir que os dados coletados por um piranômetro sejam precisos e confiáveis. Isso pode incluir verificações periódicas para garantir que o instrumento esteja calibrado e funcionando corretamente, verificações de dados para identificar problemas ou anormalidades, e a utilização de técnicas estatísticas para avaliar a qualidade dos dados. No trabalho, o controle de qualidade aplicado aos dados serve para descartar os registros com suspeita de incertezas

elevadas devido a fatores externos como ruídos elétricos, sujidades, desajustes de instalação e falhas operacionais dos piranômetros disponibilizados em uma base de dados de estações solarimétricas espalhadas pelo mundo (*Baseline Solar Radiation Network*). Esses dados de irradiação solar e outras medidas meteorológicas estão disponíveis para consultas públicas e conta com 60 estações localizadas em uma variedade de tipos de clima, tais como árido, tropical, temperado, entre outros. A resolução temporal, como é da maior parte dos dados, é de 1 minuto.

Os autores comentam que mesmo após uma checagem de controle de qualidade desses dados de alta resolução, ainda é possível encontrar eventos falsos intensificação de irradiância produzido por nuvens. Uma situação semelhante é relatada no trabalho de [Gu et al. \(2001\)](#). Aplicando o Controle de Qualidade, os eventos de intensificação produzido por nuvens podem ser separados dos dados errôneos.

A figura 10 apresentam dados de recolhidos no ano de 2016 de uma das estações da base de dados localizado em Boulder, no estado do Colorado, Estados Unidos da América. Esta estação é usada para exemplificar o procedimento do Controle de Qualidade que é exibido usando gráficos em um calendário. O GHI medido pelo piranômetro é representado pelas linhas vermelhas. Os eventos possivelmente causados pelo ELPN são marcados na cor verde; dados errôneos são marcados com azul. A referência de céu limpo é representada pelas linhas tracejadas pretas. Os critérios utilizados para a seleção dos dados e sua classificação é apresentada como uma metodologia no capítulo 3 deste documento.



**Figura 10** – Controle de Qualidade aplicado para um ano (2016) na estação de Boulder. O GHI medido pelo piranômetro é representado pelas linhas vermelhas. Os eventos possivelmente causados pelo ELPN são marcados na cor verde e os dados errôneos devido a inconsistência são marcados com azul. A referência de céu limpo é representada pelas linhas tracejadas pretas.

Fonte: Retirado de [Yang, Yagli e Quan \(2018\)](#)

## 2.5 Sensoriamento remoto por satélite

O sensoriamento remoto por satélite se constitui em observações de características físicas de uma área, medindo a radiação refletida e emitida a distância, possibilitando observações meteorológicas através do conjunto de dados de uma fonte de informação.

Os produtos atmosféricos via satélite podem dar medições de perfis verticais de algumas variáveis meteorológicas em todos os pontos do planeta. Em contraste com as medições terrestres, o sensoriamento remoto por satélite é capaz de mapear o planeta de forma econômica em grandes escalas (por exemplo, regional para global) durante um longo período de tempo (por exemplo, aquisições diárias durante muitos anos).

Satélites meteorológicos são equipados com instrumentos radiométricos onde os canais imageadores captam radiação eletromagnética em algumas faixas de comprimento de onda para visualização de diferentes propriedades da Terra. A radiação medida pode ser aquela emitida a partir da superfície da Terra em direção a atmosfera, também chamado de radiação de onda longa pois se encontra dentro da porção infravermelha do espectro, ou aquela refletida, da qual está relacionado com a porção de radiação de onda curta que retorna da Terra através do topo da atmosfera. Algumas das bandas espectrais são escolhidas especificamente para olhar através de diferentes janelas de transmissão para observar diferentes características atmosféricas e de nuvens.

Em seu livro, [Stull \(2015\)](#) explica que um satélite não pode medir a radiação total que sai da Terra ou da atmosfera visto que as emissões de uma superfície plana estão em todas as direções, ele somente pode medir a porção de radiação que por acaso é vindo em direção ao satélite dentro do ângulo sólido interceptado pelo instrumento radiométrico. Geralmente, as imagens dos satélites são fornecidos em “radiância” que é o fluxo de energia deixando uma área de superfície unitária por um ângulo sólido em uma determinada direção. Essas radiâncias podem ser transformadas, quando conveniente, em outras medidas, como reflectância de Topo da Atmosfera (ou TOA, na sigla em inglês) que é a razão entre a energia refletida e a energia total; e também em Temperatura de Brilho (TB) que é a temperatura de um corpo negro hipotético que produz a mesma radiância que a radiância medida, e pode ser descrita utilizando a lei de Planck em reverso, de modo que:

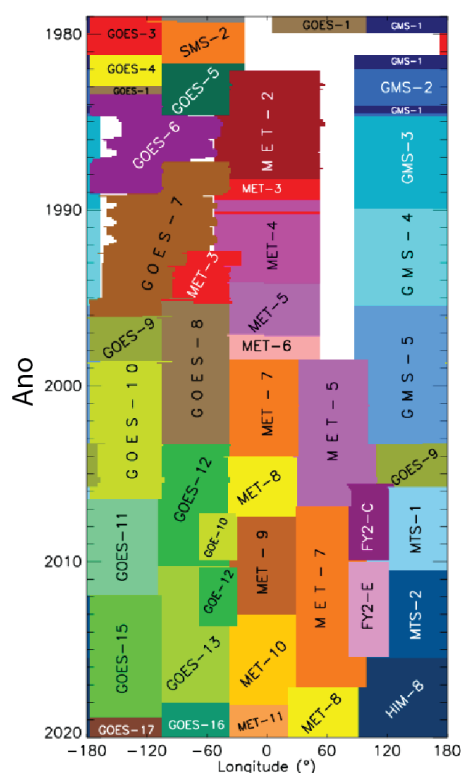
$$T_B = \frac{c_2/\lambda}{\ln\left(1 + \frac{c_{1B} \cdot \lambda^{-5}}{B_\lambda}\right)} \quad (2.4)$$

onde  $T_B$  é a Temperatura de Brilho;  $c_{1B} = 1.191 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot \mu m \cdot sr^{-1}$ ;  $c_2 = 1.438 \times 10^4 \mu m^4 \cdot K$ ;  $B$  é a radiância do corpo negro em  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$  e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

### 2.5.1 O GridSat-B1

O GridSat-B1 consiste em um produto de um projeto internacional de climatologia de nuvens por satélite ou *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP) e representa uma união de dados de observações de satélites geostacionários utilizando bandas em comum do espectro visível, janela infravermelha, e infravermelho para vapor

d'água ( $0,6 \mu\text{m}$ ,  $11\mu\text{m}$  e  $6,7\mu\text{m}$  respectivamente). Essas bandas fornecem informações sobre a superfície terrestre, temperaturas do topo de nuvens e umidade de uma camada atmosférica. Os dados passam por controle de qualidade, calibragem, são remapeados e combinados (ou gradeados, ver Figura 11) para fornecer uma cobertura quase global das radiações de topo da atmosfera a cada 3 horas desde 1980 até o presente. O canal da janela infravermelha recebe uma calibração inter-satélite mais extensa e são assim identificados como um Registro de Dados Climáticos (CDR) pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). A resolução espacial do GridSat-B1 é de aproximadamente 8 km na linha do Equador, correspondente a 0,07 graus de latitude a cada pixel de informação. Os dados abrangem o globo ao longo de toda longitude e em latitude vão desde  $70^\circ$  Sul a  $70^\circ$  Norte. Os dados do GridSat-B1 são armazenados em formato netCDF (*Network Common Data Form*) usando a convenção “*Climate and Forecasting*” (KNAPP et al., 2011).



**Figura 11** – Gradeamento de satélites geostacionários ao longo da longitude planetária em uma série histórica (Gridsat-B1)

Fonte: Retirado de Knapp et al. (2011)

O principal benefício do GridSat-B1 é que ele fornece dados calibrados, mapeados e de qualidade controlada aos usuários. Em vez de fornecer dados na projeção nativa por satélite, os dados são mapeados para uma grade de ângulo equivalente. Knapp (2016) afirma que o impacto mais significativo nas comparações mensais é o efeito zênite da visão de satélite. A absorção do vapor de água troposférico faz com que as temperaturas observadas

sejam menores do que a temperatura da superfície. A quantidade de absorção (e reemissão) aumenta à medida que comprimento do caminho através da atmosfera aumenta. Assim, em ângulos de visão mais amplos, esse efeito diminui significativamente a temperatura observada pelo satélite. Joyce et al. (2000, apud [Knapp \(2016\)](#)) desenvolveu uma técnica para reduzir esse efeito sobre os dados geoestacionários, normalizando efetivamente a observação a uma Temperatura de Brilho próximo ao nadir. Esta abordagem foi utilizada no GridSat-B1 para reduzir o impacto do brilho atmosférico sobre os dados porque as temperaturas mais frias são geralmente retratadas como valores mais brilhantes na maioria das imagens de satélite.

## 2.5.2 Satélite GOES-16

A nova geração dos satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*), nomeado de série GOES-R, são necessários para garantir a continuidade e melhoria dos dados de monitoramento através do sensoriamento remoto por uma órbita geossíncrona. O primeiro satélite desta série foi lançado em 19 de novembro de 2016 e se tornou GOES-16 em 29 de novembro quando alcançou sua órbita geoestacionária. O satélite possui uma expectativa de vida operacional de 15 anos. Os atributos espaciais, espectrais e temporais foram significativamente melhorados com relação aos seus predecessores — os satélites GOES 13 e 15. A melhoria na resolução espacial são de 4 para 2 quilômetros nas bandas do infravermelho e de 1 quilômetro para 500 metros na banda visível do vermelho (comprimento de onda de 0,64 micrômetros). Essas melhorias resultam em imagens com qualidade superior, possibilitando observações mais precisas e mais confiáveis ([SCHMIT et al., 2017](#); [SCHMIT et al., 2018](#)).

O ABI (*Advanced Baseline Imager*) é um radiômetro imageador de 16 bandas espectrais presente nos atuais satélites GOES capaz de adquirir informações radiométricas do hemisfério Ocidental. As diferentes bandas espectrais dos sensores têm aplicações distintas em estudos de sensoriamento remoto. Cada um dos 16 canais do ABI mede a quantidade de energia refletida ou emitida em um determinado comprimento de onda eletromagnética ao longo do espectro eletromagnético para obter informações sobre a atmosfera, a superfície ou do oceano. O quadro 1 apresenta as resoluções horizontais referente a largura longitudinal, o comprimento de onda central referente a banda espectral e a principal atividade de monitoramento atribuídas a cada banda. A cobertura espacial de uma imagem em disco completo, correspondente ao modo 6 de operação, é realizada seis vezes por hora ([SCHMIT et al., 2017](#)).

Quadro 1 – Lista de atributos importantes das bandas espectrais do ABI a bordo do satélite GOES-16

Bandas	Resolução Horizontal	Comprimento de onda central	Tipo	Monitoramento
1	1 km	0,47 $\mu\text{m}$	Visível	Aerossol
2	500 m	0,64 $\mu\text{m}$	Visível	Nuvens
3	1 km	0,865 $\mu\text{m}$	Infravermelho-próximo	Vegetação
4	2 km	1,378 $\mu\text{m}$	Infravermelho-próximo	Cirrus
5	1 km	1,61 $\mu\text{m}$	Infravermelho-próximo	Gelo e neve
6	2 km	2,25 $\mu\text{m}$	Infravermelho-próximo	Tamanho de partícula das nuvens
7	2 km	3,90 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Janela de onda curta
8	2 km	6,19 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Vapor d'água troposférico em nível superior
9	2 km	6,95 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Vapor d'água troposférico em nível médio
10	2 km	7,34 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Vapor d'água troposférico em nível baixo
11	2 km	8,44 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Fase do topo das nuvens
12	2 km	9,61 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Ozônio
13	2 km	10,33 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Janela do infravermelho de onda longa “limpo”
14	2 km	11,21 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Janela do infravermelho de onda longa
15	2 km	12,29 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Janela do infravermelho de onda longa “sujo”
16	2 km	13,29 $\mu\text{m}$	Infravermelho	Janela do infravermelho do gás carbônico (CO <sub>2</sub> )

Fonte: Retirado de [Schmit et al. \(2017\)](#).

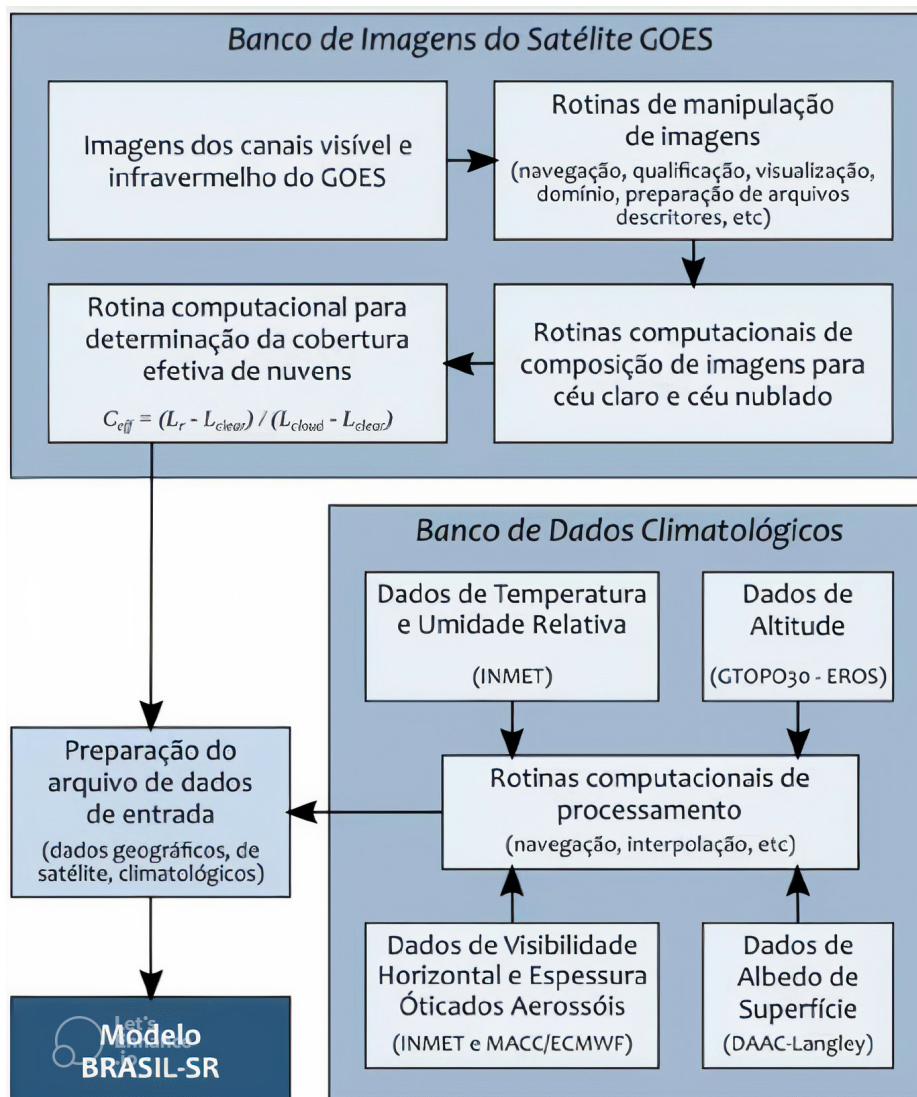
A banda 2 possui a melhor resolução espacial em sua dimensão horizontal, e é utilizada principalmente para análises de nuvens diurnas. A resolução de meio quilômetro permite a observação de nuvens com mais detalhes, especialmente útil em setores de mesoescala para fenômenos de mudança rápida.

## 2.6 ELPN e a estimativa de radiação em superfície.

Há várias maneiras de estimar a porção de energia solar que chega à superfície da Terra. Um método comum é através do uso de radiômetros ou piranômetros, que medem a quantidade de radiação solar incidente em uma superfície, porém a cobertura espacial limita-se ao local onde a estação é instalada. Outro método é através do uso de imagens

de satélite, que podem ser usadas para estimar a quantidade de radiação solar que chega à superfície medindo a quantidade de radiação eletromagnética emitida pelo Sol que é refletida ou absorvida por nuvens, gases atmosféricos e outros fatores. No artigo de [Luiz et al. \(2018\)](#), os autores exploram a possibilidade de usar informações visíveis via satélite para estudar a variabilidade da irradiação solar em grandes áreas onde dados terrestres não estão disponíveis. O estudo foi realizado em zonas climáticas brasileiras e os resultados mostram que a análise das imagens de satélite podem fornecer informações úteis sobre a variabilidade da irradiação solar ao longo do dia em diferentes áreas assumindo que a cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da irradiação solar em superfície. Além disso, o estudo permite examinar a variabilidade da nuvem em uma perspectiva espacial e temporal apropriada para obter uma melhor compreensão da intermitência da geração de energia solar. Essa abordagem pode ser uma alternativa interessante para suprir a falta de dados terrestres e ajudar a compreender melhor a distribuição da energia solar em áreas extensas.

Os modelos de estimativa da radiação solar que chega à superfície da Terra são importantes para a prospecção da energia solar. O Atlas brasileiro da energia solar ([MARTINS et al., 2017](#)) é um recurso criado para ajudar a entender a variabilidade espacial, temporal e de intensidade do recurso solar. Ele foi feito coletando dados de várias fontes, incluindo satélites, radiação solar medida no solo e implementação dos vários avanços nas parametrizações do modelo de transferência radiativa, denominado “BRASIL-SR” (figura 12). Esses dados são então processados e analisados para produzir mapas que estimam a incidência de energia solar no Brasil.



**Figura 12** – Esquemática dos passos para o modelo de parâmetros BRASIL-SR

Fonte: Retirado de [Martins et al. \(2017\)](#)

É importante notar que a precisão destes métodos depende da qualidade e disponibilidade dos dados, da localização específica e período de tempo sendo estudado.

Os processos radiativos simulados no modelo chamado BRASIL-SR são: nuvens, espalhamento Rayleigh devido aos gases atmosféricos, absorção por gases atmosféricos (ozônio, gás carbônico e vapor d'água) e espalhamento Mie devido aos aerossóis. A dispersão das ondas eletromagnéticas pelo espalhamento, tal como espalhamento Mie, pode contribuir para o ELPN ([YORDANOV et al., 2012](#)) porque as nuvens são formadas por gotículas de água, que são aproximadamente do mesmo tamanho que algumas faixas do comprimento de onda da radiação eletromagnética proveniente do Sol ([SINGHAM; BOHREN, 1987](#)). Quando a radiação solar atinge uma nuvem, as gotículas de água dispersam as ondas eletromagnéticas em todas as direções. A quantidade espalhada depende do tamanho e do número das gotas na nuvem e do ângulo em que as ondas atingem a nuvem. Por conta

disso, nuvens muito finas não oferecem oportunidades suficientes de dispersão para criar o ELPN (PECENAK et al., 2016).

Segundo Albarelo et al. (2015) a irradiação solar que atinge a superfície terrestre geralmente pode ser obtida através de imagens de satélite modelando os efeitos da atmosfera sobre a radiação solar a partir de um Modelo de Transferência Radiativa (MTR). Componentes atmosféricos (tais como ozônio, vapor de água, propriedades do aerossol) e parâmetros da nuvem (tais como profundidade óptica da nuvem, altura e fase) são usados como parâmetros para o MTR. Para os autores, ainda é possível que irradiação solar que atinge a superfície seja estimada indiretamente ligando o uso de um MTR à um modelo de céu limpo ou à um índice de nuvens. Pecenak et al. (2016) afirma que apesar de uma grande quantidade de dados empíricos para o ELPN, poucos tentaram modelar os efeitos com um MTR. Para isso, Pecenak et al. (2016) apresenta um estudo detalhado sobre a dependência do ELPN com o ângulo zenital solar e a espessura óptica das nuvens, com base em simulações realizadas com um MTR. Os resultados indicam que o ELPN é mais intenso para nuvens mais espessas e para ângulo zenital solar menores.

Damiani et al. (2018) afirmam que as medições pontuais podem desviar-se fortemente da média espacial de uma área circundante, e as comparações satélite-terra realizadas em escalas de tempo médio-longo tendem a suavizar a variabilidade da radiação, escondendo assim questões importantes, sendo uma delas o ELPN. Embora que estes eventos geralmente têm apenas um pequeno impacto espacial e, embora bastante frequentes sob condições de “nuvens quebradas”, podem não ser reproduzidos por algoritmos de satélite baseados em modelos homogêneos de plano paralelo e nuvens de camada única.

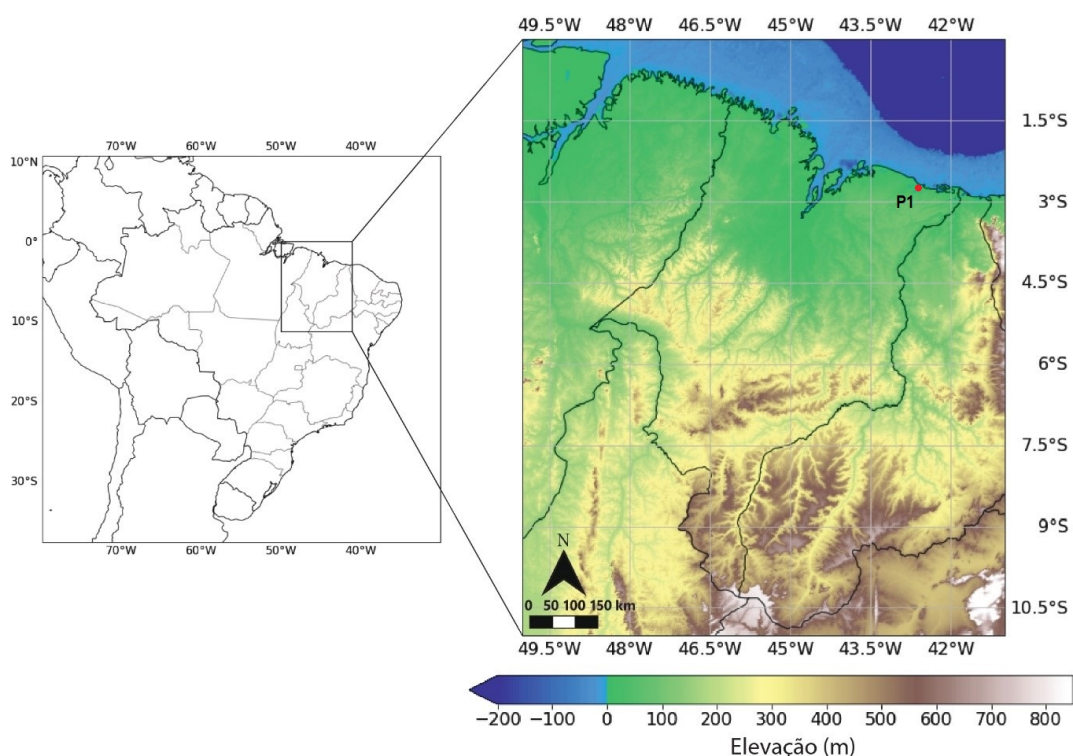
## 3 DADOS E METODOLOGIA

Para análise da distribuição espaço-temporal de nuvens foram estabelecidas algumas etapas, tais como a aquisição de dados de satélites; detecção de eventos de intensificação de irradiância na estação em solo; desenvolvimento de código de programação para as análises e posterior geração de mapas da climatologia de cobertura de nuvens. Após todas as etapas, as metodologias estatísticas utilizadas possibilitaram o estudo da tendência climatológica de nuvens e estabelecimento de uma correlação intersensores entre a ocorrência de nuvens por satélites e ocorrência do efeito lente, detectado por piranômetros de uma estação meteorológica e do rastreador solar fixo.

### 3.1 Área de estudo

O estado do Maranhão, localizado no nordeste brasileiro, está em uma região de baixa latitude, por conta de sua proximidade com a Linha do Equador, e tem um litoral de aproximadamente 640 quilômetros. De acordo com [Palharini e Vila \(2017\)](#), o clima é caracterizado como quente e úmido, com chuvas concentradas durante o verão. É importante mencionar que o clima do Maranhão é influenciado por uma Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Durante a estação chuvosa, a ZCIT se encontra deslocada mais ao sul, favorecendo a formação de nuvens e chuvas, enquanto que durante a estação seca, a ZCIT se encontra posicionada mais ao norte, levando a menos chuvas e menor umidade relativa. O deslocamento da ZCIT é um dos principais mecanismos responsáveis pela caracterização do clima. Outro mecanismo importante é a convecção local, que se refere à formação de nuvens devido à elevação do ar quente e úmido, devido ao aquecimento solar. O clima quente e úmido no Maranhão contribuem significativamente para a formação de nuvens devido a este processo. O regime de brisas também pode influenciar o clima no estado, especialmente na costa. As brisas marítimas podem trazer umidade, enquanto as brisas continentais podem trazer ar seco e quente. Por fim, as perturbações ondulatórias dos alísios, que são sistemas de baixa pressão que se movem ao longo dos trópicos, podem causar chuvas isoladas e temperaturas mais baixas em alguns períodos do ano.

A figura 13 apresenta o modelo de elevação digital da área representado por um recorte do planisfério político em projeção *plate carrée* (projeção cilíndrica equidistante) indo de 50° a 41° Oeste e de 0° a 11° Sul em coordenadas geográficas, resultando em uma área de aproximadamente 923.782 km<sup>2</sup>, sendo que somente a área do território maranhense possui 331.983 km<sup>2</sup>. O ponto em vermelho indica o ponto P1 onde são instalados a estação meteorológica e o rastreador solar fixo.



**Figura 13** – Localização geográfica e modelo digital de elevação do estado do Maranhão e regiões adjacentes. O ponto P1 indica o local da instalação da estação meteorológica e do rastreador solar.

Fonte: Autoria própria.

## 3.2 Dados remotos

Os dados coletados para a avaliação da cobertura de nuvens são retirados de dois tipos de conjuntos: GridSat-B1 e GOES-16. O primeiro conjunto de dados permite obter a climatologia de cobertura de nuvens, bem como a distribuição espaço-temporal de nuvens baixas, por mais de 30 anos (de 1990 a 2022). O segundo conjunto é utilizado para caracterização de altitude de topo de nuvens e configuração espacial ao redor da estação meteorológica instalada. As metodologias empregadas a partir desses conjuntos é apresentada nas seções 3.2.1 e 3.2.2.

### 3.2.1 Climatologia de cobertura de nuvens com o GridSat-B1

No contexto do sensoriamento remoto por satélite, os dados do GridSat-B1 fornecem um conjunto uniforme de observações de satélites geoestacionários. Os satélites são combinados considerando a posição mais próxima do nadir para cada ponto da grade monitorado. É utilizado principalmente para a avaliação espacial da cobertura de nuvens no contexto da climatologia histórica global. O quadro 1 mostra as principais características desses dados:

Quadro 1 – Informações descritivas do GridSat-B1

Itens	Descrição
Resolução Espacial	8 km
Resolução Temporal	180 min
Canais de varredura	Infravermelho, Vapor D'água e Visível
Grandezas medidas	Temperatura de Brilho e Refletância
Período de recolhimento dos dados	1980 - até o presente
Normalização Intersatélite	Sim
Normalização Temporal	Sim
Formato de codificação	netCDF (network Common Data Form)
Volume (1 mês)	12GB

Fonte: Retirado de [Knapp \(2014\)](#).

A temperatura de brilho, a grandeza medida pelos satélites GridSat-B1 pelos canais de infravermelho térmico e de vapor d'água (11 e 6.7  $\mu\text{m}$ , respectivamente) é uma medida da radiação no infravermelho que advém do topo da atmosfera até o satélite, expressa em unidades da temperatura de um corpo negro equivalente (ver equação 2.4). A temperatura de brilho do canal do infravermelho térmico de uma superfície é tipicamente realizada por uma medição óptica com a intenção de determinar a temperatura real do sistema.

A tabela 2 exibe valores de temperatura de brilho contidos em certos intervalos. Os dados coletados são condicionados dentro desses intervalos a fim de obter a classificação dos diferentes tipos de nuvens em termos de sua altitude de ocorrência. Este método é empregado no trabalho de [Muhsin \(2021\)](#), que também utiliza os dados do GridSat-B1. A aplicação deste método é condizente com o escopo deste estudo, a fim de verificar a ocorrência de nuvens baixas, dentre as quais as nuvens do tipo cumulus são classificadas.

**Tabela 2** – Condição de restrição para a classificação das nuvens. Os valores de temperatura de brilho estão em Kelvin.

Tipo de Nuvem	Limites para o infravermelho	Limites para o canal de vapor d'água	Altitude do topo de nuvem
Nuvens de baixo nível	Entre 280 e 270	>246	<2 km
Nuvens de médio nível	Entre 270 e 246	-	<8 km
Nuvens profundas	Entre 246 e 210	-	<14 km
Nuvens muito profundas	<210	-	>14 km
Nuvens cirrus semi-transparentes	>270	<246	-

Fonte:Retirado de [Muhsin \(2021\)](#)

As nuvens de baixo nível e as do tipo cirrus semi-transparentes passam pela condição de restrição por dois canais (infravermelho e de vapor d'água). Este método é chamado de

método bi-espectral (MUHSIN, 2021). A utilização do método é necessária apenas se a temperatura de brilho do canal infravermelho não for suficiente para determinar a altitude do topo das nuvens.

### 3.2.2 Observações com o GOES-16 e determinação de altitude de topo de nuvens

O GOES-16 opera com 16 bandas espectrais, nas faixas do visível, infravermelho-próximo e infravermelho (SCHMIT *et al.*, 2012). Cada banda espectral possui um uso primário, uma vez que o sensor equipado capta informações em diferentes comprimentos de onda possibilitando observar várias características da composição da atmosfera nas faixas de absorção dos constituintes moleculares. A banda 2 detecta o reflexo visível da radiação solar no comprimento de onda central de 0.64 microns e tem uso primário definido no monitoramento diurno de nuvens, além de possuir excelente resolução espacial de 500 metros. Os dados nesta banda são medidos por refletância solar no topo da atmosfera, que é a quantidade de radiação solar refletida em dado instante. No espectro visível, a refletância é o atributo mais efetivo para separar diferentes informações, como nuvens e a superfície terrestre. As informações desta banda são responsáveis pela análise qualitativa de nuvens em um conjunto de dados mais precisos, aproveitando melhores resoluções ao se comparar ao conjunto GridSat-B1. O quadro 3 apresenta algumas informações técnicas acerca do satélite.

Quadro 2 – Informações descritivas do satélite GOES-16.

Itens	Descrição
Resolução espacial	500 m, 1 ou 2 km (dependendo do canal)
Resolução temporal	10 minutos em disco completo no modo operacional padrão
Canais de varredura	2 canais no espectro visível, 4 no infravermelho-próximo e 10 no infravermelho
Grandezas medidas	Reflectância e Temperatura de Brilho
Cobertura	Hemisfério Ocidental
Período de recolhimento de dados	2017 - até o presente
Normalizado pelo ângulo do zênite solar	Sim
Formato de codificação	<i>netCDF</i> ( <i>network Common Data Form</i> )

Fonte: Retirado de Knapp (2014).

Os dados do GOES-16 são úteis para determinar mais precisamente a ocorrência de nuvens baixas e médias, bem como a distinção de fase das nuvens. Um método abordado por Purbantoro *et al.* (2018) apropria-se do conceito de gradiente adiabático (ou *lapse rate*, no inglês) para a estimar quantitativamente a altitude do topo de nuvens. Na troposfera, que representa a camada inferior da atmosfera onde ocorrem a formação de nuvens, o

gradiente adiabático representa a variação de temperatura das massas de ar em movimento vertical. Em média, apresenta o valor de  $\delta = 6,5K/km$ . A diferença da temperatura de brilho em uma imagem de um canal dos satélites pode ser entendido como a variação da altitude das nuvem, uma vez que a temperatura diminui com um aumento da altitude. Por conta disso, a altitude do topo de nuvens pode ser dada pela expressão:

$$h = \frac{1}{\delta}(T_s - T_{CT}) \quad (3.1)$$

onde  $\delta = 6,5K/km$  é o valor padrão do gradiente adiabático,  $T_s$  é a temperatura da superfície, e  $T_{CT}$  é a temperatura do topo das nuvens.

Este método é realizado sobre uma área de cobertura do satélite Himawari-8, um satélite meteorológico japonês, assumindo que  $T_{CT}$  é igual aos valores de Temperatura de Brilho respectivo ao canal 13 e o valor de  $T_s$  é considerado como a temperatura medida no local ao nível do solo em Kelvin. O canal 13 do Himawari-8 possui comprimento de onda central em  $10,4 \mu m$  enquanto para o imageador do satélite GOES-16 o comprimento do canal 13 é similar, de  $10,3 \mu m$ , e são considerados inter-comparáveis (SCHMIT et al., 2018).

A altura do topo de nuvens como vistos por satélites refere-se à altitude do nível mais alto de uma nuvem como visto de cima. Nuvens que possuem desenvolvimento vertical vão apresentar diferentes altitudes de topo em relação a sua base. Nuvens consideradas de baixo nível têm sua base até 2 km de altitude acima do solo e podem se desenvolver verticalmente. Considerando que a altitude de topo de nuvens pode apontar características importantes para a sua identificação, o método de Purbantoro et al. (2018) pode ajudar a qualificar nuvens durante o ELPN. Além do mais, propicia a utilização de dados de melhor precisão do que GridSat-B1. Este método é especialmente importante para o escopo deste trabalho pois apresenta um enorme potencial para ajudar a investigar a presença de nuvens e sua respectiva altitude de topo durante o ELPN, além de contar com a disposição dos dados do satélite GOES-16 o que permite trazer a abordagem para o hemisfério ocidental.

### 3.3 Dados em solo

As medições em solo são feitas por piranômetros presentes no rastreador solar fixo do modelo “*Solys2 Sun Tracker*” e na estação meteorológica, como pode ser visto na figura 14. As coordenadas geográficas são  $2^\circ 43' 29''$ Sul e  $42^\circ 34' 31''$ Oeste, situado na costa do Maranhão.



**Figura 14** – 1: *Solys2 Sun Tracker*; 2: Estação Meteorológica. Equipamentos instalados na costa maranhense (Ponto P1) durante a campanha de pesquisa.

Fonte: Fotografia retirada in situ.

A data de início de operação dos equipamentos ocorreu em 10 de novembro de 2021. Os piranômetros podem medir a irradiância solar com precisão, mas apenas sobre uma região particular. A variável principal para o escopo deste estudo é a Irradiância solar Global no plano Horizontal (GHI) obtido dos piranômetros através de uma termopilha escurecida de alta qualidade protegida por duas cúpulas de vidro. O quadro 3 apresenta características técnicas do piranômetro do modelo CMP10, responsável por prover os dados utilizados no trabalho.

Quadro 3 – Especificações técnicas do piranômetro presente no rastreador solar fixo e na estação meteorológica do modelo CMP10 da fabricante Kipp & Zonen.

Itens	Descrição
Campo de visão	180°
Tipo de detector	Termopilha
Aplicações recomendadas	Redes meteorológicas, painel fotovoltaico
Tempo de resposta (63%)	<1.7 segundos
Tempo de resposta (95%)	<5 segundos
Faixa de saída esperada (0 a 1500W/m <sup>2</sup> )	0 a 20mV
Faixa espectral	270 a 3000nm
Resposta à temperatura	<1 % (-10°C a 40°C)

Fonte: Retirado de [Kipp & Zonen \(2022\)](#).

Como houve dificuldades para a calibração e ajuste do rastreador solar fixo “*Solys2 Sun Tracker*”, as informações de Irradiância Direta Normal (DNI) e Irradiância Horizontal Difusa (DHI) não puderam ser consideradas para análise.

Os dados dos piranômetros são armazenados em um *Data Logger*, dispositivo que os guarda continuamente em uma memória física. Para análises em tempo real, esses dados podem ser lidos remotamente, pois estes dados são transmitidos via rede de celular para um servidor de acesso privado. O tipo de arquivo dos dados físicos estão em “.csv” (*comma separated values*), que pode ser facilmente manipulado e analisado por computador.

### 3.3.1 Garantindo a correta detecção de eventos ELPN

Um procedimento de etapas de controle de qualidade proposto por [Yang, Yagli e Quan \(2018\)](#), servirá para eliminar incertezas de medições dos piranômetros. Aplicando algumas etapas aos dados, os eventos de intensificação produzido por nuvens podem ser separados dos dados errôneos (dados os quais possivelmente não são ELPN devido a incertezas das medições, ver equação 2.3). No procedimento proposto para detecção de eventos de intensificação de irradiância, agregam-se todos os dados de uma estação dentro de um intervalo de 6 minutos. Os dados considerados estão dentro dos seguintes critérios:

- O desvio padrão de 3 conjuntos de dados agregados de 6 minutos consecutivos deve ser maior que 0.05 para ângulos de zênite menores que  $75^\circ$  e GHI/Clr deve ser maior que 1.10 (ajustado para 1.05 pela equação 2.3), onde Clr é o valor de referência de céu limpo obtido através do modelo de céu limpo de Ineichen (equação 2.2);
- Pelo menos três pontos de dados válidos de 1 minuto são necessários para cada ponto de dados agregados de 6 minutos.

Dessa forma, dados que se enquadrem dentro desses critérios são considerados eventos ELPN, eliminando o fator de faixa de erro das medições dos piranômetros e do modelo de céu limpo que é uma aproximação matemática da situação atmosférica real desconsiderando a presença de nuvens. Os dados que são enquadrados como incertos, não podem ser classificados como ELPN e residem em uma faixa intermediária entre a curva do modelo de céu limpo e a mesma curva multiplicada por 1,05 (5% acima da curva do modelo). Já os dados considerados ELPN válidos devem estar acima desta faixa, além de obedecer os passos do Controle de Qualidade proposto.

## 3.4 Trabalhando os dados no computador

Para realizar o processamento dos dados retirados do *Data Logger* que contém as medições dos piranômetros e também dos satélites meteorológicos é, portanto, iniciado a

coleta e armazenamento dos dados no computador para que sejam finalmente tratados e analisados. A linguagem de programação escolhida é o *Python* (versão 3.8) pela sua popularidade e facilidade de aprendizagem. Também é requisito instalar as respectivas bibliotecas e módulos assim como são listadas e descritas no quadro 4 para se trabalhar com computação numérica, plotagem de mapas, manipulação e aquisição de arquivos e análise estatística.

Quadro 4 – Informações descritivas das principais bibliotecas usadas para trabalhar com os dados.

Bibliotecas	Funções	Descrição	Referência
xarray	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 <code>xarray.open_dataset(arquivo.nc)</code></li> <li>2 <code>dataset.variavel &gt; valor</code></li> <li>3 <code>dataset.mean(time)</code></li> <li>4 <code>dataset.groupby("time.season")</code></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abre o arquivo em formato NetCDF</li> <li>2. Seleciona uma variável e a condiciona</li> <li>3. Realiza cálculo da média no tempo</li> <li>4. Agrupa os dados em estações do ano</li> </ol>	Hoyer, S. & Hamman, J. (2017)
numpy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 <code>numpy.multiply(matriz1,matriz2)</code></li> <li>2 <code>numpy.array(objeto)</code></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Multiplica duas matrizes</li> <li>2. Transforma um objeto em vetor</li> </ol>	Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al. (2020)
cartopy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 <code>add_feature( cfeat. STATES. with_scale('50m'))</code></li> <li>2 <code>crs.Projection(projeção)</code></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Constrói a geometria dos estados ao plot do gráfico com escala de 50 m</li> <li>2. Define o sistema de coordenadas projetado</li> </ol>	Met Office (2010)
matplotlib	Função “plot”	Exibe graficamente os dados	Price-Whelan, Adrian M., et al. (2018)
scipy	Função “linregress”	Calcula a regressão linear de mínimos quadrados para dois conjuntos de medidas	Virtanen, Pauli, et al. (2020)
pvlib	Função “get_irradiance” e “get_clearsky”	Obtém modelos de céu limpo para uma determinada localização	Holmgren, William F., Clifford W. Hansen & Mark A. Mikofski. (2018)
pandas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 <code>Dataframe(dados, indices,colunas)</code></li> <li>2 <code>pandas.read_csv('arquivo.csv')</code></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Constrói ou manipula uma planilha de dados</li> <li>2. Abre um arquivo do tipo .csv</li> </ol>	McKinney, Wes. (2011)

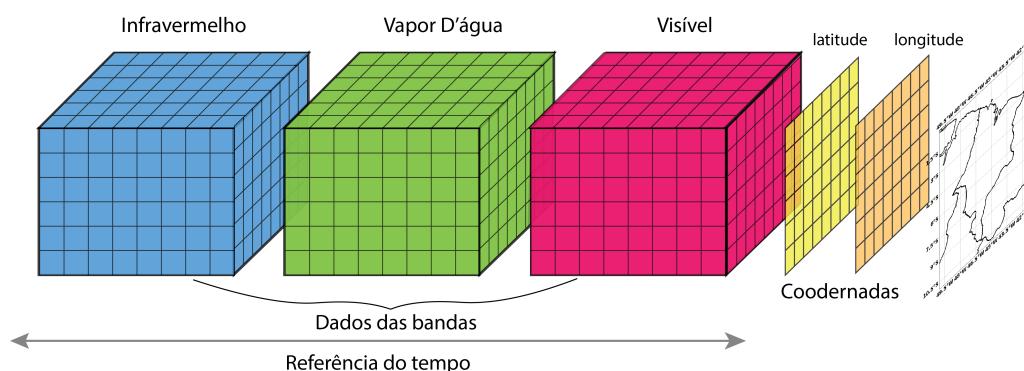
Fonte: Referências são supracitadas.

A utilização de linguagem de programação se faz necessária tendo em vista a ordem

da quantidade de dados a serem trabalhados. Lembrando que a escala de tempo dos dados pode ser de 5 segundos (piranômetros), 10 minutos (GOES-16) e 3 horas (GridSat-B1).

### 3.4.1 Dados dos satélites

Os dados são coletados via *download* e são armazenados no computador. A figura 15 mostra a estrutura do conjunto GridSat-B1 de dados baixados. Os dados do GridSat-B1 são baixados através de *File Transfer Protocol* (FTP) através dos dados fornecidos pelos servidores da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Já os dados do GOES-16 são baixados através dos servidores AWS (*Amazon Web Service*), o que representa uma das formas em que os dados estão armazenados. De maneira geral, os dados do GOES-16 e do GridSat-B1 são semelhantes, possuem metadados de dimensões geográficas, atributos informativos e guardam as variáveis das grandezas medidas.



**Figura 15** – Estrutura do conjunto de dados para os dados do *GridSat-B1*

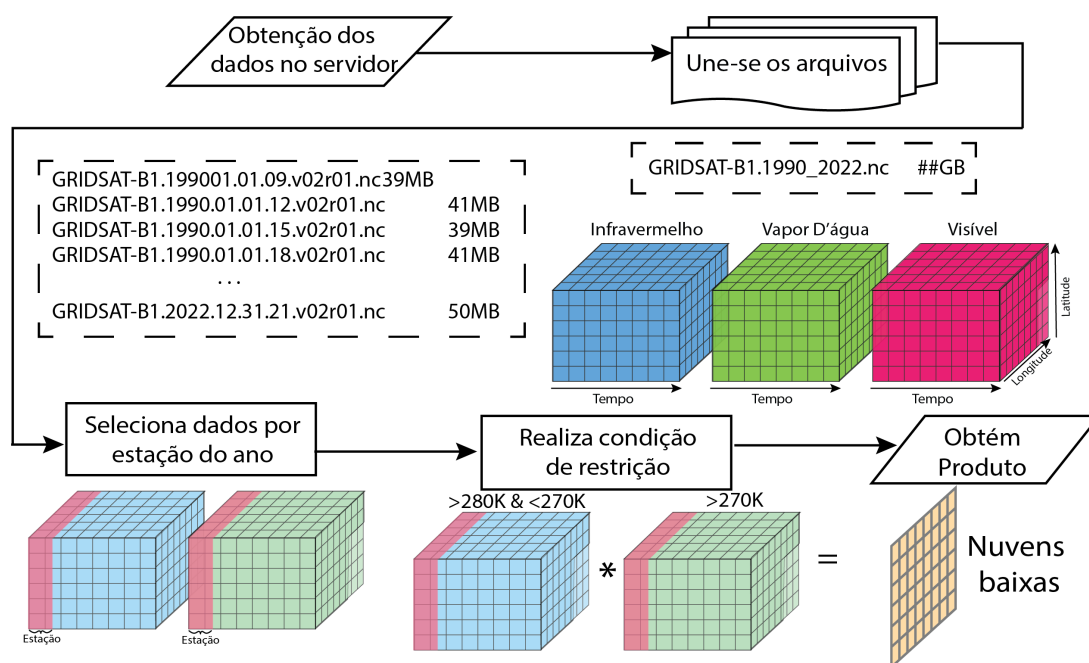
Fonte: Autoria própria.

#### 3.4.1.1 Utilizando GridSat-B1 para climatologia de cobertura nuvens

A classificação por condição de restrição utilizada para os canais do infravermelho e de vapor d'água dos satélites gradeados “GridSat-B1” é uma técnica que pode ser usada para detectar a cobertura de nuvens. A ideia básica é usar valores que delimitam os dados para separar os pixels da imagem em classes de nuvens (assim como descrito na tabela 2). O valor limiar é escolhido com base nas características dos dados do satélite, tais como a temperatura de brilho, reflectância ou outros parâmetros relacionados com a cobertura da nuvem.

A figura 16 apresenta um fluxograma apresentando alguns passos para a obtenção da cobertura de nuvens gerada a partir do método de classificação por condição de restrição. Baixa-se os dados através do site “<https://www.ncei.noaa.gov/data/geostationary-ir->

channel-brightness-temperature-gridsat-b1/access/"; em seguida agrupa-se os arquivos de forma a compilar todos os arquivos em um único arquivo. Seleciona-se os dados em estações do ano; acessa os dados dos canais infravermelho e de vapor d'água e os limita de acordo com valores condicionais de temperatura de brilho usando ferramentas de manipulação matemática matricial. Isso é feito para obter informações separadas de cada tipo de nuvem. Para exibição desses dados sobre uma região de interesse, um recorte geográfico é feito restringindo a latitude e a longitude da região do Maranhão (de 50° a 41° Oeste e de 0° a 11° Sul).



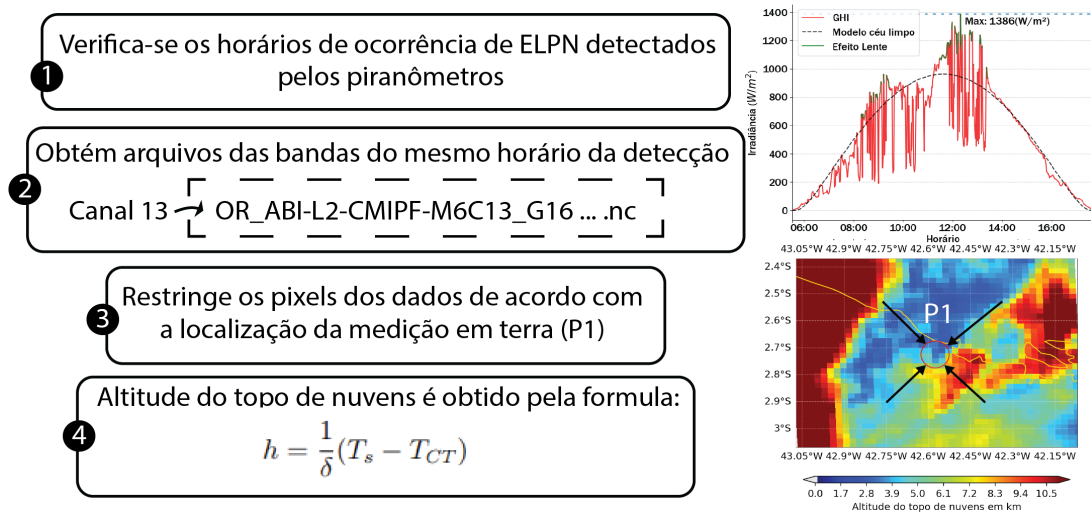
**Figura 16** – Fluxograma de passos para obtenção do produto de cobertura de nuvens pelo método de condição de restrição dos dados GridSat-B1

Fonte: Autoria própria.

### 3.4.1.2 Utilizando GOES-16 para encontrar altitude de topo de nuvens

A temperatura de brilho em um único canal de imagem de um satélite pode ser usada para inferir a variação na altitude de topo das nuvens. Conforme a temperatura diminui com o aumento da altitude, as nuvens mais frias parecerão mais brilhantes na imagem e as nuvens mais quentes parecerão mais escuras. Esta relação é comumente usada para inferir a altitude de topo das nuvens usando imagens infravermelhas capturadas por satélites. O canal infravermelho é sensível à temperatura das nuvens, e a temperatura de brilho medida neste canal pode ser usada para estimar a temperatura das nuvens. Esta temperatura pode então ser usada para inferir a altitude das nuvens usando a relação temperatura com relação a altitude do topo de nuvens. Segue os seguintes passos como mostrado na figura 17 para a identificação de altitude de topo de nuvens nos momentos

em que se é detectado um evento ELPN em medições em terra:



**Figura 17** – Metodologia empregada para a identificação da altitude de topo de nuvens em momentos de ELPN em alguns passos.

Fonte: Autoria própria.

1. Identifica-se o momento do pico de irradiância causado pelo ELPN pelo piranômetro:

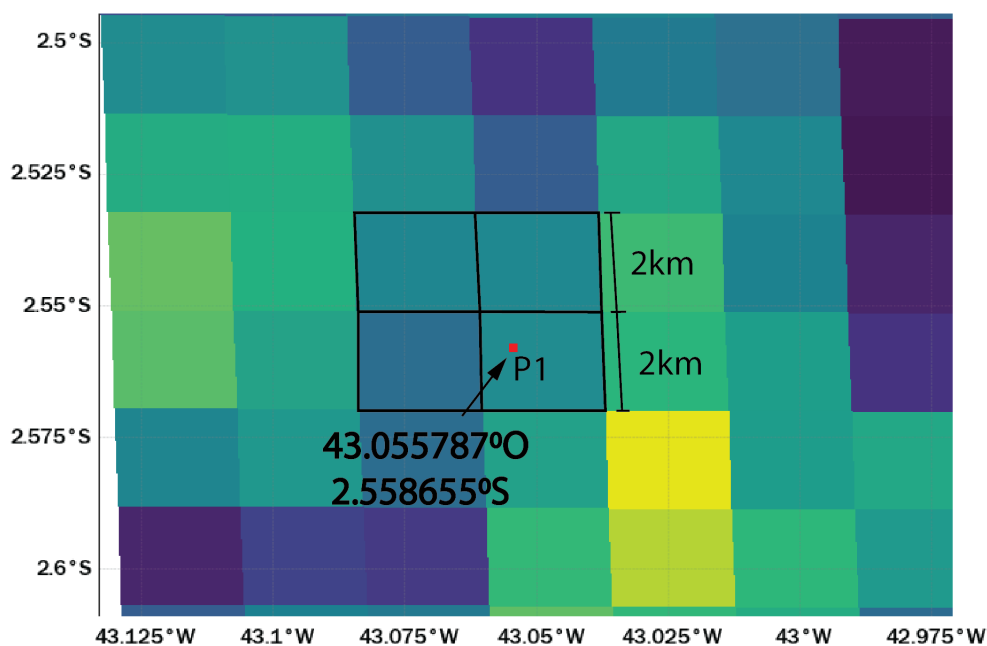
- A partir dados do piranômetro, é possível encontrar eventos ELPN, o horário de sua ocorrência é então sincronizado com as imagens de satélites;
- Os dados de satélite são utilizados para identificar a propriedade das nuvens nestes momentos.

2. Obter dados do canal 13 do mesmo momento da detecção a partir de um satélite:

- Realiza o download dos dados do canal 13 do satélite GOES-16 que cobre a área onde o piranômetro está instalado e fornece dados para o tempo e parâmetro desejados (temperatura local e temperatura de brilho).

3. Restringir estes dados do satélite para contabilizar apenas a área onde o piranômetro está instalado:

- Apenas uma grade de 2x2 pixels (figura 18) acima do local onde o piranômetro é instalado (ponto P1) são considerados para a análise.



**Figura 18** – Grade de 2x2 pixels (4x4 km) acima do ponto P1 é selecionado.

Fonte: Autoria própria.

4. Aplicando a equação 3.1 nos dados de satélite para obter a altitude de topo da nuvem:

- Usar a equação apropriada (3.1) para os dados do satélite para calcular a altitude de topo de nuvens para o momento de detecção.

### 3.4.2 Dados dos piranômetros

Os dados dos piranômetros em arquivo “.csv” podem ser tratados como uma planilha de dados, pra isso a biblioteca “pandas” foi utilizada para a manipulação destes dados. Uma lista com as estampas de tempo e as respectivas medições que foram realizadas ao longo do ano é analisada e manipulada. A biblioteca utilizada para gerar o modelo de céu limpo de Ineichen é o “pvlib”, com as funções “get\_irradiance” e “get\_clearsky”. Para distinguir os dados brutos dos dados que passam pelo controle de qualidade é aplicado o método descrito na seção 3.3.1 deste documento. Segue os seguintes passos como mostrado na figura 19:

1. Obtenção de dados a partir de um piranômetro:
  - Conectar o piranômetro a um registrador de dados (*DataLogger*) ou computador;
  - Configurar o registrador de dados ou computador para gravar os dados no intervalo desejado (por exemplo, a cada minuto);

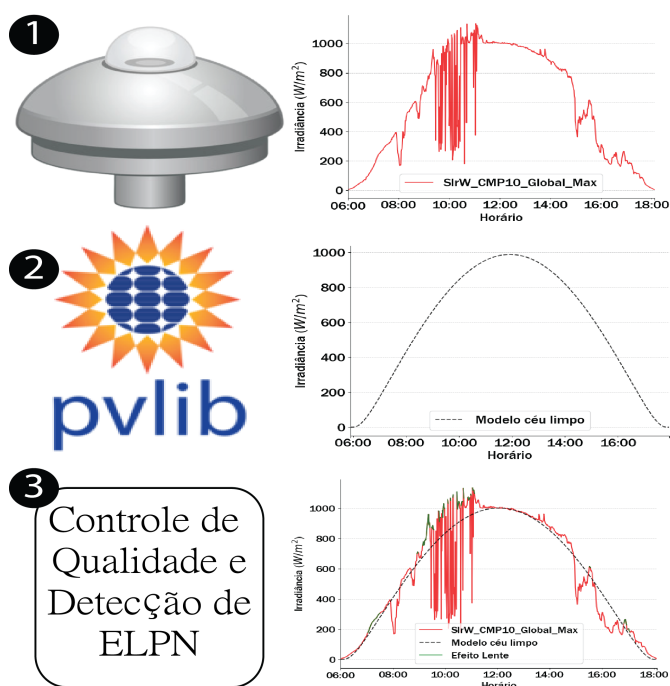
- Coletar os dados para a duração desejada (por exemplo, 1 dia, 1 semana, 1 mês).

2. Obtendo o modelo de céu limpo de Ineichen a partir da biblioteca em Python, “pvlib”:

- Instala-se o módulo de pvlib usando pip: "pip install pvlib";
- Importa-se o módulo pvlib no script Python;
- Usa-se a função "pvlib.clearsky.ineichen(tempo, latitude, longitude)" para calcular a irradiação do céu limpo para o tempo, latitude e longitude do local onde o piranômetro foi instalado.

3. Aplicando uma metodologia de Controle de Qualidade nos dados para contabilizar as incertezas do instrumento:

- Compara-se os dados medidos com o modelo de céu limpo para identificar quaisquer *outliers* ou pontos de dados que se desviem significativamente do modelo;
- Usa-se métodos estatísticos como média, desvio padrão, etc. para identificar quaisquer padrões ou anomalias nos dados;
- Usa-se técnicas de visualização como histogramas, gráficos de dispersão, etc., para investigar mais a fundo quaisquer padrões ou anomalias identificadas;
- Aplica-se métodos de correção apropriados (por exemplo, remover *outliers*) para melhorar a qualidade dos dados.



**Figura 19** – Passo a passo para obtenção dos dados do piranômetro (1), do modelo de céu limpo (2) e aplicação do Controle de Qualidade e correta Detecção de ELPN nos dados (3).

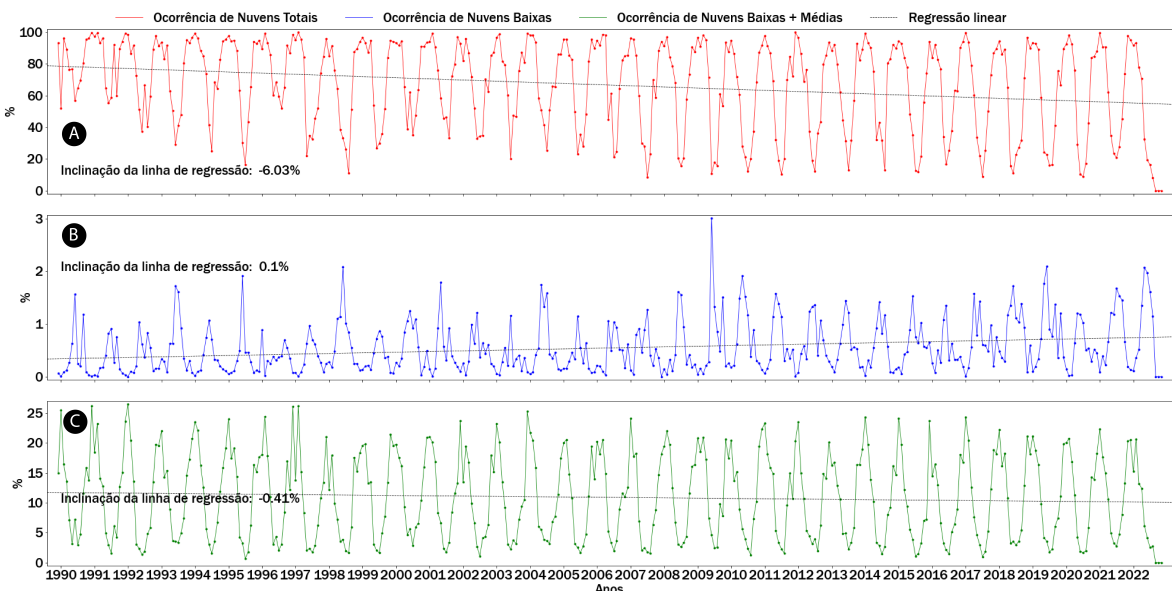
Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados do trabalho. Os dados foram analisados de forma a identificar padrões de distribuição e a fração correspondente de nuvens baixas e médias assim como vistos por satélites meteorológicos para a região do objeto de estudo, bem como interpretar os resultados das metodologias empregadas aos dados recolhidos da estação meteorológica.

### 4.1 Climatologia da ocorrência de nuvens no Maranhão

A figura 20a mostra o percentual de ocorrência de nuvens durante o contexto climatológico de 33 anos (1990-2022) derivados de dados históricos observados através do produto GridSat-B1 para o recorte da região do objeto de estudo. O tipo de nuvens analisados são aquelas que possuem o maior potencial de produzirem o efeito lente, sendo elas as nuvens abaixo de 8km de topo, nomeadamente as nuvens médias e baixas. A figura 20b apresenta o percentual de ocorrência de nuvens baixas e 20c representa o percentual de nuvens médias e baixas. A tendência geral é indicada pela inclinação da reta dada pela regressão linear aplicada aos dados.



**Figura 20** – (a) fração de nuvens totais e tendência (b) fração de nuvens baixas e tendência (c) fração de nuvens médias e baixas e tendência

Fonte: Autoria própria.

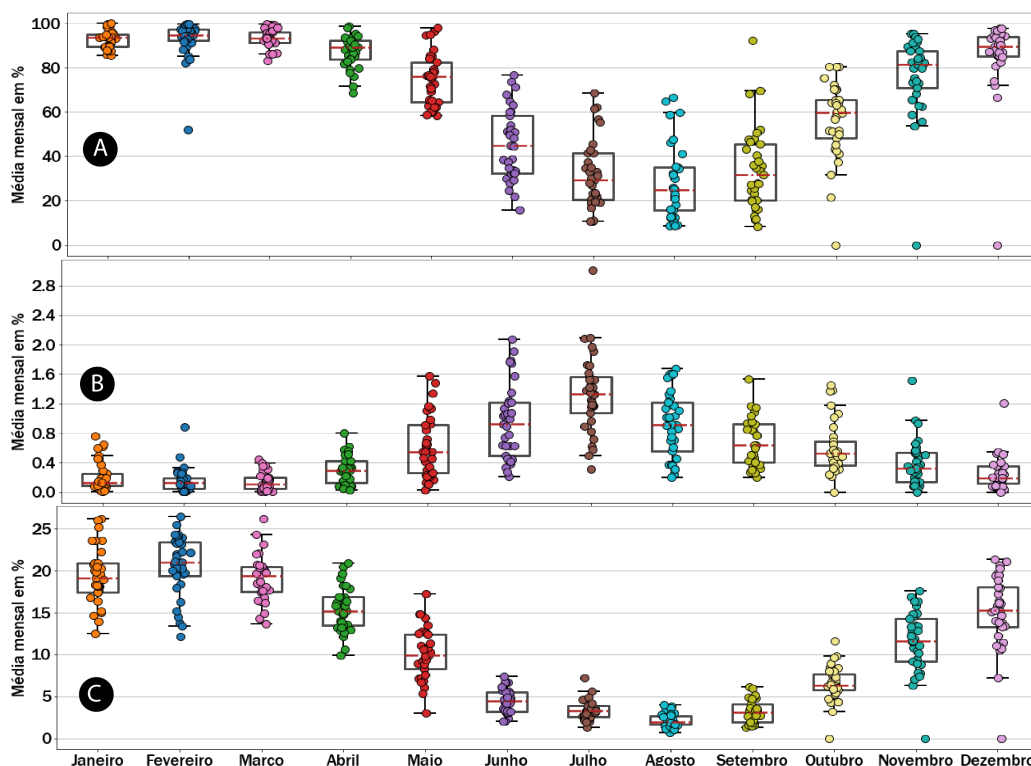
É notável na figura 20 um ciclo anual da ocorrência de nuvens. As nuvens no geral

têm pico de ocorrência ao redor no período de passagem de ano e baixo no meio do ano. Em relação às nuvens baixas apenas, o inverso acontece sistematicamente.

As variações geográficas e sazonais da fração de nuvens estão em grande parte relacionadas com a circulação em larga escala da atmosfera. Os ventos oceânicos de baixo nível que fluem dos hemisférios norte e sul se reúnem perto do equador na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), criando uma região de baixa pressão orientada onde os ventos alísios do nordeste e sudeste se encontram. Conforme estes ventos convergem, o ar úmido é forçado a subir, produzindo nuvens com desenvolvimento vertical, podendo haver fortes precipitações (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008).

A distribuição espacial/porcentual de nuvens baixas e médias separadas por estações (com exceção de 2022, onde são separadas por meses) de cada ano do contexto climatológico são apresentadas no Apêndice A durante o mesmo período. Durante os anos, é possível verificar uma forte tendência sazonal inversa da formação de nuvens médias com relação as baixas. No verão, as nuvens médias (<8km de topo) sobressaem em relação as baixas (<2km de topo), enquanto as nuvens baixas são mais observadas pelo GridSat-B1 período da estação seca. Em geral, a formação de nuvens baixas perto do equador na estação seca pode ser influenciada por uma variedade de fatores, incluindo o movimento das massas de ar, a temperatura e umidade do ar (SAMPAIO; MARENGO; NOBRE, 2008).

A figura 21a mostra os valores médios do porcentual de nuvens para cada mês dentro dos 33 anos da climatologia de cobertura de nuvens, incluindo de nuvens baixas 21b e médias e baixas 21c. A ocorrência de nuvens baixas se dá principalmente nos meses entre junho e agosto, revelando um padrão crescente desde o mês de março, atingindo um pico no mês de julho e decrescendo gradualmente nos meses seguintes. As nuvens no geral e as “médias com baixas” apresentam o mesmo padrão de médias mensais: maiores concentrações no começo e finais de ano, e menores concentrações no meio de ano. A critério de explicação, valores próximos a 100% da média mensal de fração nuvens em 21a significa que em grande parte do recorte geográfico analisado (em coordenadas indo de 50° a 41° Oeste e de 0° a 11° Sul) da região que abrange o Maranhão, esteve encoberto por algum tipo de nuvem, assim como descrito na tabela 2 da condição de restrição para a classificação de nuvens, desde nuvens de baixo nível à nuvens cirrus semi-transparentes.



**Figura 21** – Médias mensais para a fração de cobertura de nuvens (a), nuvens baixas (b) e nuvens médias com baixas (c) para 33 anos de dados obtidos pelo GridSat-B1

Fonte: Autoria própria.

As zonas costeiras são onde condições meteorológicas e climáticas específicas se desenvolvem, em particular, o desenvolvimento de padrões de mesoescala. O ar do mar é mais denso, mais estável e mais fresco que o ar continental e, devido a estes três fatos, o ar do mar é capaz de elevar o ar continental mais quente e instável, o que, por sua vez, acelera a taxa de convecção da frente de brisa do mar e, como resultado, forma-se uma linha de nuvens do tipo cumulus. Esta linha de nuvens é formada paralelamente à costa e é então empurrada mais para o interior pela brisa do mar (COSTA et al., 2000). Graças a este tipo de cobertura de nuvens criadas mais para o interior, é possível ver claramente a frente de brisa do mar em imagens de satélite, já que a costa se beneficia de um céu limpo (MARINHO et al., 2018).

## 4.2 Caracterização do ELPN a partir dos dados em solo

A estação meteorológica localizada ao ponto P1 das medições, próximo a costa leste maranhense, capturou os dados de irradiância global no plano horizontal (GHI) por um período dentro de 14 meses enquanto durou sua campanhas de campo de pesquisa somando 382 dias de medições. Dentro desses meses, entre novembro de 2021 e dezembro

de 2022, são apresentadas diversas análises diante do interesse em encontrar os eventos ELPN. Tendo em vista a grande quantidade de dados, a primeira análise é feita realizando um gráfico de calendário, apresentado no Apêndice B deste documento, para visualização de modo amplo e distribuído as informações encontradas. As linhas sólidas e vermelhas representam valores de irradiância medidos, as linhas verdes e sólidas representam eventos ELPN encontrados obedecendo a expressão 2.3. As linhas tracejadas pretas são o modelo de céu limpo de acordo com a expressão 2.2.

As maiores variações de irradiância durante o período selecionado, que produzem um perfil serrilhado, está relacionado com passagens de nuvens que encobrem momentaneamente os sensores e, por conta de seu movimento de deriva acompanhando os ventos, desobstrui novamente o disco solar. Nestes momentos de maiores variações, chamados de “rampas”, é possível notar uma maior incidência dos eventos ELPN.

#### 4.2.1 Distribuição de energia solar

A tabela 3 destina os dados em algumas faixas de irradiância, de forma similar a tabela 1 de modo a apresentar uma distribuição dos dados em algumas categorias de intensidade de irradiâncias com base em diferentes períodos de cálculo de média dos dados. Com base na resolução temporal disponível do piranômetro, de 5 segundos, os dados exibiram 5,31% de valores medidos acima de 1000W/m<sup>2</sup> de GHI. Quando se é calculado uma média do agregamento dos dados em períodos de tempo maiores, como de 10 segundos, 1 minuto, 10 minutos ou 1 hora, percebe-se que a concentração de dados se desloca para faixas de irradiância menores. Ainda na faixa acima de 1000W/m<sup>2</sup> as porcentagens respectivas a cada período caem para 5,18%, 4,43%, 2,46 e 0,93%. Isso esconde informações importantes para estudos relacionados a eventos extremos de intensificação de irradiância. Este resultado é refletido no trabalho de Nascimento et al. (2019), demonstrado na tabela 1.

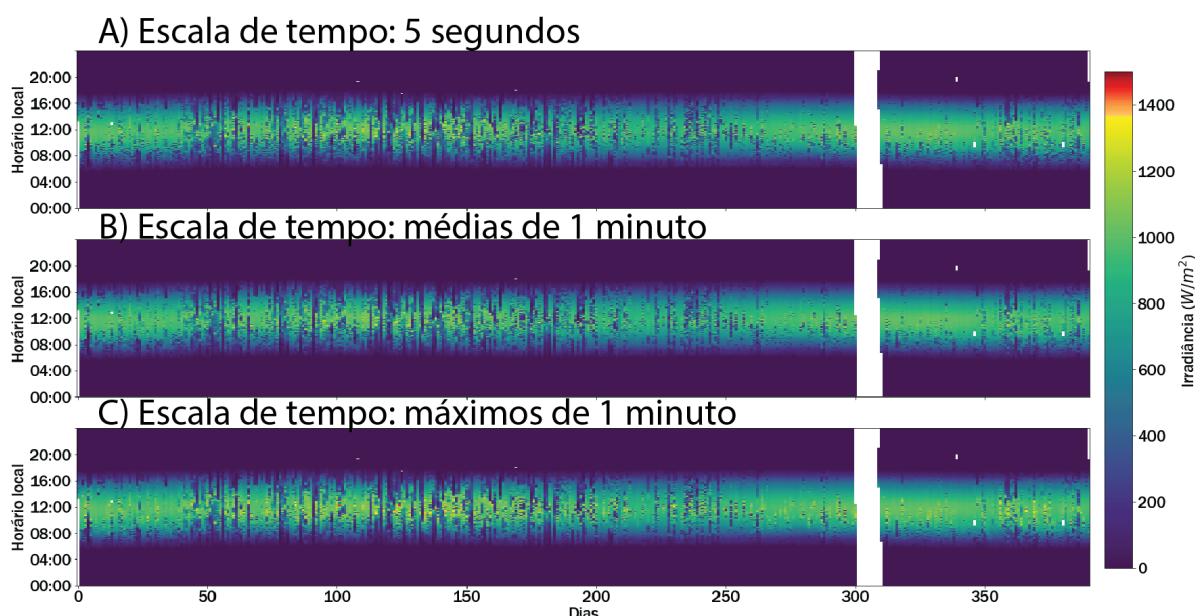
**Tabela 3** – Distribuição de GHI computados em 14 meses de medições

Período de cálculo da média	Faixas de Irradiância (W/m <sup>2</sup> )				
	G <300	300 ≤ G <700	700 ≤ G <1000	1000 ≤ G <1200	G ≥ 1200
5 s	41,33%	28,31%	25,05%	5,06%	0,25%
10 s	41,28%	28,37%	25,16%	4,96%	0,22%
1 min	40,85%	29,01%	25,71%	4,32%	0,11%
10 min	40,78%	29,96%	26,81%	2,46%	0,00%
1 h	45,12%	29,01%	24,93%	0,93%	0,00%

Fonte: Autoria própria

A figura 22 apresenta um gráfico de barra de cores onde a irradiância durante os 382 dias de medições são mostrados com o respectivo horário. A figura 22a mostra os dados

na escala de tempo nativa do piranômetro (5 segundos) e, as figuras 22bc apresentam os mesmos dados calculando-se a média dos valores dentro de 1 minuto de base de cálculo (média de 12 dados de 5 segundos) e o valor máximo dentro de 1 minuto de base de cálculo (valor máximo dentro de 12 dados de 5 segundos) respectivamente. O valor da irradiância média integrada no tempo teve um valor de  $243,77 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 22** – Irradiância durante os 382 dias de medições considerando escalas de tempo de (A) 5 segundos (B) média de 1 minuto e (C) valor máximo dentro de 1 minuto

Fonte: Autoria própria.

Na região da faixa de latitude do Maranhão, a média anual máxima do modelo de céu limpo é de  $969,36 \text{ W/m}^2$ . Em uma situação hipotética onde ao longo de um ano for considerado apenas dados obtidos através do modelo de céu limpo, obteríamos, nas mesmas faixas de irradiância o seguinte: 27,11% entre 0 e  $300 \text{ W/m}^2$ ; 29,76% entre 300 e  $700 \text{ W/m}^2$ ; 43,13% entre 700 e  $1000 \text{ W/m}^2$  e nenhum dado para valores maiores que  $1000 \text{ W/m}^2$ . É notável que, normalmente os picos máximos de irradiância em um modelo de céu livre de nuvens nunca ultrapassem o limite máximo de  $1000 \text{ W/m}^2$ , contudo, em todos os meses analisados são encontrados valores ultrapassando este limite. Portanto, na distribuição desses dados em uma situação real, as nuvens atuam no papel da modulação das porcentagens de cada faixa de irradiância e fazem surgir valores acima do máximo esperado para um dia limpo, o que é atribuído ao ELPN.

#### 4.2.2 Distribuição mensal de GHI

Na tabela 4, é apresentado para as mesmas faixas de irradiância da tabela 3, a distribuição relacionada aos meses de medições no ponto P1. No mês de fevereiro de

2022, isso acontece em 10,14% dos dados, e no mês de março de 2022, houve a maior concentração de dados de irradiância na faixa valores maiores ou iguais a 1200 W/m<sup>2</sup> chegando a 0,79% dos dados.

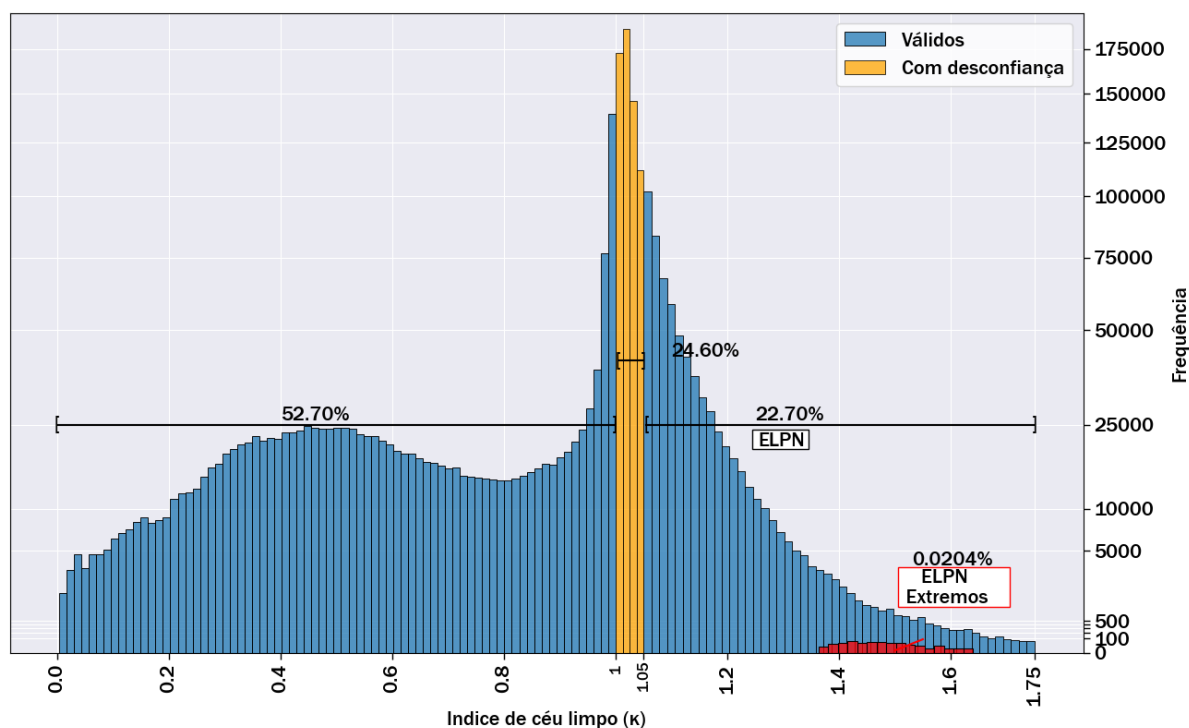
**Tabela 4** – Distribuição porcentual de GHI que foram computados em 14 meses de medições em faixas de irradiância selecionadas

Meses	Faixas de irradiância (W/m <sup>2</sup> )				
	G <300	300 ≤ G <700	700 ≤ G <1000	1000 ≤ G <1200	G ≥ 1200
11/2021	38,32%	23,00%	33,74%	4,79%	0,15%
12/2021	39,50%	27,18%	29,59%	3,61%	0,11%
01/2022	46,31%	27,89%	20,42%	5,13%	0,24%
02/2022	44,65%	28,40%	16,81%	9,69%	0,45%
03/2022	54,82%	25,51%	12,32%	6,56%	0,79%
04/2022	44,98%	29,49%	16,83%	8,14%	0,56%
05/2022	50,57%	28,34%	18,35%	2,60%	0,15%
06/2022	38,48%	33,92%	25,59%	1,96%	0,05%
07/2022	41,36%	33,30%	22,76%	2,54%	0,04%
08/2022	33,00%	28,25%	35,14%	3,53%	0,08%
09/2022	31,91%	26,20%	33,47%	8,31%	0,12%
10/2022	31,90%	25,92%	36,48%	5,68%	0,03%
11/2022	37,58%	28,24%	28,77%	5,01%	0,40%
12/2022	35,24%	29,31%	32,91%	2,38%	0,16%

Fonte: Autoria própria

### 4.2.3 Distribuição do índice de céu limpo

A figura 23 mostra o perfil da distribuição dos dados com base no índice de céu limpo  $\kappa$  (a relação entre a irradiância medida e a referência de céu limpo). Em comparação a figura 1 obtido por Sengupta e Andreas (2010), há uma grande similaridade em relação ao formato, porém, aqui se estende à valores do índice próximos a 1,7, ao invés de 1,4. Sobre este perfil, são separados algumas informações e são destacados que 52,70% dos dados apresentaram um valor de  $\kappa$  menores que 1. Além disso, uma faixa de valores de  $\kappa$  entre 1 e 1,05 é tido como dados com desconfiança (em amarelo) devido a aplicação do Controle de Qualidade aos dados (descrito na seção 3.3.1) somando 24,60% do total de dados. E em 22,70% dos dados, valores acima de 1,05 de  $\kappa$  são computados como resultado da intensificação de irradiância produzido por nuvens. Adicionalmente, em vermelho, é destacado os eventos de ELPN extremos, sendo 0.0204% dos dados dentre os ELPN detectados em geral.



**Figura 23** – Frequência de ocorrência dos valores de índice de céu limpo ( $\kappa$ ), destacando dados com desconfiança (em amarelo) e dados de ELPN extremos (em vermelho)

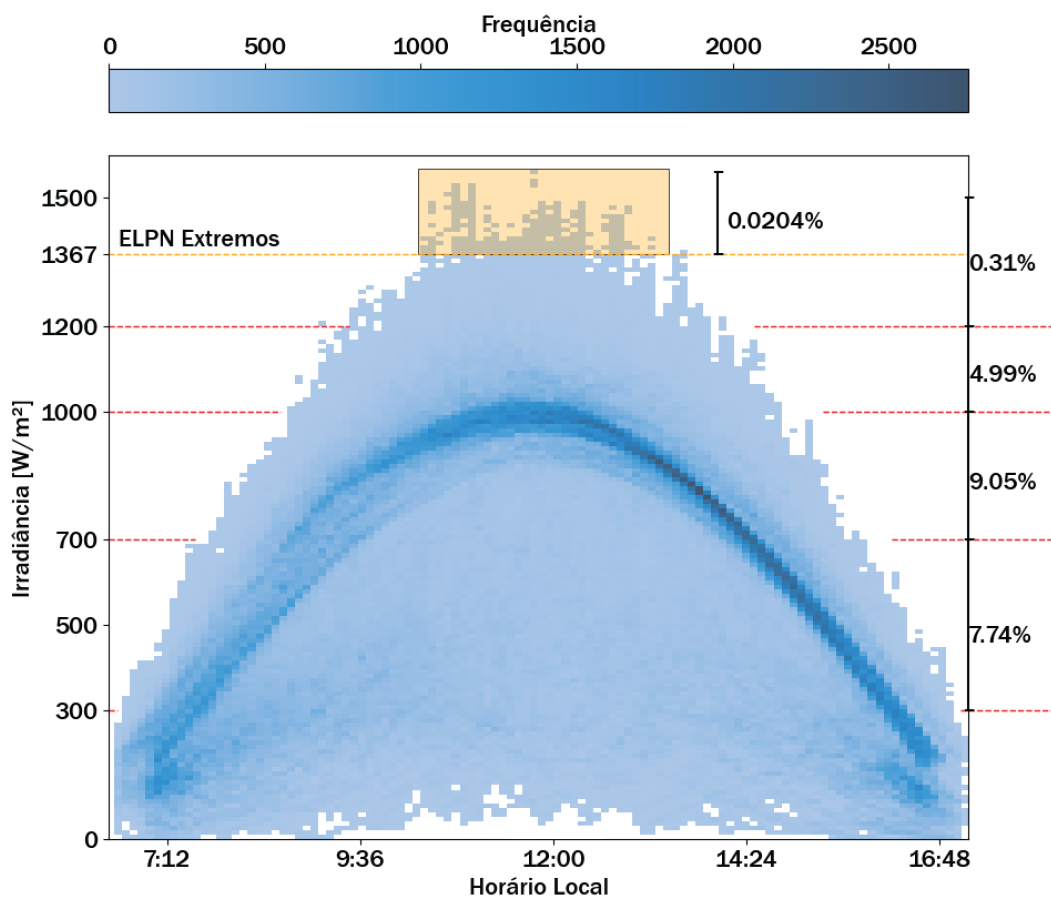
Fonte: Autoria própria.

O índice de céu limpo pode ser usado como um indicador que compara a irradiância solar medida com a irradiância solar esperada para um céu livre de nuvens. Quando o índice de céu limpo é maior que 1 (ou 1,05 devido a incertezas do modelo de céu limpo e das medições dos piranômetros), indica que a irradiância solar medida é maior do que o que seria esperado para um céu completamente limpo. No caso de eventos de ELPN extremos, o índice de céu limpo é significativamente maior do que 1 (ou 1,05).

#### 4.2.4 Interpretação geral dos dados e de dados ELPN

A figura 24 apresenta um histograma, ou seja, um gráfico da densidade de frequência de ocorrência dos dados de acordo com o horário (eixo x) com seu respectivo valor de irradiância (GHI) medido (eixo y). A figura representa, portanto, todos os dados agregados em um único gráfico. Uma região mais escurecida surge formando uma curva em formato de sino, onde os dados estão mais concentrados e pode ser diretamente relacionada com a curva do modelo de céu limpo. Os dados acima desta parte escurecida, portanto, está relacionado com o incremento de irradiância causado pelo ELPN. Os maiores incrementos estão acima do valor da constante solar, de  $1367 \text{ W/m}^2$  (linha tracejada amarela) exibindo valores próximos a  $1500 \text{ W/m}^2$ , sendo estes considerados ELPN extremos. Já os dados

de ELPN extremos corresponderam a 0,0204% do total de dados e são destacados pelo retângulo laranja.



**Figura 24** – Mapa de calor do total de dados obtidos para GHI

Fonte: Autoria própria.

As linhas tracejadas vermelhas horizontais, delimitam algumas faixas de irradiância, as mesmas das tabelas 3 e 4. Ao lado direito destas delimitações são apresentadas algumas porcentagens relacionadas à relação em proporção de ocorrência de ELPN do total de dados dentre os dados de ELPN em geral (extremos e não-extremos). Nota-se que a faixa entre 700 e 1000W/m<sup>2</sup> apresenta maior concentração de dados acima da curva do modelo de céu limpo, totalizando 9,05% dos dados. A faixa entre 1000 e 1200W/m<sup>2</sup> representou 4,99% do total de dados. Dados acima de 1200W/m<sup>2</sup> de irradiância mostraram uma relação de 0,31%.

#### 4.2.5 Relação de ocorrência de ELPN com os períodos do dia

Na tabela 5 é descrito uma porcentagem relativa a ocorrência de eventos ELPN no decorrer do dia, considerando todos os dias de medições. Nas colunas estão algumas faixas de horários de um dia e, nas linhas, os respectivos meses das medições. Uma escala de cor

crecente, indo do vermelho ao amarelo e do amarelo ao verde, indica menores à maiores porcentagens ou concentrações de eventos ELPN. De acordo com a tabela, o período da manhã é quando as ocorrências dos eventos ELPN são mais prevalentes, isto é em grande parte devido a maior presença de bandas de nuvens neste período (MARINHO et al., 2018) na região costeira do Maranhão, muito frequentemente observados por imagens de satélites.

**Tabela 5** – Porcentagem de ocorrência dos eventos ELPN para os meses medidos em algumas faixas de horário.

Data	9-10h	10-11h	11-12h	12-13h	13-14h	14-15h	15-16h	16-17h
11/21	15	9.7	5.9	4.7	6.7	8.4	7.8	8.3
12/21	14.6	10.7	8.4	8	7.8	8.3	8.4	8.8
1/22	12.7	14.5	10.9	7.3	9.2	7.8	7	10.6
2/22	11.8	13.3	12.4	9	8	6.1	6.4	10.6
3/22	9.6	10.9	14.2	11.4	8.1	10.4	10.1	6.1
4/22	9.7	10.2	9.5	11.9	10.2	10.2	9	6.3
5/22	8.7	10.9	10.5	9.8	8.2	7.5	12.8	6.7
6/22	9.4	9.8	10.2	7.2	9.9	9.4	12.1	10.1
7/22	11.3	15.4	16.7	11	6.8	4.9	6.8	5.4
8/22	18.6	19.1	13.3	8.8	3.8	4.9	3	9.3
9/22	20.3	12	8.2	3.1	0.9	0.6	5.8	19.9
10/22	17.4	9.2	7	3.5	2.9	1.7	10.5	15
11/22	14.8	8.3	7.3	6	5.1	6.4	13.5	9.9
12/22	8.9	3.1	8.3	1.6	0	3.1	19.3	11.6
Média	12.25	10.8	9.85	7.65	7.3	6.95	8.7	9.6

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.6 Porcentual de ocorrências de ELPN

A tabela 6 apresenta o porcentual de ocorrências de ELPN, valores de ELPN médios e máximos e a duração máxima e média durante os meses do estudo. É notável que o porcentual de ocorrência de eventos ELPN chegam até 31,46% no mês de junho de 2022 e 19,51% em uma média geral. O valor médio da intensificação chegou a 829,85 W/m<sup>2</sup> no mês de março de 2022. O mês com maior duração máxima de ocorrências de ELPN é junho de 2022, contabilizando 450 segundos de duração máxima em um dia, considerado relativamente alto. A duração média das máximas para todos os meses foi de 150,71 segundos.

**Tabela 6** – Percentual de ELPN e valores médios e máximos de sua intensidade e duração por mês

Meses	%ELPN	ELPN médio/máximo	Duração máxima/média ELPN
2021-11	23,25%	704,41/1415,22 W/m <sup>2</sup>	155,0/23,4 s
2021-12	20,05%	733,76/1388,92 W/m <sup>2</sup>	130,0/14,5 s
2022-01	15,55%	782,40/1477,01 W/m <sup>2</sup>	115,0/17,5 s
2022-02	18,96%	793,34/1487,54 W/m <sup>2</sup>	460,0/23,5 s
2022-03	15,54%	829,85/1533,16 W/m <sup>2</sup>	170,0/22,0 s
2022-04	27,38%	778,60/1565,91 W/m <sup>2</sup>	150,0/16,9 s
2022-05	20,90%	696,89/1397,86 W/m <sup>2</sup>	100,0/15,9 s
2022-06	31,46%	651,93/1410,85 W/m <sup>2</sup>	60,0/14,2 s
2022-07	16,36%	749,89/1394,70 W/m <sup>2</sup>	40,0/9,7 s
2022-08	14,18%	792,11/1373,21 W/m <sup>2</sup>	360,0/24,8 s
2022-09	16,08%	675,99/1324,98 W/m <sup>2</sup>	60,0/15,3 s
2022-10	10,46%	688,43/1300,58 W/m <sup>2</sup>	65,0/12,9 s
2022-11	22,75%	709,00/1528,92 W/m <sup>2</sup>	140,0/18,3 s
2022-12	20,17%	560,44/1242,77 W/m <sup>2</sup>	105,0/30,0 s
Média	19,51%	724,79/1417,26 W/m <sup>2</sup>	150,71/18,5 s

Fonte: Autoria própria

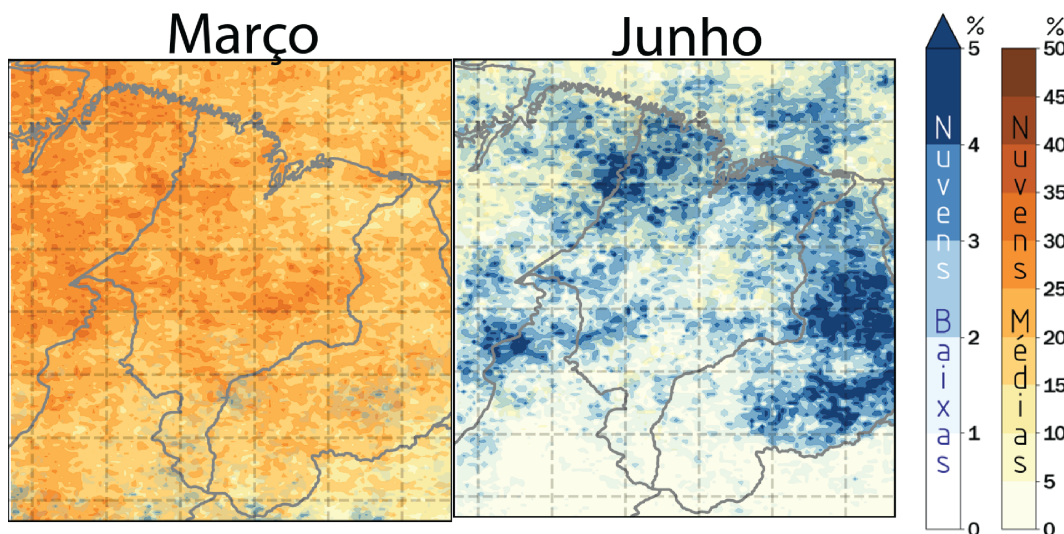
A tabela 7 apresenta a quantidade e o percentual de ocorrências de ELPN extremos, valores de ELPN extremos médios e máximos e a duração máxima e média deste tipo de evento. Nota-se que quantidade de ocorrência de eventos ELPN extremos na escala de tempo de 5 segundos chegou a 215 ocorrências no mês de março de 2022. A média geral de ocorrências foi de 39,64. O valor máximo da intensificação extrema chegou a 1565,91 W/m<sup>2</sup> no mês de abril de 2022. O mês com maior duração máxima e média de ocorrências de ELPN extremo foi janeiro de 2022, contabilizando 190 segundos de duração máxima em um dia e 30,5 segundos em média.

**Tabela 7** – Percentual e quantidade de ELPN extremos e valores médios e máximos de sua intensidade e duração por mês

Meses	#/%ELPN Extremos	Média/máxima ELPN extremo	Duração máxima/média ELPN extremo
2021-11	5/0,003%	1404,01/1415,22 W/m <sup>2</sup>	10,0/8,3 s
2021-12	12/0,004%	1378,96/1388,92 W/m <sup>2</sup>	40,0/12,0 s
2022-01	61/0,022%	1435,92/1477,01 W/m <sup>2</sup>	190,0/30,5 s
2022-02	63/0,025%	1403,22/1487,54 W/m <sup>2</sup>	70,0/14,3 s
2022-03	215/0,075%	1424,12/1533,16 W/m <sup>2</sup>	145,0/19,2 s
2022-04	129/0,047%	1418,52/1565,91 W/m <sup>2</sup>	125,0/17,9 s
2022-05	8/0,003%	1383,53/1397,86 W/m <sup>2</sup>	10,0/8,0 s
2022-06	3/0,001%	1387,28/1410,85 W/m <sup>2</sup>	10,0/7,5 s
2022-07	6/0,002%	1384,02/1394,70 W/m <sup>2</sup>	10,0/7,5 s
2022-08	1/0,000%	1373,21/1373,21 W/m <sup>2</sup>	5,0/5,0 s
2022-09	0/0,000%	-/- W/m <sup>2</sup>	0,0/0,0 s
2022-10	0/0,000%	-/- W/m <sup>2</sup>	0,0/0,0 s
2022-11	52/0,019%	1428,46/1528,92 W/m <sup>2</sup>	45,0/14,4 s
2022-12	0/0,000%	-/- W/m <sup>2</sup>	0,0/0,0 s
Média	39,64/0,01%	1401,93/1452,12 W/m <sup>2</sup>	47,14/10,33 s

Fonte: Autoria própria

Ao analisar a figura 21 e a tabela 7, nota-se que no mês de março houve uma grande quantidade relativa de detecções de ELPN extremos, sendo este mês considerado um mês em que houve maior ocorrência de nuvens médias em comparação as baixas (figura 25). Em junho (figura 25), situado no declínio da ocorrência de nuvens e, portanto, tido como um mês da estação seca, o porcentual de nuvens baixas diretamente sobre a região do ponto P1 é considerada a maior (em torno de 4%) quando comparada a outros meses de 2022 assim como observado pelos satélites GridSat-B1, o que pode explicar a alta de ocorrências de ELPN, que chegou a atingir cerca de 31,46% dos dados.



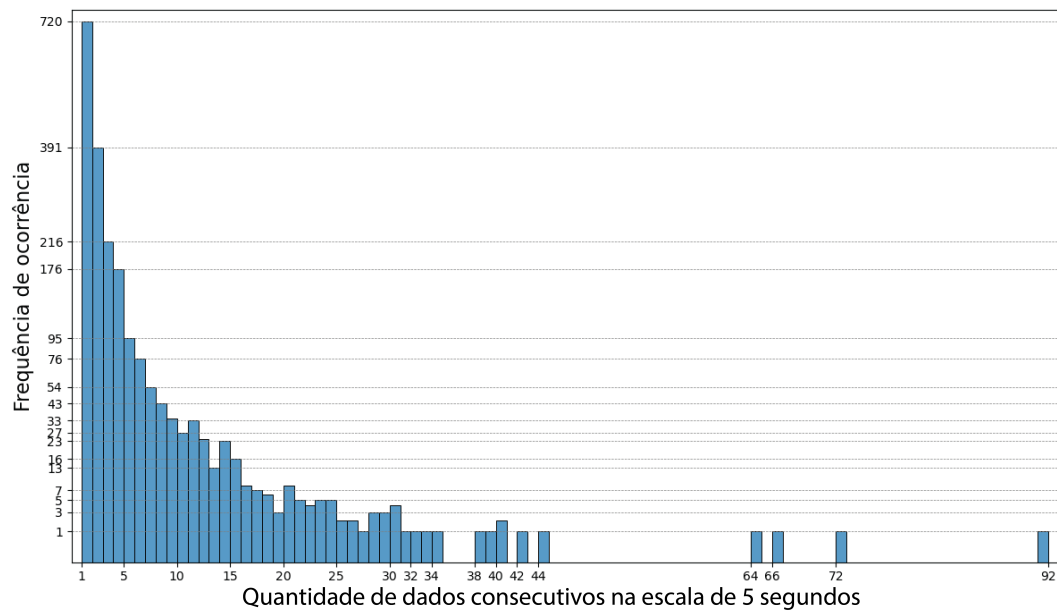
**Figura 25** – Mapa de ocorrência de nuvens baixas e médias nos meses de março e junho do ano de 2022

Fonte: Autoria própria.

A quantidade de eventos de ELPN extremos entre os meses é maior quando a probabilidade de ocorrência de nuvens observada sobre a região também é maior. A ocorrência desses eventos geralmente se concentram dias específicos de um dado mês, podendo inferir que, para sua ocorrência, seria necessário uma configuração também específica, como a posição do sol, a presença de tipos de nuvens e do ângulo em que a luz solar atinge as nuvens (PECENAK et al., 2016).

#### 4.2.7 Duração dos eventos ELPN

O perfil de duração do excesso de irradiação causado pelo ELPN é avaliado para valores maiores que  $1200\text{W}/\text{m}^2$ . Longos períodos de excesso de irradiação podem levar a uma diminuição do desempenho dos painéis FV, e em casos extremos, podem causar danos permanentes. A figura 26 apresenta os números referentes a quantidade de eventos consecutivos em minutos para os dados que ultrapassaram a marca de  $1200\text{W}/\text{m}^2$  de GHI.

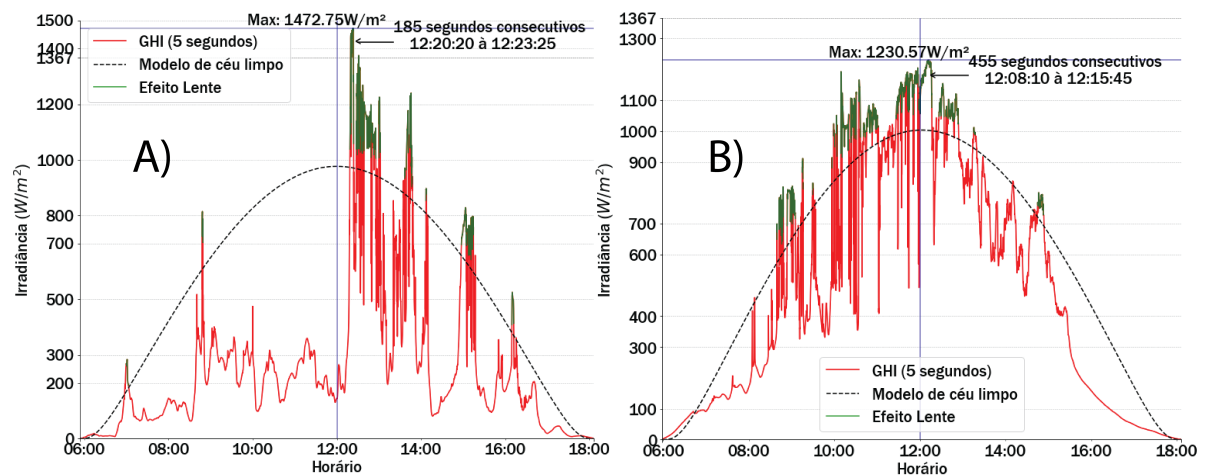


**Figura 26** – Frequência de eventos consecutivos detectados acima de 1200 W/m<sup>2</sup> de GHI

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, os eventos consecutivos com maior duração são extremamente raros, mas podem levar a danos aos sistemas FV. Lembrando que a porção de dados que ultrapassam 1200W/m<sup>2</sup> de irradiância correspondem a apenas 0,25% do total.

A figura 27 ilustra o perfil de irradiância durante os dias de maiores durações de eventos consecutivos de 5 segundos. No dia 15 de janeiro 27a, os eventos consecutivos de ELPN extremos duraram desde 12h20m20s à 12h23m25s atingindo pico máximo de 1472,75 W/m<sup>2</sup> apenas neste período considerado. Similarmente em 27b, no dia 28 de fevereiro de 2022, agora considerando eventos de ELPN acima de 1200 W/m<sup>2</sup>, a duração ficou entre 12h08m10s à 12h15m45s, com pico máximo de 1230,57W/m<sup>2</sup>. A linha preta tracejada corresponde ao modelo de céu limpo de Ineichen, a linha vermelha aos dados do piranômetro e as linhas verdes correspondem às detecções de ELPN.



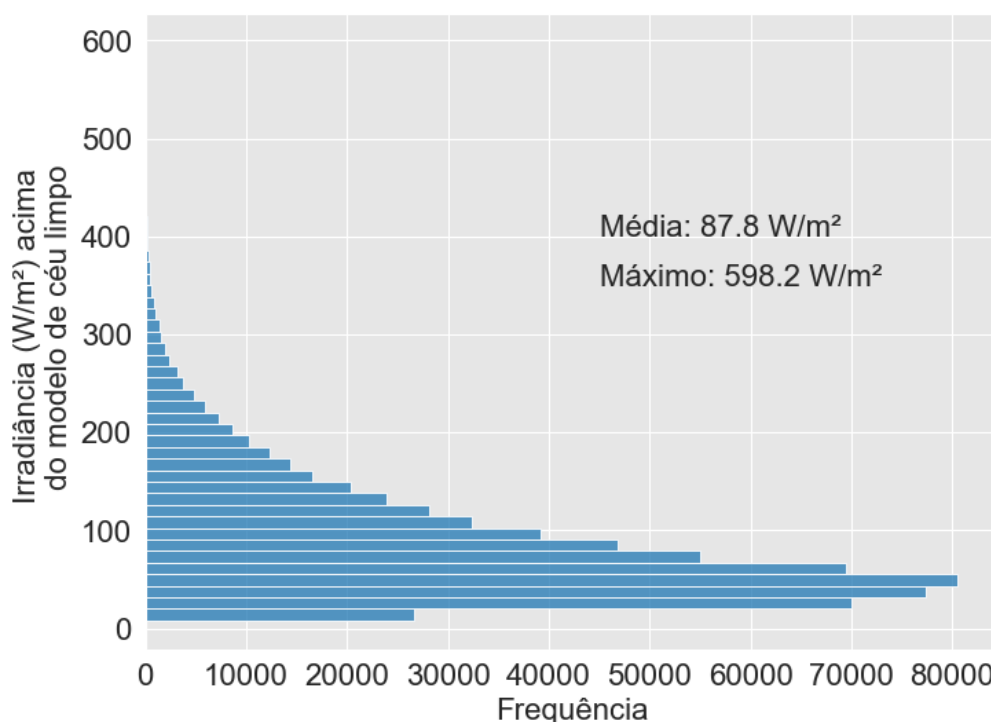
**Figura 27** – Dias com maiores durações de eventos consecutivos detectados nos dados acima de  $1200 \text{ W/m}^2$ : (a) 2 de fevereiro de 2022 (b) 28 de março de 2022.

Fonte: Autoria própria.

É interessante ressaltar que, os eventos extremos do ELPN ocorreram em 31 dias distintos dentro dos 14 meses analisados. O Apêndice C apresenta uma lista de 104 situações com as datas e os valores medidos pelo piranômetro considerando valores máximos da base de cálculo de 1 minuto para facilitar a interpretação.

#### 4.2.8 Intensidade do excesso de irradiância

A intensidade do excesso de irradiância pode ser medida comparando a irradiância real com o modelo do céu limpo. A figura 28 apresenta a distribuição dos dados com relação a essas intensidades. Podemos entender a intensidade do excesso como um cálculo do GHI medido, subtraído do GHI da referência do modelo de céu limpo. O maior incremento é encontrado no valor de  $598,2 \text{ W/m}^2$  que ocorreu no dia 9 de abril de 2022 às 11h46m25s, chegando a um valor de  $1565,9 \text{ W/m}^2$ . A média com que esses incrementos ocorrem é de  $87,8 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 28** – Distribuição dos dados por intensidade do excesso de irradiância

Fonte: Autoria própria.

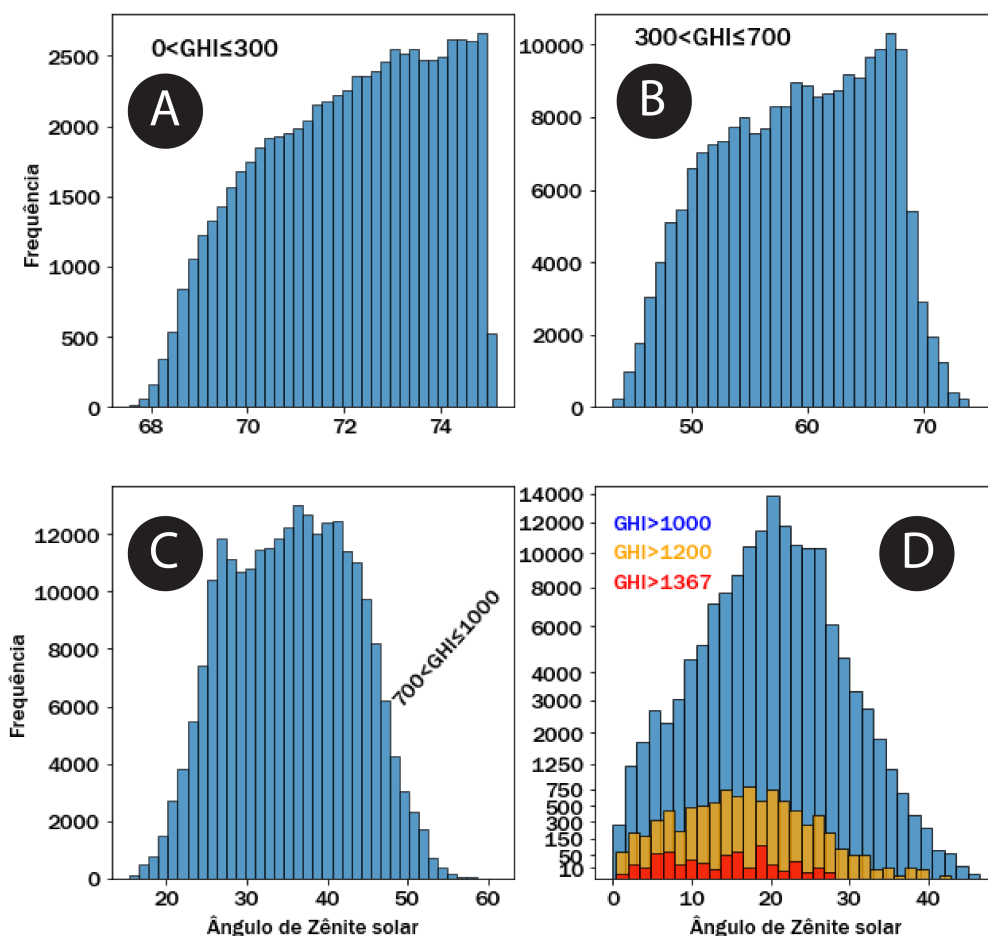
É importante notar que a quantidade específica de irradiância adicionada ou intensificada durante um evento ELPN depende diretamente do ângulo de zênite solar, visto que os menores ângulos, ou seja, maior elevação solar, disponibiliza maiores quantidades de radiação solar, conforme demonstrado a seguir.

#### 4.2.9 ELPN e o ângulo de zênite solar

Durante um evento de ELPN, o ângulo do zênite solar pode desempenhar um papel na quantidade de irradiância adicionada ou intensificada. Para valores elevados do ângulo do zênite solar, como no início da manhã ou no final da tarde, os raios solares atingem a superfície de forma mais oblíqua, o que leva a uma maior dispersão da luz ao atravessar a atmosfera e, conseqüentemente, a uma menor intensidade de radiação solar que atinge a superfície.

No entanto, quando o ângulo do zênite solar é baixo, como durante o meio do dia, os raios solares atingem a superfície de maneira mais perpendicular, o que resulta em menor dispersão da luz na atmosfera e, conseqüentemente, em maior intensidade de radiação solar que atinge a superfície. Isso se traduz em um nível mais elevado de intensificação de irradiância quando há ocorrência de ELPN, podendo levar a eventos extremos de intensificação. A figura 29 apresenta histogramas dos eventos ELPN separando os dados para algumas faixas de irradiância e mostra a frequência destes dados relativo ao ângulo

de zênite solar.



**Figura 29** – Frequências de ocorrências dos eventos ELPN considerando o ângulo de zênite solar para diferentes faixas de GHI: (A) para GHI entre 0 e 300W/m<sup>2</sup>; (B) para GHI entre 300 e 700W/m<sup>2</sup>; (C) para GHI entre 700 e 1000W/m<sup>2</sup> e (D) para GHI maiores que 1000, 1200 e 1367W/m<sup>2</sup>.

Fonte: Autoria própria.

Um aspecto importante a considerar é que o evento de ELPN pôde ser detectado em uma grande faixa do ângulo do zênite solar, contudo os eventos de ELPN extremos só ocorreram próximos à elevação máxima do sol, ou seja, para menores valores de ângulo de zênite solar.

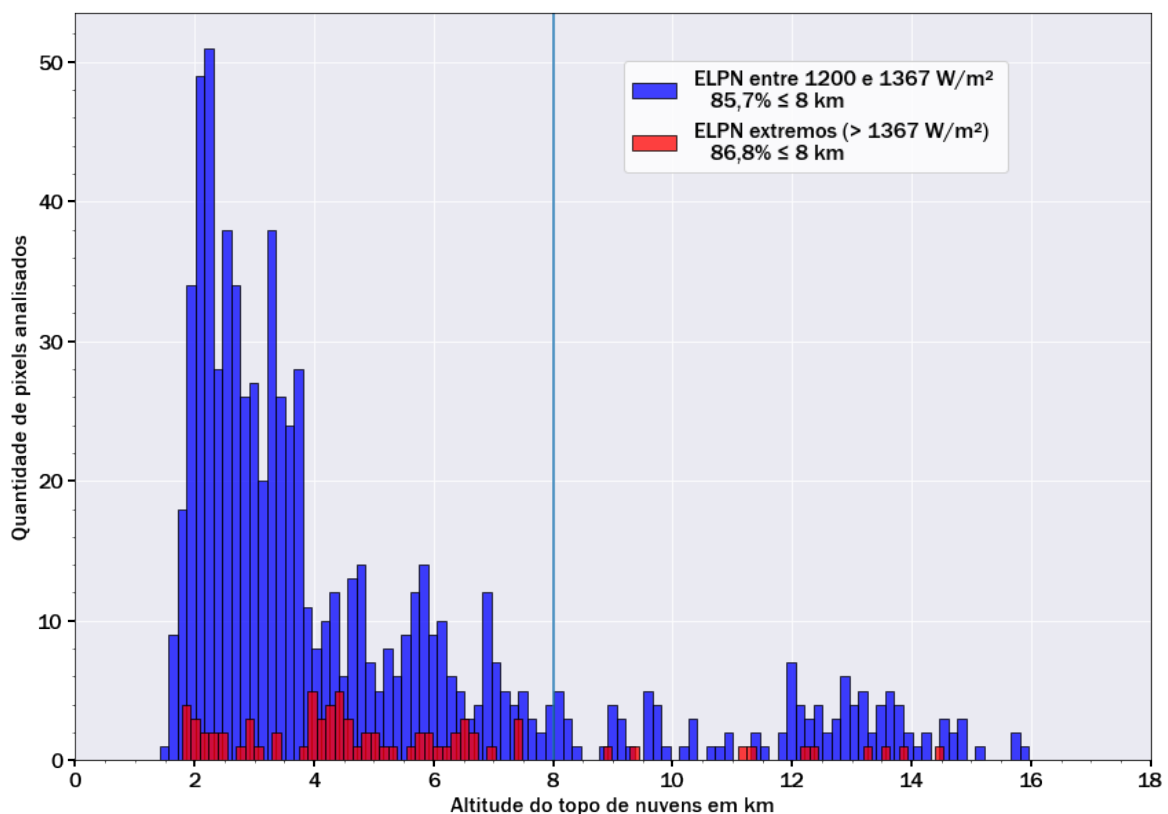
### 4.3 Padrão de nuvens durante o ELPN

O “*Advanced Baseline Imager*” (ABI) no satélite GOES-16 foi utilizado para distinguir entre diferentes tipos de nuvens usando diferentes canais, ou comprimentos de onda de luz, que são sensíveis a diferentes propriedades físicas das nuvens. O ABI tem canais sensíveis à temperatura das nuvens, usados para distinguir entre nuvens frias

de alto nível e nuvens de nível inferior, mais quentes. Além disso, a ABI possui canais sensíveis ao conteúdo de água das nuvens, que são usados para distinguir entre nuvens de água (como as nuvens de cumulus e cumulonimbus) e nuvens de gelo. A combinação desses diferentes canais proporciona uma imagem de alto contraste das nuvens, facilitando a distinção entre os diferentes tipos de nuvens. Esta seção aponta os resultados assim obtidos para a descrição de altitude de topo de nuvens aplicando o conceito de gradiente adiabático descrito por [Purbantoro et al. \(2018\)](#). Em seguida, apresenta projeções de uma série de combinações de canais do ABI para descrever as propriedades ópticas e do estágio da fase das nuvens durante eventos ELPN extremos.

### 4.3.1 Altitude do topo de nuvens durante o ELPN

Com auxílio da equação 3.1 e da banda 13 do satélite GOES-16, gerou-se histogramas durante os períodos de ELPN entre 1200 e 1367  $W/m^2$  em azul e de ELPN extremos em vermelho (figura 30) que ilustra a frequência de altitude do topo de nuvens ao redor do ponto P1 onde ocorreram as medições em terra pelo piranômetro.



**Figura 30** – Histogramas da altitude do topo de nuvens durante eventos ELPN entre 1200 e 1367  $W/m^2$  e durante eventos ELPN extremos (maiores que 1367  $W/m^2$ ).

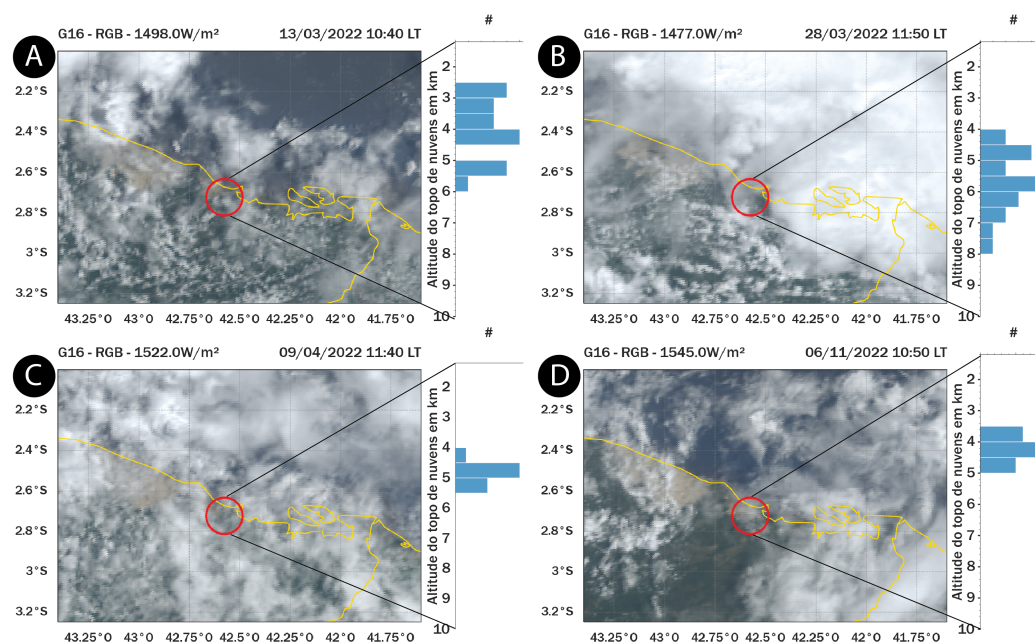
Fonte: Autoria própria.

É visível uma forte tendência destas altitudes estarem ao redor de valores conside-

rados nuvens baixas e médias, com um pico pronunciado entre entre 2 e 4 km de altitude de topo para eventos ELPN entre 1200 e 1367 W/m<sup>2</sup> sendo que em 85,7% das vezes para esta faixa de irradiância, a altitude de topo esteve abaixo de 8 km. Já para o caso de ELPN extremos, acima de 1367W/m<sup>2</sup> de irradiância medidos em terra, apresentou picos entre 2 e 8 km de altitude de topo, sendo que em 86,8% das vezes, a altitude de topo esteve abaixo de 8 km.

#### 4.3.2 Propriedades ópticas e de fase das nuvens durante o ELPN

Imagens do satélite GOES-16 das bandas dos canais visível e infravermelho foram projetadas com o objetivo de observação de nuvens diurnas puderam ser utilizadas para uma análise visual e de distinção da fase de nuvens. Na figura 31 são projetadas imagens da composição dos canais 1, 2 e 3 para gerar o equivalente a uma imagem de cores reais. O canal 1 representa o azul, o canal 2 o vermelho e o canal 3 o verde. Isto é feito para 4 dias distintos selecionados onde ocorreram ELPN extremos. O ponto P1 é destacado por um círculo vermelho. Ao lado de cada imagem é feita uma análise de histograma para a altitude do topo de nuvem em cada situação específica correlata.



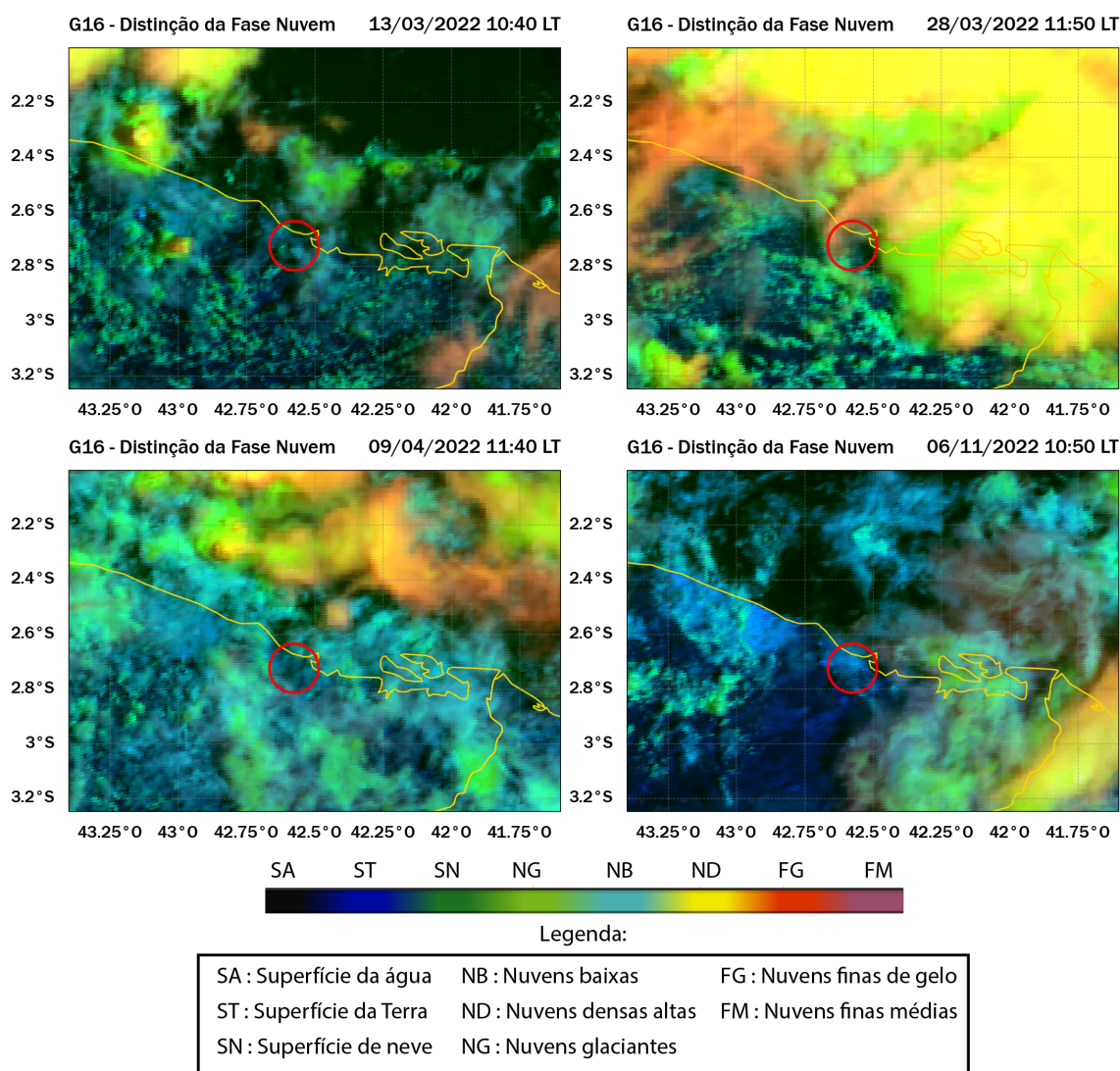
**Figura 31** – Observações projetadas com os canais visíveis do satélite GOES-16 para gerar uma imagem de cores reais para os dias (a) 13 de março de 2022 com GHI de 1498W/m<sup>2</sup> (b) 26 de março de 2022 com GHI de 1477W/m<sup>2</sup> (c) 13 de março de 2022 com GHI de 1522W/m<sup>2</sup> e (d) 6 de novembro de 2022 com GHI de 1545W/m<sup>2</sup>

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que a presença de nuvens, como visto pela composição de cores da combinação dos canais visíveis do satélite GOES-16, é heterogênea e não tão “brilhantes”.

Estas características indicam provavelmente nuvens de baixo nível de modo espalhado. Em outro tipo de análise possível usando combinações diferentes das bandas disponíveis, podem trazer mais informações sobre estes eventos.

Na figura 32 são projetadas imagens da composição dos canais 2, 5 e 13 para gerar o equivalente a uma imagem distinção de fase de nuvens para os mesmos dias como projetado na figura 31. A legenda de cores é formada para poder fazer a distinção, e é possível separar informações de diferentes propriedades observadas. É possível notar que dentro do círculo vermelho, do ponto P1 das medições em terra, há passagens de nuvens de cores entre o ciano e amarelo, onde o ciano representa as nuvens baixas e o amarelo representam nuvens densas e altas.



**Figura 32** – Observações projetadas com os canais 2,5 e 13 do satélite GOES-16 para gerar uma imagem de distinção da fase de nuvens para os dias (a) 13 de março de 2022 (b) 26 de março de 2022 (c) 13 de março de 2022 e (d) 6 de novembro de 2022

Fonte: Autoria própria.

## 4.4 Implicações do ELPN para a Energia Solar no Maranhão

A ocorrência de eventos de ELPN com duração de até 7,6 minutos acima de 1200 W/m<sup>2</sup> encontrado neste estudo é significativo pois supera o valor de referência comumente utilizado nas condições de teste padrão (STC) de 1000 W/m<sup>2</sup>, tornando-o um problema potencial para os módulos FV operando sob estas condições. Estes eventos, portanto, podem impactar o desempenho e a eficiência dos painéis solares, levando potencialmente à redução da produção de energia além de causar danos às células, módulos, inversores e outros componentes (ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014; SUDHAKAR et al., 2021; HAMDAN; MAGHRABY; NOURELDEEN, 2022). Além disso, o alto custo associado ao reparo e substituição dos componentes danificados pode ser significativo (ALMEIDA; ZILLES; LORENZO, 2014). Entretanto, também é importante notar que estes eventos são relativamente raros e podem não ter um impacto significativo sobre a produção geral de energia de um módulo FV. É crucial estudar melhor os efeitos desses eventos sobre os módulos FV e sua produção de energia a fim de entender melhor seu significado e desenvolver estratégias para mitigar seu impacto. A fim de compreender plenamente o impacto desses eventos na produção de energia, é necessário estudar o comportamento dos painéis solares em condições reais e entender como eles respondem às condições extremas de irradiância. Estas informações podem ser usadas para desenvolver estratégias para otimizar a produção de energia nos projetos de geração fotovoltaica.

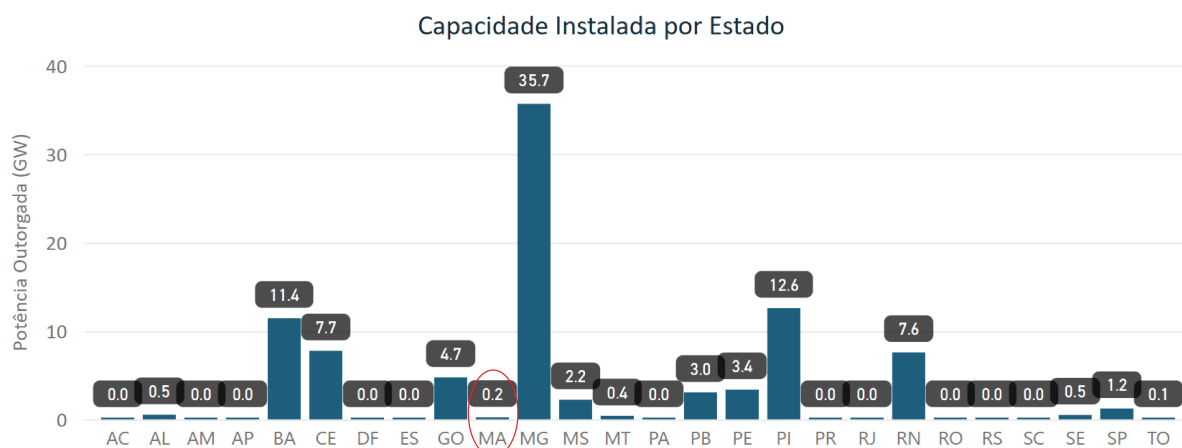
No estado do Maranhão, assim como em qualquer outra região, é fundamental que as instalações dos sistemas fotovoltaicos sigam as normas técnicas estabelecidas pelas entidades reguladoras, a fim de garantir a segurança dos operadores e usuários finais. O Maranhão pode ser considerado um dos estados mais vulneráveis aos efeitos de eventos extremos de irradiação solar sobre sistemas FV, devido a sua localização geográfica, altos níveis de irradiação solar, elevadas temperaturas médias anuais (MARTINS et al., 2017) e variabilidade de cobertura de nuvens. No entanto, há também alguns desafios a serem superados para aproveitar plenamente o potencial da energia solar no Maranhão. O aumento da corrente produzida durante um evento ELPN extremo pode causar danos no sistema e aumento de temperatura dos módulos que posteriormente irão causar problemas como danos nos módulos e queda na geração FV.

O estado do Maranhão possui infraestrutura do Sistema Interligado Nacional (SIN) (ONS, 2023), que é responsável pela distribuição de energia elétrica em todo o território brasileiro. O SIN é composto por diversas usinas de geração de energia elétrica, sejam elas hidrelétricas, termelétricas, eólicas ou solares, e por uma rede de transmissão de alta tensão que interliga essas usinas às subestações e às distribuidoras de energia elétrica em todo o país, possibilitando a importação e exportação de energia para outros estados brasileiros e garantindo o abastecimento energético da região.

O estado do Maranhão é atendido principalmente por duas empresas de distribuição

de energia elétrica: a Equatorial Maranhão e a Cemar. Ambas as empresas são responsáveis pela distribuição de energia elétrica no estado, recebendo a energia gerada no SIN e distribuindo para os consumidores finais.

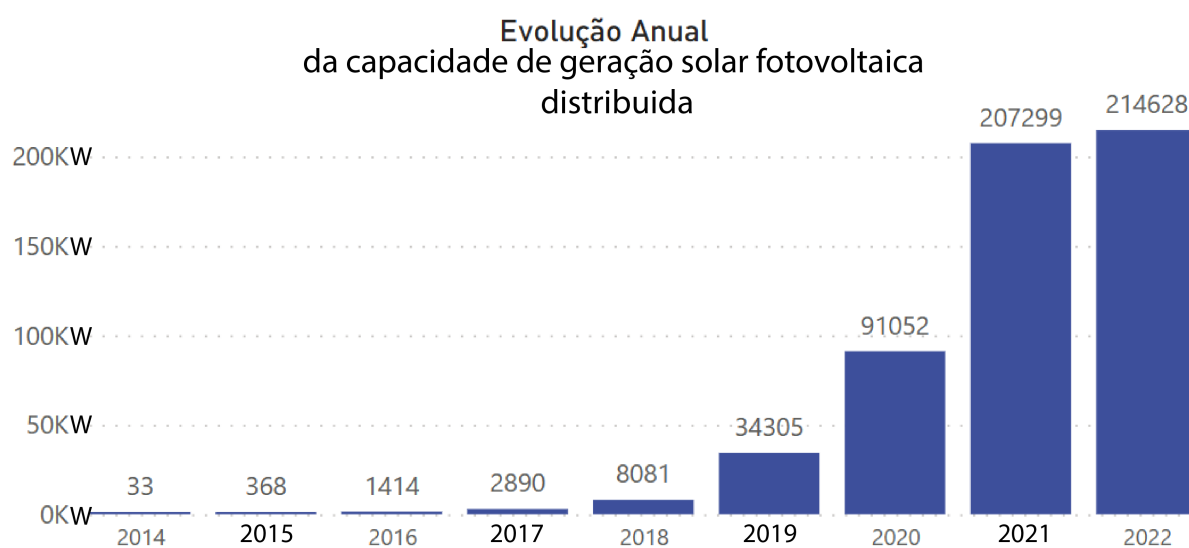
De acordo com o Sistema de Informações de Geração (SIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2023), a potência outorgada em meados de 2023 para Centrais Geradoras de Energia Solar Fotovoltaica (UFV) no estado do Maranhão foi de 13.422 kW, distribuídos entre oito empreendimentos localizados em cinco cidades do estado: Cururupu, Humberto de Campos, Vargem Grande, Caxias e Imperatriz. A figura 33 apresenta um gráfico da capacidade de energia solar fotovoltaica por estado em gigawatts fornecido pelo SIG.



**Figura 33** – Capacidade de energia solar fotovoltaica por estado em gigawatts.

Fonte: Retidado de ANEEL (2023).

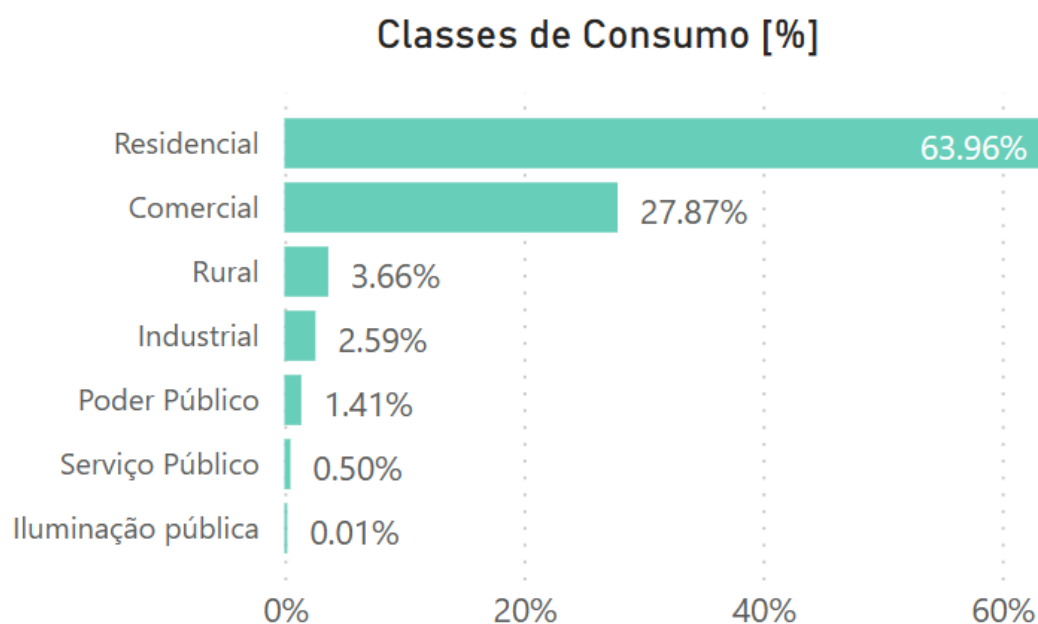
A Geração Distribuída (GD) também tem ganhado espaço no Maranhão crescendo ano após ano (figura 34), com uma capacidade instalada total de 214.628 kW (EOSOLAR, 2023), posicionando o estado em 14º lugar no ranking de estados brasileiros com maior capacidade de geração solar fotovoltaica instalada. Esse tipo de geração de energia elétrica é caracterizado pela instalação de sistemas de geração de pequeno ou médio porte em locais próximos aos consumidores, como residências, comércios e indústrias. As cidades de São Luís e Imperatriz, as maiores do estado, detêm juntas uma capacidade instalada de 76,8 kW em GD (EOSOLAR, 2023).



**Figura 34** – Evolução anual da capacidade de geração solar fotovoltaica distribuída no estado do Maranhão

Fonte: Retidado de [EOSOLAR \(2023\)](#).

Segundo o site interativo do [EOSOLAR \(2023\)](#), a classe de consumo predominante é a residencial, sendo aproximadamente 67%, em seguida da classe comercial com 28% como mostrado na figura 35. A classe de consumo de energia é determinada a partir da média mensal de consumo de energia elétrica em quilowatt-hora (kWh) do consumidor.



**Figura 35** – Relação das Classes de Consumo de Geração Distribuída no estado do Maranhão

Fonte: Retidado de [EOSOLAR \(2023\)](#).

# 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

## 5.1 Conclusões gerais sobre o trabalho

Os eventos ELPN são identificados quando a leitura de GHI excedem o perfil do modelo do céu limpo. Para a correta detecção destes eventos, é preciso levar em conta que erros nas medições de GHI e na estimativa de irradiância da curva do modelo de céu limpo. Para contornar estas incertezas, é necessário ao menos que os valores estejam 5% acima da curva do modelo. A adoção do método de Controle de Qualidade proposto por (YANG; YAGLI; QUAN, 2018) ajuda a separar as informações dos dados dos piranômetros com desconfiança a fim de obter um resultado mais confiável. Contando com este método, a análise indicou durante todo o período de medições, 22,7% das medições do piranômetro, em sua escala de tempo de 5 segundos, foram consideradas eventos ELPN. Os eventos extremos, em que a valor medido excede o valor da constante solar, foram registrados em 31 dias diferentes dentro de aproximadamente 14 meses de medições. O valor máximo encontrado foi de  $1565,9 \text{ W/m}^2$ , o que representa uma intensificação de  $591,7 \text{ W/m}^2$  acima do modelo de céu limpo. A duração média destes eventos foi calculada no valor de 10,33 segundos, onde no mês de janeiro de 2022 a duração total de eventos extremos consecutivos somou 190 segundos, ou 38 eventos consecutivos considerando uma escala de 5 segundos de medições.

Informações do contexto climatológico de cobertura de nuvens foram obtidos através da coleta e análise de medidas de radiância de satélites para inferir a distribuição regional das nuvens, suas propriedades e suas variações diurnas, sazonais e interanuais. A coleta de aproximadamente 33 anos de dados do GridSat-B1 e a aplicação do método utilizado para a classificação e separação de nuvens através da condição de restrição das temperaturas de brilho dos canais da janela de infravermelho e de vapor d'água, revelam o comportamento espacial e histórico de nuvens de baixo e médio nível, as principais suspeitas para a causa dos eventos de ELPN. É válido ressaltar que para a observação de nuvens como visto de cima são encontradas algumas dificuldades. As nuvens podem ser parcial ou completamente obscurecidas por outras nuvens. Ainda é possível cometer erros na interpretação na observação uma vez que as informações podem ser misturadas com a superfície.

Apesar de a cobertura de nuvens diminuir significativamente nos meses considerados secos, ainda nota-se uma grande quantidade de ocorrências de intensificação solar. A costa do Maranhão é conhecida como uma região de fortes ventos e brisa marítima presentes. Em geral, as áreas costeiras tendem a ter uma cobertura de nuvens e condições meteorológicas

mais variáveis em comparação com as áreas adentro do continente. Isto porque as áreas costeiras são frequentemente influenciadas tanto pela brisa terrestre quanto pela do mar, o que pode criar diferentes padrões meteorológicos e de formações de nuvens, o que pode favorecer a ocorrência de eventos ELPN.

Em observações de imagens de satélite, o ELPN é mais prevalente em situações espaciais e temporalmente não homogêneas, indicando que sua explicação é fundamentada em propriedades físicas e ópticas das nuvens. Embora várias suposições (YORDANOV, 2015; PECENAK et al., 2016; THUILLIER et al., 2013) sobre a causa do ELPN tenham sido propostas, o mecanismo que rege o fenômeno ainda não foi completamente esclarecido. Não é claro quais as condições ideais para garantir uma ocorrência de intensificação de irradiância produzido pelas nuvens. Porém, é possível inferir que a presença de nuvens baixas espalhadas, bem como a angulação dos raios do Sol através das pequenas aberturas das nuvens são as características mais reconhecidas para produzir o efeito (PECENAK et al., 2016; YORDANOV; SAETRE; MIDTGÅRD, 2013).

Através do método para determinar a altitude de topo de nuvens usando o conceito de gradiente adiabático atmosférico, que leva em consideração a diferença de temperatura de brilho obtidos através do canal de janela do infravermelho a partir do satélite GOES-16 e da temperatura da superfície, foi possível verificar que o ELPN na costa maranhense ocorre preferencialmente entre 2 e 8km de altitude de topo de nuvens. Os eventos extremos de ELPN, apesar de extremamente raros, ocorrem com altitudes de topo de nuvens similares e em períodos do ano onde a ocorrência de nuvens é maior, ou seja, nos períodos úmidos. Segundo Palharini e Vila (2017), o padrão de circulação atmosférica em larga escala considerando a região do norte do Nordeste do Brasil, que inclui a região costeira do Maranhão, são modulados pelas células Hadley e Walker. A célula Hadley é responsável pelo transporte de calor por convecção e, durante períodos mais secos, o ramo descendente da célula Walker inibe a formação de nuvens com grande desenvolvimento vertical. Tendo em vista que as detecções das ocorrências de eventos ELPN extremos estão concentradas em períodos considerados úmidos (tabela 7) e, além disso, com o perfil de altitude de topo de nuvens (figura 30b) e a indicação de que se tratam de nuvens baixas (figura 32) é possível sugerir que o desenvolvimento vertical das nuvens devido aos sistemas climáticos atuantes é favorável a ocorrência de um evento de ELPN extremo.

Ainda em imagens do satélite GOES-16, utilizando combinações de diferentes canais de seu imageador, a percepção visual da característica espacial das nuvens que produziram elevados valores de irradiância medidos em terra leva a interpretação de que se tratam de nuvens com brilho moderado, característico de nuvens baixas. É provável ainda que nuvens em multi-camadas ou a combinação de alguns tipos de nuvens, assim como percebidos por alguns autores na literatura, podem ser uma outra característica causadora dos eventos de ELPN.

De fato, há grande importância em compreender os impactos dos eventos extremos de irradiação solar em sistemas fotovoltaicos, especialmente no estado do Maranhão, que é um dos estados mais vulneráveis devido à sua localização geográfica e altos níveis de irradiação solar. Esses eventos podem afetar negativamente o desempenho dos painéis solares: em um primeiro momento aumentando a geração de energia, mas o aumento da corrente produzida pode causar danos no sistema e aumento de temperatura dos módulos que posteriormente vão causar problemas como danos nos módulos e queda na geração reduzindo a produção de energia e causando danos aos componentes. O principal fator que pode atribuir a um impacto significativo nesses sistemas é o tempo de duração e intensidade elevados, indo até 7,6 minutos de duração em níveis de irradiância superiores a  $1200\text{W}/\text{m}^2$ , que pode significar em sobrecargas, sobreaquecimento e implicações como danos na eletrônica dos sistemas de energia solar fotovoltaico subdimensionados, gerando perdas econômicas expressivas. No entanto, é importante destacar que esses eventos são relativamente raros e que o potencial da energia solar no Maranhão é enorme, sendo atualmente o 14° no ranking dos estados brasileiros com maior capacidade de geração solar fotovoltaica instalada. É fundamental que as instalações dos sistemas fotovoltaicos sigam as normas técnicas estabelecidas pelas entidades reguladoras para garantir a segurança dos operadores e usuários finais. O estado do Maranhão está integrado ao Sistema Interligado Nacional, possibilitando a importação e exportação de energia para outros estados brasileiros e garantindo o abastecimento energético da região.

## 5.2 Recomendações para trabalhos futuros

No decorrer deste estudo, foram surgindo algumas considerações que poderiam ser mais exploradas em trabalhos futuros, dentre as quais se destacam:

- Os satélites meteorológicos geoestacionários são limitados para a observação da “não-homogeneidade” das nuvens devido a sua resolução espacial, o que aponta para a necessidade de uma implementação mais ampla de transferência de radiação em três dimensões na atmosfera para tratar nuvens não-homogêneas;
- As técnicas de aprendizagem de máquinas ou “*machine learning*” tais como redes neurais artificiais, podem ser usadas para melhorar a precisão das previsões de radiação solar, aprendendo com os dados identificados como eventos ELPN;
- Atingir o aprimoramento dos modelos atuais existentes da estimativa de radiação solar e previsão da intensificação de irradiância pelo ELPN, pode ajudar os sistemas fotovoltaicos a melhorar o rendimento energético ao fornecer previsões mais precisas da irradiação solar. Melhores modelos podem ajudar a otimizar o projeto e a operação dos sistemas fotovoltaicos, levando a maior eficiência e segurança do sistema.

# REFERÊNCIAS

- ALBARELO, T. et al. Optimizing the heliosat-ii method for surface solar irradiation estimation with goes images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, v. 41, n. 2, p. 86–100, 2015. Citado na página 38.
- ALMEIDA, M. P.; ZILLES, R.; LORENZO, E. Extreme overirradiance events in são paulo, brazil. *Solar Energy*, v. 110, p. 168–173, 2014. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14004423>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 72.
- AN, N.; WANG, K. A comparison of modis-derived cloud fraction with surface observations at five surfrad sites. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, American Meteorological Society, v. 54, n. 5, p. 1009–1020, 2015. Citado na página 25.
- ANDRADE, R. C. de; TIBA, C. Extreme global solar irradiance due to cloud enhancement in northeastern brazil. *Renewable energy*, Elsevier, v. 86, p. 1433–1441, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 14, 21 e 22.
- ANEEL. *Capacidade FV Instalada por Estado*. 2023. Disponível em: <<https://bit.ly/2IGf4Q0>>. Citado na página 73.
- ASSIREU, A. T. et al. Eosolar project: Assessment of wind resources of a coastal equatorial region of brazil—overview and preliminary results. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 7, p. 2319, 2022. Citado na página 14.
- CHUN, S.; KWASINSKI, A. Analysis of classical root-finding methods applied to digital maximum power point tracking for sustainable photovoltaic energy generation. *IEEE transactions on power electronics*, IEEE, v. 26, n. 12, p. 3730–3743, 2011. Citado na página 27.
- COSTA, A. A. et al. Microphysical observations of warm cumulus clouds in ceara, brazil. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 54, n. 2-3, p. 167–199, 2000. Citado na página 55.
- DAMIANI, A. et al. Evaluation of himawari-8 surface downwelling solar radiation by ground-based measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, Copernicus GmbH, v. 11, n. 4, p. 2501–2521, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 38.
- EOSOLAR. *Geração Distribuída no Estado do Maranhão, Brasil*. 2023. Disponível em: <<https://eosolar.equatorialenergia.com.br/#>>. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.
- GU, L. et al. Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in southern brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier, v. 106, n. 2, p. 117–129, 2001. Citado na página 30.
- HAMDAN, I.; MAGHRABY, A.; NOURELDEEN, O. Random search optimization algorithm based control of supercapacitor integrated with solar photovoltaic system under climate conditions. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, v. 12, n. 2, p. 611–622, 2022. Citado na página 72.

- HONG, Y.-Y.; MARTINEZ, J. J. F.; FAJARDO, A. C. Day-ahead solar irradiation forecasting utilizing gramian angular field and convolutional long short-term memory. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 18741–18753, 2020. Citado na página 29.
- IEC, T. Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification-part. p. 7–1, 2010. Citado na página 27.
- INEICHEN, P.; PEREZ, R. A new airmass independent formulation for the linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, Elsevier, v. 73, n. 3, p. 151–157, 2002. Citado na página 18.
- INMAN, R. H.; CHU, Y.; COIMBRA, C. F. Cloud enhancement of global horizontal irradiance in california and hawaii. *Solar Energy*, Elsevier, v. 130, p. 128–138, 2016. Citado na página 19.
- KASSIANOV, E.; LONG, C. N.; OVTCHINNIKOV, M. Cloud sky cover versus cloud fraction: Whole-sky simulations and observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, American Meteorological Society, v. 44, n. 1, p. 86–98, 2005. Citado na página 25.
- Kipp & Zonen. *Pyranometers For the Accurate Measurement of Solar Irradiance*. 2022. 1–5 p. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Download/1063/Datasheet-CMP10-CMP11-SMP10-SMP11-pyranometers-EN>>. Citado na página 44.
- KNAPP, K. Gridded satellite b1 fcdR—monthly means. *NOAA Nat. Climatic Data Center, Asheville, NC, USA, Tech. Rep*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- KNAPP, K. R. Noaa climate data record (cdr) of gridded satellite data from isccp b1 (gridsat-b1) infrared channel brightness temperature, version 2. *NOAA's CDR Program*, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- KNAPP, K. R. et al. Globally gridded satellite observations for climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 92, n. 7, p. 893–907, 2011. Citado na página 33.
- LUIZ, E. W. et al. Analysis of intra-day solar irradiance variability in different brazilian climate zones. *Solar Energy*, Elsevier, v. 167, p. 210–219, 2018. Citado na página 36.
- MARINHO, L. P. B. et al. Analyses of shallow convection over the amazon coastal region using satellite images, data observations and modeling análise da convecção rasa sobre a região costeira amazônica usando imagens de satélite, dados observacionais e modelagem. *Revista brasileira de meteorologia*, Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 33, n. 2, p. 366–379, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 61.
- MARTINS, F. R. et al. Atlas brasileiro de energia solar 2. Inpe, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 72.
- MAYER, M. J. Effects of the meteorological data resolution and aggregation on the optimal design of photovoltaic power plants. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 241, p. 114313, 2021. Citado na página 14.
- MUHSIN, M. Climatology and trend of tropical cloud cover using gridded satellite (gridsat) data. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 15, 41 e 42.

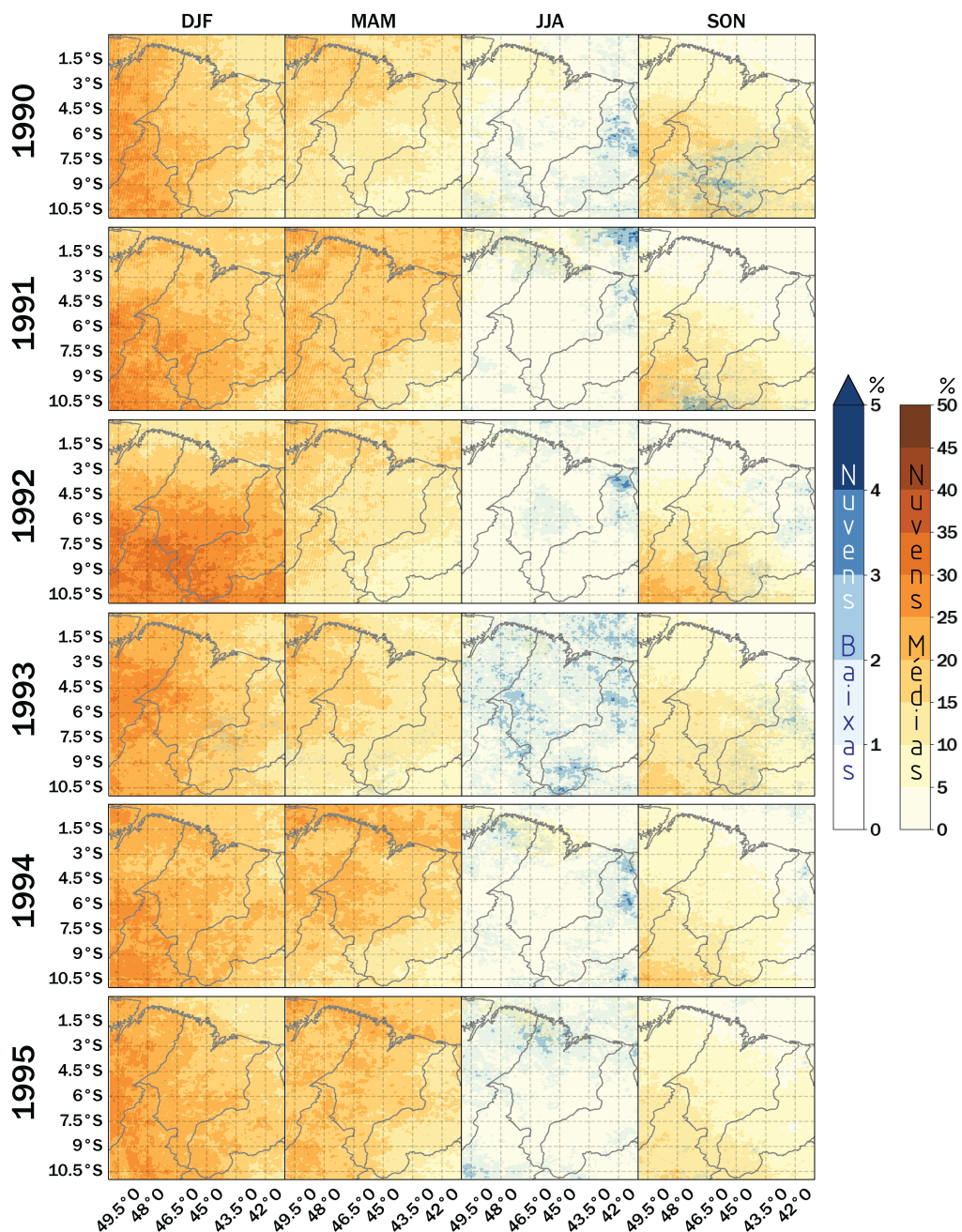
- NASCIMENTO, L. R. do et al. Extreme solar overirradiance events: Occurrence and impacts on utility-scale photovoltaic power plants in brazil. *Solar Energy*, Elsevier, v. 186, p. 370–381, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 14, 22, 23, 28 e 56.
- NSENGIYUMVA, W. et al. Recent advancements and challenges in solar tracking systems (sts): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 81, p. 250–279, 2018. Citado na página 27.
- ONS. *O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL*. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Citado na página 72.
- PALHARINI, R. S. A.; VILA, D. A. Climatological behavior of precipitating clouds in the northeast region of brazil. *Advances in Meteorology*, Hindawi, v. 2017, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 76.
- PECENAK, Z. K. et al. Simulating irradiance enhancement dependence on cloud optical depth and solar zenith angle. *Solar Energy*, Elsevier, v. 136, p. 675–681, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 38, 64 e 76.
- PIACENTINI, R. D. et al. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the ne atlantic coast of brazil. *Renewable Energy*, v. 36, n. 1, p. 409–412, 2011. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811000265X>>. Citado na página 14.
- PURBANTORO, B. et al. Comparison of cloud type classification with split window algorithm based on different infrared band combinations of himawari-8 satellite. *Advances in Remote Sensing*, Scientific Research Publishing, v. 7, n. 3, p. 218–234, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 15, 42, 43 e 69.
- SAMPAIO, G.; MARENGO, J.; NOBRE, C. A atmosfera e as mudanças climáticas. *Biologia e mudanças climáticas no Brasil, São Paulo*, p. 23–46, 2008. Citado na página 54.
- SCHADE, N. et al. Enhanced solar global irradiance during cloudy sky conditions. *Meteorologische Zeitschrift*, Schweizerbart, v. 16, n. 3, p. 295–303, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- SCHMIT, T. et al. Goes-r advanced baseline imager (abi) algorithm theoretical basis document for cloud and moisture imagery product (cmip). *Noaa Nedis Star*, p. 1–60, 2012. Disponível em: <[https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/documents/ATBDs/Baseline/ATBD\\_GOES-R\\_ABI\\_CMI\\_KPP\\_v3.0\\_July2012.pdf](https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/documents/ATBDs/Baseline/ATBD_GOES-R_ABI_CMI_KPP_v3.0_July2012.pdf)>. Citado na página 42.
- SCHMIT, T. J. et al. A closer look at the abi on the goes-r series. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 98, n. 4, p. 681–698, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- SCHMIT, T. J. et al. Applications of the 16 spectral bands on the advanced baseline imager (abi). 2018. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 43.
- SENGUPTA, M.; ANDREAS, A. *Oahu solar measurement grid (1-year archive): 1-second solar irradiance; Oahu, Hawaii (data)*. [S.l.], 2010. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 58.

- SINGHAM, S. B.; BOHREN, C. F. Light scattering by an arbitrary particle: a physical reformulation of the coupled dipole method. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, v. 12, n. 1, p. 10–12, 1987. Citado na página 37.
- STEIN, J. S.; HANSEN, C. W.; RENO, M. J. *Global horizontal irradiance clear sky models: implementation and analysis*. [S.l.], 2012. Citado na página 18.
- STULL, R. Practical meteorology. *An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*, 2015. Citado na página 32.
- SUDHAKAR, K. et al. Energy analysis of utility-scale pv plant in the rain-dominated tropical monsoon climates. *Case Studies in Thermal Engineering*, Elsevier, v. 26, p. 101123, 2021. Citado na página 72.
- THUILLIER, G. et al. Local enhanced solar irradiance on the ground generated by cirrus: measurements and interpretation. *Journal of applied remote sensing*, International Society for Optics and Photonics, v. 7, n. 1, p. 073543, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 76.
- URRACA, R. et al. Smart baseline models for solar irradiation forecasting. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 108, p. 539–548, 2016. Citado na página 29.
- VOYANT, C.; NOTTON, G. Solar irradiation nowcasting by stochastic persistence: A new parsimonious, simple and efficient forecasting tool. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 92, p. 343–352, 2018. Citado na página 29.
- WHITAKER, C.; NEWMILLER, J. Photovoltaic module energy rating procedure. *Final subcontract report submitted to NREL (NREL/SR-SR-520-23942)*, 1998. Citado na página 27.
- WIDÉN, J.; SHEPERO, M.; MUNKHAMMAR, J. On the properties of aggregate clear-sky index distributions and an improved model for spatially correlated instantaneous solar irradiance. *Solar Energy*, Elsevier, v. 157, p. 566–580, 2017. Citado na página 17.
- YANG, D.; YAGLI, G. M.; QUAN, H. Quality control for solar irradiance data. In: *IEEE. 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*. [S.l.], 2018. p. 208–213. Citado 6 vezes nas páginas 15, 19, 29, 31, 45 e 75.
- YORDANOV, G. H. A study of extreme overirradiance events for solar energy applications using nasa’s i3rc monte carlo radiative transfer model. *Solar Energy*, v. 122, p. 954–965, 2015. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X15005617>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 76.
- YORDANOV, G. H. et al. Overirradiance (cloud enhancement) events at high latitudes. p. 1–7, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 37.
- YORDANOV, G. H.; SAETRE, T. O.; MIDTGÅRD, O.-M. 100-millisecond resolution for accurate overirradiance measurements. *IEEE Journal of Photovoltaics*, IEEE, v. 3, n. 4, p. 1354–1360, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 76.

# APÊNDICE A – MAPAS DA CLIMATOLOGIA

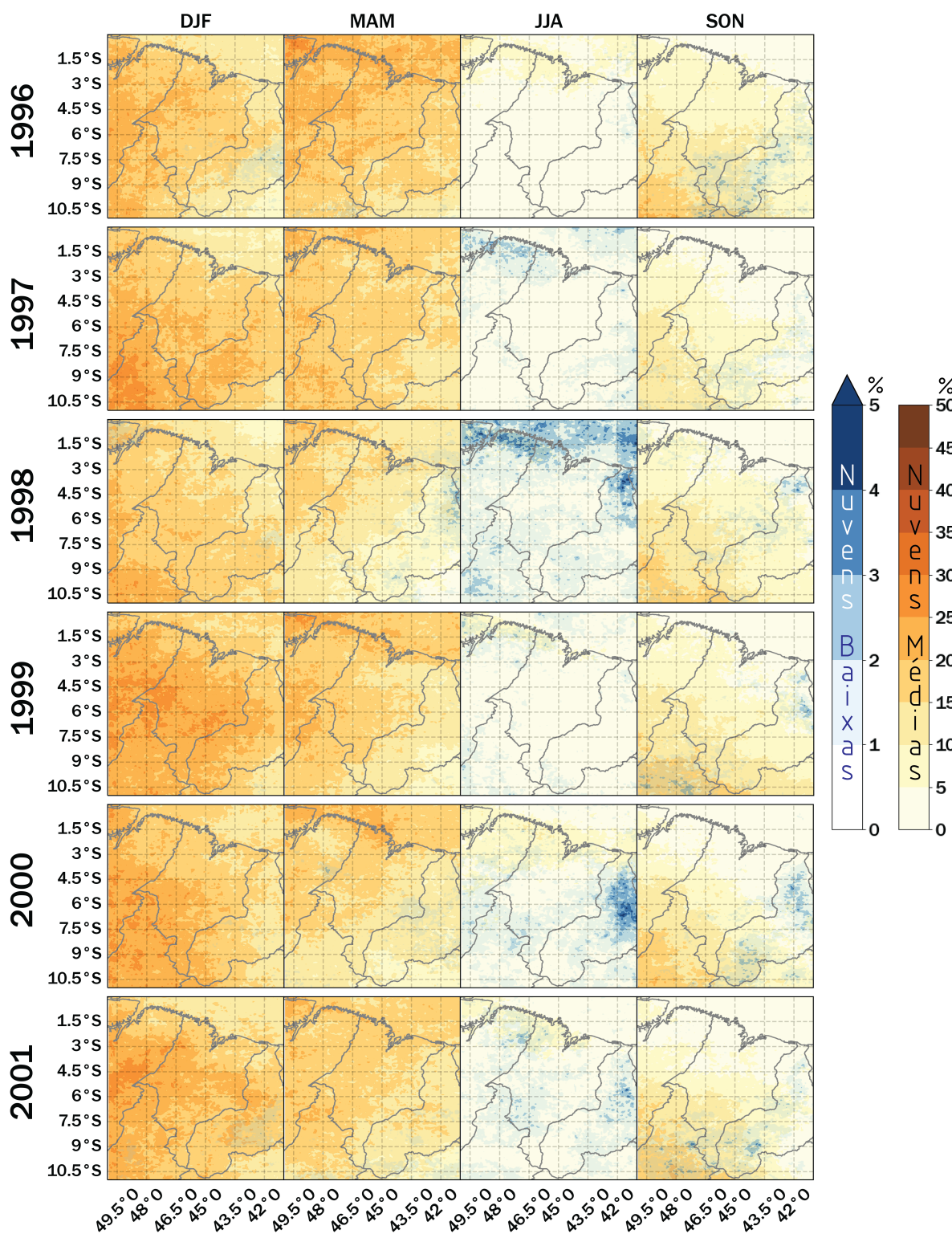
As plotagens dos mapas de ocorrência de cobertura de nuvens baixas e médias por estação e por ano são ilustradas como segue (figuras 36,37,38,39,41). As iniciais “DJF” são “Dezembro-Janeiro-Fevereiro”, seguindo o mesmo padrão para os demais meses:

**Figura 36** – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 1990-1995



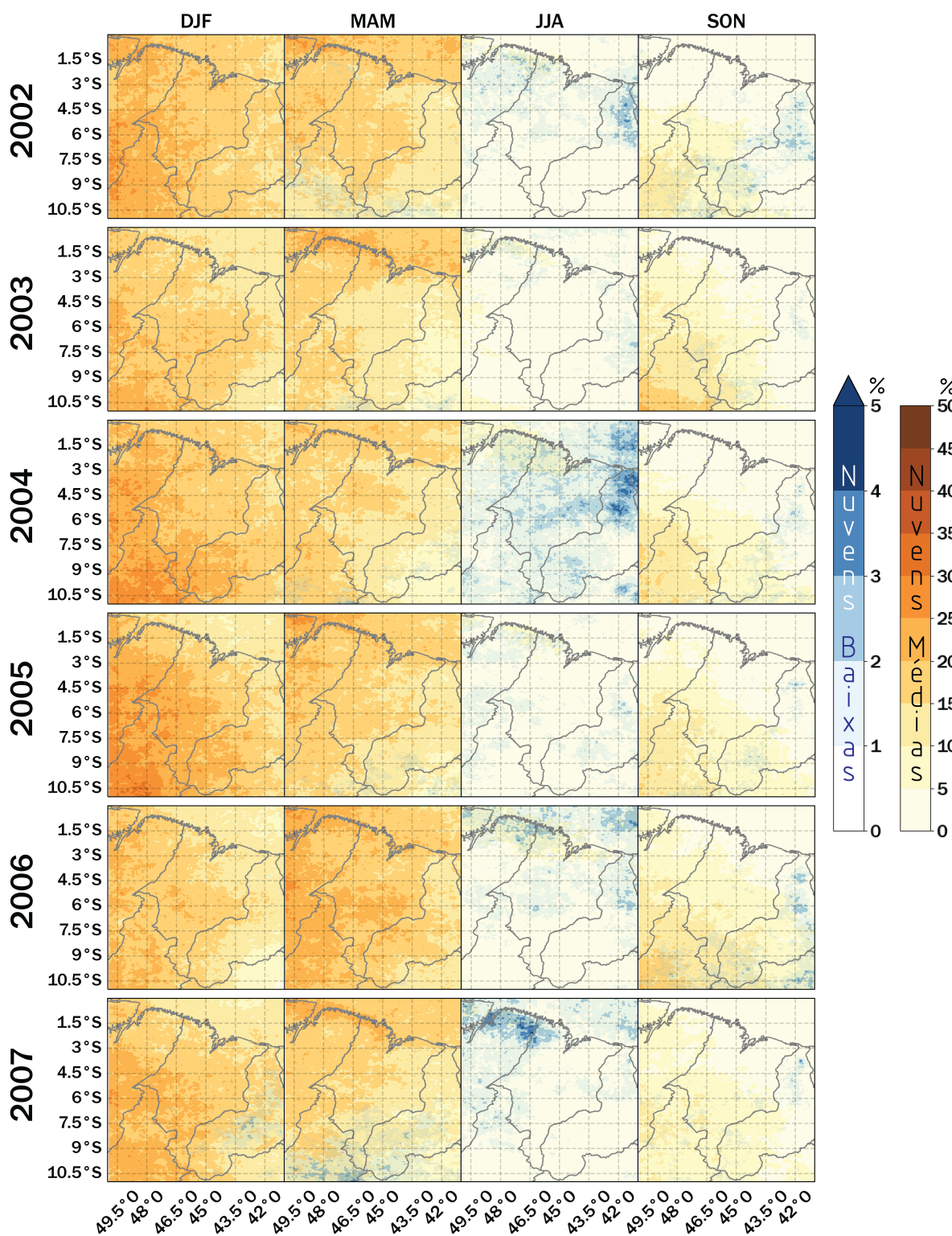
Autoria própria.

Figura 37 – Cobertura de nuvens médias e baixo nível por estação, nos anos 1996-2001



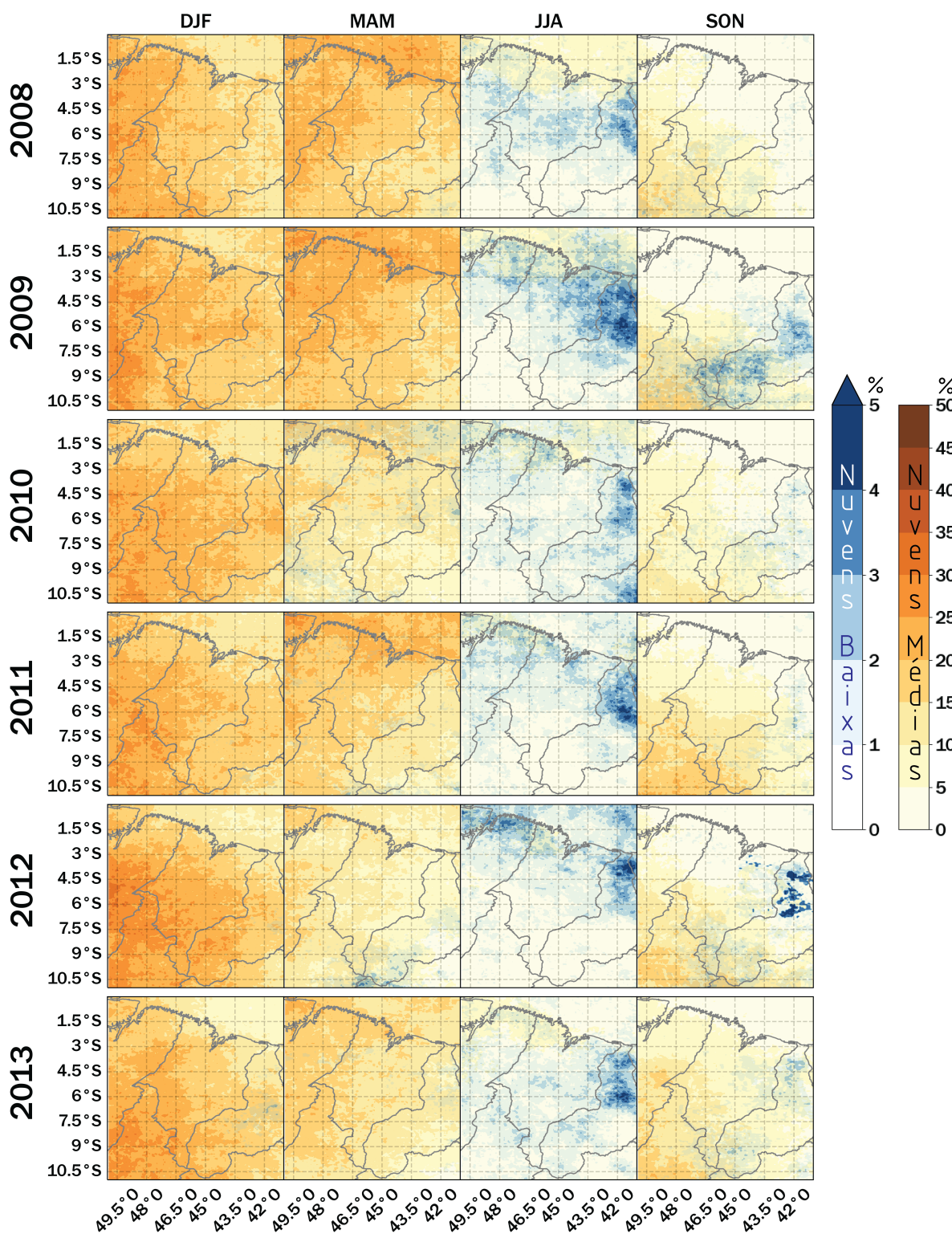
Autoria própria.

Figura 38 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2002-2007



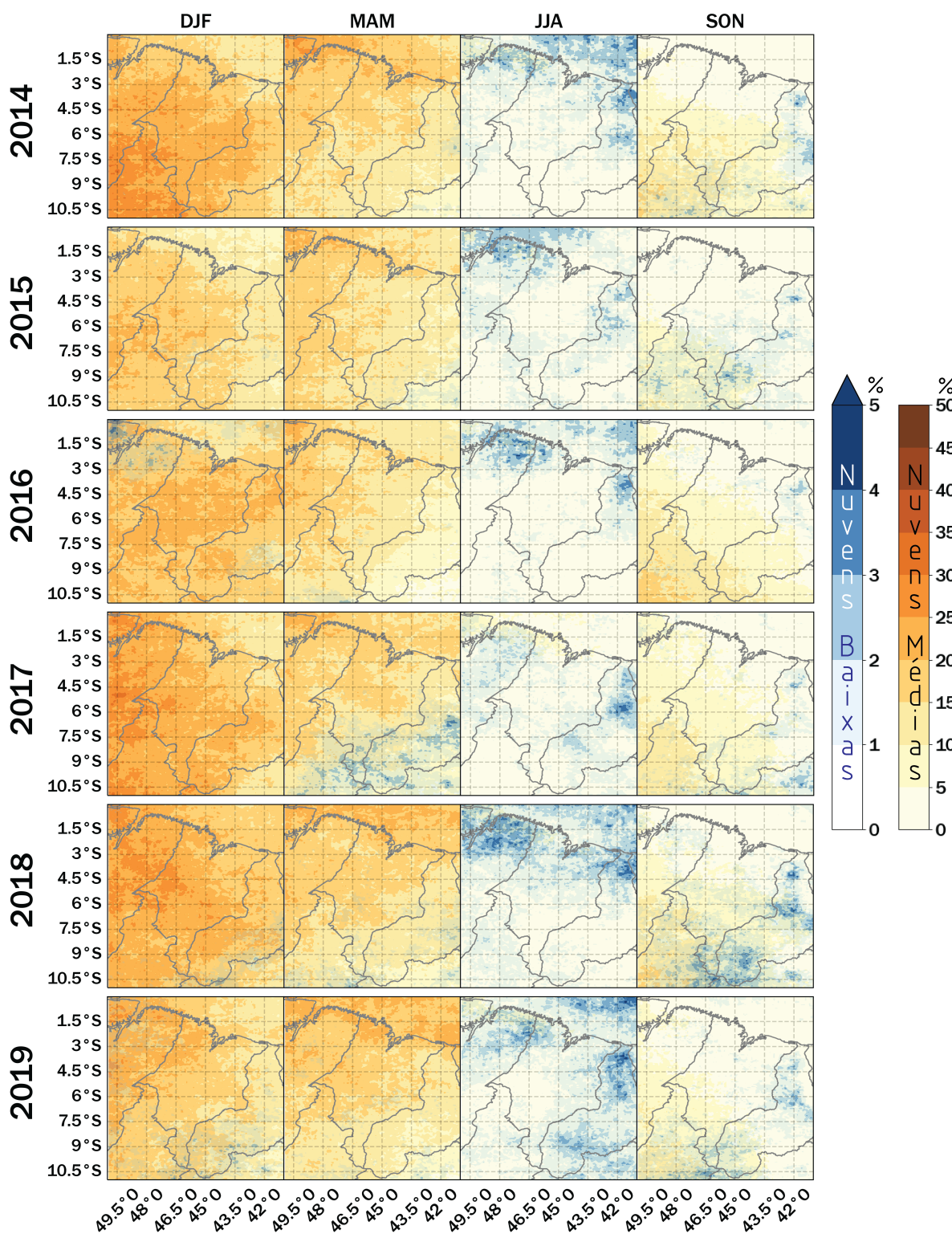
Autoria própria.

Figura 39 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2008-2013



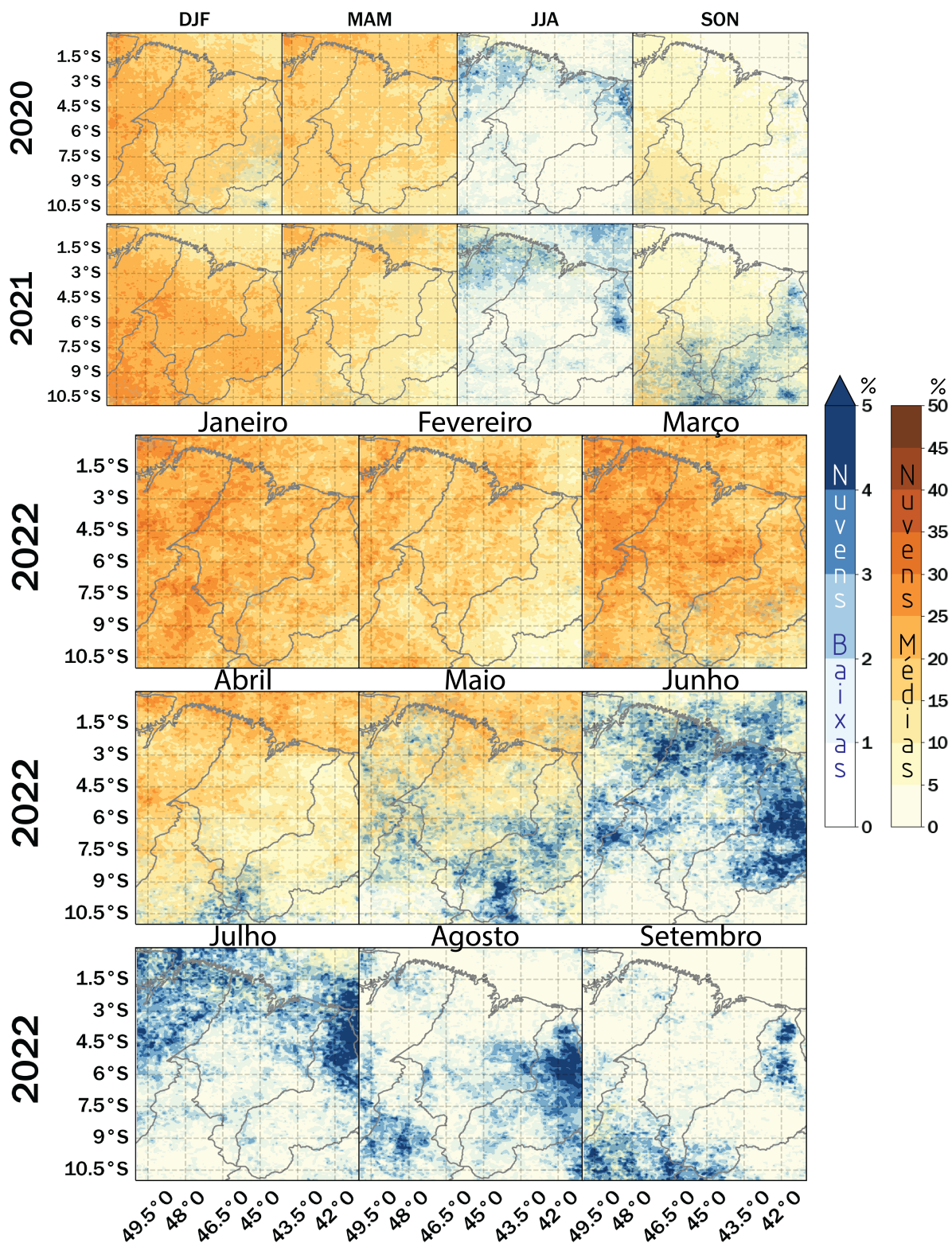
Autoria própria.

Figura 40 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2014-2019



Autoria própria.

Figura 41 – Cobertura de nuvens de médio e baixo nível por estação, nos anos 2020-2022



Autoria própria.

# APÊNDICE B – CALENDÁRIOS DE IRRADIÂNCIA

As plotagens dos mapas de irradiância em forma de calendário, estão dispostos nas figuras 42,43, contando com a referência de céu limpo e destaca os dados de intensificação de irradiância (ELPN):

**Figura 42** – Calendário solarimétrico entre novembro de 2021 a abril de 2022.



Autoria própria.

Figura 43 – Calendário solarimétrico entre maio de 2022 a dezembro de 2022.



Autoria própria.

# APÊNDICE C – EVENTOS EXTREMOS DE ELPN

A tabela 8 mostra a data e hora de ocorrência dos ELPN extremos, assim como temperatura local, ângulo de Zênite Solar e o respectivo valor de irradiância do Modelo de céu limpo de Ineichen em 382 dias de dados analisados:

**Tabela 8** - Lista de eventos ELPN extremos encontrados no período analisado

Data e hora	GHI (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura local (°C)	Modelo céu limpo (W/m <sup>2</sup> )	Ângulo de Zênite Solar
14/11/2021 12h15m	1370.0	35.09	956.928367	18.50
14/11/2021 12h16m	1386.0	35.15	956.055284	18.63
26/11/2021 12h20m	1386.0	37.50	943.010963	21.02
31/12/2021 11h44m	1375.0	34.05	957.961714	20.45
02/01/2022 10h39m	1443.0	32.81	901.296975	27.19
15/01/2022 12h20m	1447.0	29.00	972.617489	18.97
15/01/2022 12h21m	1452.0	29.06	972.173695	19.03
15/01/2022 12h22m	1462.0	29.16	971.708558	19.10
15/01/2022 12h23m	1470.0	29.30	971.222089	19.17
15/01/2022 12h24m	1464.0	29.48	970.714296	19.24
28/01/2022 11h43m	1421.0	32.24	983.260496	16.15
02/02/2022 12h21m	1379.0	37.62	988.611705	14.57
02/02/2022 13h12m	1386.0	38.25	941.537720	21.76
05/02/2022 11h40m	1388.0	34.12	987.522094	14.38
13/02/2022 12h11m	1406.0	36.95	998.496061	10.62
19/02/2022 12h16m	1441.0	35.30	1000.0	8.90
19/02/2022 12h20m	1433.0	35.40	999.074001	9.30
19/02/2022 12h21m	1454.0	35.43	998.708684	9.40
05/03/2022 10h50m	1395.0	32.10	945.080745	18.17
05/03/2022 10h51m	1396.0	32.15	946.652988	17.92
06/03/2022 11h58m	1390.0	34.36	1000.0	2.90
06/03/2022 11h59m	1430.0	34.44	1000.0	2.90
12/03/2022 11h31m	1398.0	34.89	989.124249	7.30
13/03/2022 10h30m	1452.0	34.41	908.653909	22.41
13/03/2022 10h45m	1498.0	34.89	935.692669	18.67
13/03/2022 10h46m	1464.0	34.90	937.327411	18.41
13/03/2022 10h47m	1458.0	34.90	938.940969	18.17

13/03/2022 10h48m	1387.0	34.92	940.533307	17.92
13/03/2022 10h56m	1411.0	35.04	952.504155	15.92
13/03/2022 10h57m	1458.0	35.05	953.904057	15.67
13/03/2022 10h58m	1436.0	35.05	955.282423	15.42
13/03/2022 11h00m	1419.0	35.08	957.974434	14.92
13/03/2022 11h13m	1392.0	35.31	973.355052	11.67
13/03/2022 11h15m	1397.0	35.34	975.393429	11.18
14/03/2022 11h00m	1424.0	34.01	957.512590	14.86
14/03/2022 11h01m	1399.0	34.02	958.819798	14.61
14/03/2022 11h59m	1387.0	34.51	996.928486	0.40
14/03/2022 12h03m	1391.0	34.62	996.790262	0.90
14/03/2022 12h16m	1393.0	34.72	993.863146	4.10
14/03/2022 12h18m	1375.0	34.75	993.076728	4.60
14/03/2022 12h20m	1386.0	34.83	992.200840	5.10
14/03/2022 12h22m	1410.0	34.94	991.235557	5.60
14/03/2022 12h23m	1411.0	35.00	990.719416	5.90
24/03/2022 12h17m	1392.0	34.39	987.159958	6.70
26/03/2022 11h24m	1398.0	33.21	979.048805	9.50
26/03/2022 11h36m	1395.0	33.32	985.964113	7.10
28/03/2022 11h41m	1392.0	31.32	986.420698	6.90
28/03/2022 11h46m	1387.0	31.51	987.733292	6.30
28/03/2022 11h47m	1428.0	31.56	987.929100	6.20
28/03/2022 11h50m	1412.0	31.71	988.383030	6.00
28/03/2022 11h51m	1454.0	31.76	988.489832	6.00
28/03/2022 11h52m	1477.0	31.82	988.574377	5.90
28/03/2022 11h53m	1443.0	31.88	988.636664	5.90
28/03/2022 11h54m	1476.0	31.94	988.676690	5.90
28/03/2022 11h58m	1443.0	32.13	988.614185	5.90
29/03/2022 11h44m	1424.0	34.48	986.431245	6.80
31/03/2022 11h50m	1390.0	33.82	985.569656	7.10
31/03/2022 12h02m	1370.0	34.14	985.142980	7.30
31/03/2022 12h03m	1373.0	34.15	984.963174	7.30
01/04/2022 10h54m	1392.0	34.76	944.910686	16.75
01/04/2022 11h06m	1377.0	34.48	959.161942	14.13
01/04/2022 11h18m	1372.0	34.27	970.296368	11.68
01/04/2022 12h00m	1390.0	34.54	984.328783	7.60
01/04/2022 12h01m	1411.0	34.56	984.186907	7.60
01/04/2022 12h02m	1474.0	34.60	984.022869	7.70
01/04/2022 12h03m	1465.0	34.65	983.836669	7.70

---

01/04/2022 12h04m	1430.0	34.72	983.628313	7.80
01/04/2022 12h11m	1369.0	35.04	981.549837	8.50
01/04/2022 12h25m	1410.0	35.67	974.146014	10.69
01/04/2022 12h27m	1389.0	35.75	972.736179	11.06
04/04/2022 11h30m	1385.0	33.80	975.269701	10.35
04/04/2022 11h46m	1382.0	34.07	980.646565	8.80
04/04/2022 11h52m	1442.0	33.93	981.206348	8.60
07/04/2022 11h21m	1373.0	33.34	966.521033	12.47
09/04/2022 10h30m	1369.0	33.58	901.899835	22.93
09/04/2022 11h47m	1522.0	34.51	974.282951	10.51
09/04/2022 11h48m	1403.0	34.55	974.377697	10.49
09/04/2022 12h42m	1438.0	35.45	947.012896	16.29
09/04/2022 12h43m	1422.0	35.48	945.910004	16.48
09/04/2022 12h50m	1382.0	35.87	937.592965	17.87
09/04/2022 12h51m	1381.0	35.91	936.319856	18.07
09/04/2022 12h52m	1421.0	35.97	935.025586	18.27
09/04/2022 12h53m	1414.0	36.03	933.710180	18.48
09/04/2022 12h54m	1442.0	36.10	932.373667	18.69
09/04/2022 12h55m	1436.0	36.17	931.016074	18.89
23/04/2022 10h22m	1386.0	32.57	871.198053	26.43
14/05/2022 11h09m	1378.0	33.65	895.586023	23.35
28/06/2022 12h04m	1380.0	34.64	862.283617	26.09
11/07/2022 11h31m	1368.0	35.64	876.130942	25.50
06/11/2022 10h54m	1493.0	38.12	966.777926	16.57
06/11/2022 10h56m	1497.0	38.20	968.459430	16.29
06/11/2022 10h57m	1545.0	38.25	969.268066	16.15
06/11/2022 10h58m	1492.0	38.31	970.055268	16.01
06/11/2022 11h02m	1521.0	38.68	972.989428	15.49
06/11/2022 11h07m	1392.0	39.29	976.173068	14.91
06/11/2022 11h08m	1401.0	39.40	976.745120	14.80
06/11/2022 11h09m	1409.0	39.52	977.295586	14.69
06/11/2022 11h10m	1485.0	39.65	977.824454	14.59
06/11/2022 11h11m	1476.0	39.77	978.331713	14.50
11/11/2022 11h20m	1386.0	37.25	976.054046	15.20
14/11/2022 10h25m	1370.0	32.24	922.837988	23.11
14/11/2022 10h29m	1380.0	32.46	928.578597	22.40
14/11/2022 10h36m	1403.0	32.97	937.830897	21.20
14/11/2022 11h38m	1442.0	34.87	974.579882	15.61

---