



## Mapeamento solarimétrico do estado de Alagoas em anos de eventos extremos pluviométricos, utilizando o modelo WRF-Solar

Taiane Alves da Silva<sup>\*1</sup>, Rosiberto Salustiano da Silva Junior<sup>2</sup>, Diogo Nunes da Silva Ramos<sup>3</sup>, Antônio Marcos D. Andrade<sup>4</sup>, José Francisco de Oliveira Junior<sup>5</sup>, Ewerton de Souza Muniz<sup>6</sup>

1Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), [taiana88@gmail.com](mailto:taiana88@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0003-1448-3819>); 2Professor Nível Associado da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), [rosiberto@icat.ufal.br](mailto:rosiberto@icat.ufal.br) (<https://orcid.org/0000-0001-7152-0095>); 3SENAI CIMATEC: Salvador, BA, [diogonsramos@gmail.com](mailto:diogonsramos@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-6483-9345>); 4Professor Nível Associado da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), [antonio.andrade@ufopa.edu.br](mailto:antonio.andrade@ufopa.edu.br) (<https://orcid.org/0000-0002-2075-7890>); 5Professor Nível Associado da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), [jose.junior@icat.ufal.br](mailto:jose.junior@icat.ufal.br) (<https://orcid.org/0000-0002-6131-7605>); 6Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), [ewerton.muniz@icat.ufal.br](mailto:ewerton.muniz@icat.ufal.br) (<https://orcid.org/0009-0003-7913-9813>)

Artigo recebido em 17/08/2025 e aceito em 12/12/2025

### RESUMO

A energia solar é uma solução estratégica para o planejamento de sistemas fotovoltaicos é essencial para atingir as metas globais de sustentabilidade. Em Alagoas, apesar do alto potencial solar, eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e secas prolongadas, desafiam a geração de energia renovável. Este estudo avaliou a eficácia do modelo WRF-Solar na estimativa do potencial solarimétrico do estado, focado em anos com eventos extremos pluviométricos. Foram analisados dados do modelo WRF-Solar (versão 4.6.0, resolução de 5 km) para o período de 2022 a 2023, cobrindo a região de Alagoas. A validação do modelo foi realizada quantitativamente com dados de radiação do INMET e qualitativamente com dados de chuva do MERGE. O modelo, com ajustes otimizados para simular irradiância solar (incluindo interação com aerossóis e nuvens híbridas), mostrou maior precisão na representação da variabilidade espacial e temporal da radiação solar. As métricas estatísticas revelaram valores de  $r$  de 0,74, 0,80 e 0,86 para as regiões Litoral, Agreste e Sertão, respectivamente, com RMSE de 207,77 W/m<sup>2</sup>, 197,73 W/m<sup>2</sup> e 181,33 W/m<sup>2</sup>. Durante o evento La Niña de 2022, houve uma redução média de 15% na irradiância solar no estado. O Sertão se destacou com o maior potencial solar, com média anual de 6,5 kWh/m<sup>2</sup>.d. O estudo demonstrou a eficácia do WRF-Solar no mapeamento do potencial solar e na análise dos impactos de eventos climáticos extremos, auxiliando no planejamento e expansão da energia fotovoltaica em Alagoas.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica, Irradiação solar, Modelagem climática.

## Solarimetric mapping of the state of Alagoas during years of extreme precipitation events using the WRF-Solar model

### ABSTRACT

Solar energy is a strategic solution for the planning of photovoltaic systems and is essential for achieving global sustainability goals. In Alagoas, despite its high solar potential, extreme climate events such as heavy rains and prolonged droughts challenge renewable energy generation. This study assessed the effectiveness of the WRF-Solar model in estimating the solar potential of the state, focusing on years with extreme precipitation events. Data from the WRF-Solar model (version 4.6.0, 5 km resolution) for the period of 2022 to 2023, covering the Alagoas region, were analyzed. The model validation was performed quantitatively with radiation data from INMET and qualitatively with rainfall data from MERGE. The model, with adjustments optimized to simulate solar irradiance (including interaction with aerosols and hybrid clouds), showed greater accuracy in representing the spatial and temporal variability of solar radiation. Statistical metrics revealed  $r$  values of 0.74, 0.80, and 0.86 for the Litoral, Agreste, and Sertão regions, respectively, with RMSE values of 207.77 W/m<sup>2</sup>, 197.73 W/m<sup>2</sup>, and 181.33 W/m<sup>2</sup>. During the La Niña event of 2022, there was an average reduction of 15% in solar irradiance across the state. The Sertão region stood out with the highest solar potential, with an annual

average of 6.5 kWh/m<sup>2</sup>.d. The study demonstrated the effectiveness of WRF-Solar in mapping solar potential and analyzing the impacts of extreme climate events, aiding in the planning and expansion of photovoltaic energy in Alagoas. Keywords: Photovoltaic energy, Solar irradiation, Climate modeling.

## Introdução

A crescente demanda por fontes de energia renováveis, aliada à busca por maior sustentabilidade no setor energético, tem intensificado os estudos sobre o potencial solar em diversas regiões do mundo. A energia solar é considerada uma das soluções mais promissoras para atender às metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa, tendo apresentado crescimento significativo nos últimos anos (REN21, 2021).

Em particular, o Nordeste do Brasil tem recebido atenção crescente devido ao seu elevado potencial solar. Estudos recentes indicam que o modelo WRF-Solar uma versão especializada do modelo WRF para simulação de radiação solar tem sido avaliado em cenários reais da região, com foco no desempenho em diferentes horizontes de previsão. Estudo realizado por Lima *et al.* (2025) compararam a qualidade das previsões de irradiância global horizontal (GHI) de modelos GFS-MOS e WRF-Solar em estações meteorológicas do Nordeste, destacando o desempenho comparado desses modelos para horizontes de curto e médio prazo.

Outros estudos têm modelado a radiação solar global com abordagens estatísticas. De Souza *et al.* (2025) aplicaram distribuições estatísticas como Weibull, GEV e log-normal aos dados de radiação solar global de seis cidades de Alagoas, em séries horárias entre 2008 e 2016, para avaliar qual PDF melhor se ajusta aos dados reais.

Adicionalmente, trends de radiação solar de superfície no Norte e Nordeste do Brasil foram analisados por Ferreira Correa *et al.* (2024), que documentaram um forte *dimming*, ou atenuação da radiação solar, decorrente de aumento da absorção atmosférica (e.g. aerossóis) e maior cobertura de nuvens.

No campo da modelagem por WRF-Solar, Amorim *et al.* (2024) avaliaram o desempenho do modelo WRF-Solar (versão 4.3.1) para estimar a irradiância global horizontal (GHI) no estado do Amapá. Comparando com dados observacionais de estações do INMET, verificaram que o uso do algoritmo FARMS reduziu o RMSE relativo de GHI em períodos específicos — por exemplo, de 26 % para 16 % no inverno (JJA) e de 17 % para 12 % na primavera austral (SON). Isso evidencia a eficácia da versão WRF-Solar aliada a específicas parametrizações (FARMS) em estimativas de GHI

mais precisas. De forma complementar, Herdies *et al.* (2025), utilizaram dados de reanálise atmosférica (MERRA-2), avaliando a influência de aerossóis e nebulosidade sobre estimativas de irradiância solar no Brasil. O estudo evidenciou que os dados de reanálise — considerando os efeitos atmosféricos — podem representar bem as ciclagens diurnas da irradiância solar em estações do INMET, ainda que com algum viés.

Apesar dessas contribuições, a resposta do WRF-Solar a cenários extremos de precipitação em Alagoas especialmente em anos com chuvas atípicas, intensas ou prolongadas permanece pouco explorada. Em anos com regimes pluviométricos rigorosos, a atenuação da radiação solar impacta diretamente a geração fotovoltaica. Campos e Alcântara (2016), em estudo para Belém/PA, já destacavam a relação inversa entre precipitação e insolação.

Alagoas apresenta elevada insolação anual e regime de precipitação altamente variável (Reboita *et al.*, 2010; da Silva *et al.*, 2019), sendo estratégico para projetos solares. Eventos extremos, associados a sistemas como vórtices ciclônicos de altos níveis, frentes frias e ondas de leste, podem afetar significativamente a irradiância e a eficiência de sistemas fotovoltaicos (Gomes *et al.*, 2019; Reis *et al.*, 2021).

Assim, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo WRF-Solar na estimativa do potencial solarimétrico no estado de Alagoas durante anos com ocorrência de eventos extremos de precipitação.

## Material e métodos

### *Área de Estudo*

O estado de Alagoas está localizado na região Nordeste do Brasil (Figura 1), abrangendo uma área de aproximadamente 27.800 km<sup>2</sup> (IBGE, 2024). Apresenta clima tropical com duas estações bem definidas: uma chuvosa, entre abril e agosto, e outra seca, de setembro a março. O litoral possui elevada umidade e temperaturas médias anuais de 25 °C, enquanto o sertão apresenta condições semiáridas, com maior variabilidade térmica e baixos índices pluviométricos (Andreoli & Kayano, 2006). Eventos extremos de precipitação têm impacto significativo sobre a disponibilidade de energia solar, especialmente em anos marcados

por anomalias climáticas associadas ao aquecimento global e às mudanças nos padrões atmosféricos (IPCC, 2021).

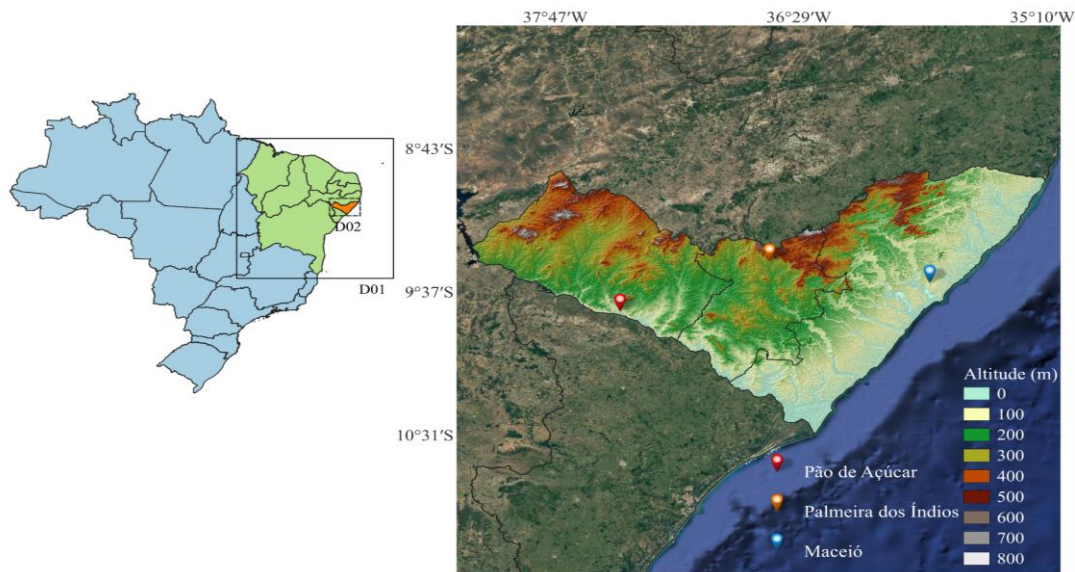


Figura 1. Localização da área de estudo, em destaque Estado de Alagoas, as estações meteorológicas demarcadas por pontos. Juntamente com a configuração de grade usada para simulações do WRF-Solar: Domínio 1 apresentando resolução horizontal de 20 km e domínios 2, com resolução de 5 km.

**Descrição do modelo utilizado**

O modelo *Weather Research and Forecasting – Solar* (WRF-Solar) é uma extensão do WRF para aplicações de previsão e estimativa de recursos solares, incorporando parametrizações físicas específicas para radiação e interação com nuvens. Para este estudo, foi utilizada a versão 4.6.0 do WRF-Solar, configurada em domínio

aninhado duplo d01 e d02, conforme demonstrado na Figura 1, com resolução espacial de 20 km e 05 km, respectivamente. As parametrizações físicas selecionadas estão descritas na Tabela 1.

Para as simulações do WRF-Solar foram realizadas rodadas diárias com duração de 24 horas (para cada dia) entre o período de 01/01/2022 – 29/12/2023.

**Tabela 1.** Esquemas das configurações e parametrizações utilizados no WRF-Solar.

Parâmetros	Esquemas
Microfísica	WSM 6-class graupel (Hong et al., 2006)
Cumulus	Grell-Freitas ensemble (Grell et al., 2014)
Radiação de ondas curtas	RRTMG (Iacono et al., 2008)
Radiação de ondas longas	RRTMG (Iacono et al., 2008)
Camada Limite Superficial	Monin-Obukhov (Monin e Obukhov, 1954)
Camada Limite Planetária	Mellor-Yamada-Janjic TKE (Janjic, 1994)
Modelo de Superfície Terrestre	Unified Noah Land Surface Model (Tewari, M., et al., 2004)
Entrada de aerossol para radiação	J. A. Ruiz-Arias (Ruiz-Arias et al., 2014)
Nuvens de subgrade	Deng (Deng, A., N. L. Seaman, and J. S. Kain, 2003)

Os esquemas físicos de parametrização foram cuidadosamente selecionados com base nas orientações do Manual do Usuário do WRF-Solar. A fim de avaliar a influência das diferentes configurações físicas na previsão da radiação solar, foram conduzidos testes físicos de sensibilidade, nos quais os esquemas de cúmulos e microfísica foram sistematicamente modificados. As simulações resultantes foram comparadas com dados observacionais para identificar a configuração que proporcionou as melhores estimativas de radiação solar.

Após a simulação, os dados foram processados em Python, para manipulação, análise e visualização gráfica, respectivamente. Este procedimento permitiu a extração de informações relevantes sobre a distribuição espacial e temporal das variáveis de interesse.

Em particular, os dados de radiação passaram por um tratamento específico para mitigar erros associados à dispersão atmosférica em baixos ângulos solares, com a aplicação de um limiar de 5 graus no ângulo de elevação solar (Mayer *et al.*, 2023). Este limiar considera apenas a radiação solar proveniente de ângulos de elevação superiores a 5 graus, minimizando a influência da dispersão e absorção atmosférica, que são mais pronunciadas em baixos ângulos, especialmente em condições de céu limpo (Tabela 2).

A correção é relevante pois, em baixos ângulos, o maior caminho óptico da radiação através da atmosfera aumenta a probabilidade de espalhamento e absorção, afetando a estimativa da radiação que atinge a superfície.

**Tabela 2.** Filtro para dados de Irradiância Solar com base no ângulo zenital.

Descrição do Filtro	Ângulo Zenital (Z)	Ângulo de Elevação Solar (elevS)	Condição
Sol próximo ao horizonte	$Z \geq 85^\circ$	$\text{elevS} \leq 5^\circ$	Excluir
Sol com ângulo mais elevado	$Z < 85^\circ$	$\text{elevS} > 5^\circ$	Manter

### Dados e instrumentação utilizada

Os dados observacionais foram coletados a partir da rede de estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), abrangendo séries horárias de radiação solar global, precipitação acumulada e demais variáveis psicrométricas. Simultaneamente, as saídas do modelo WRF-Solar foram extraídas por meio de interpolação para as coordenadas geográficas das estações de Maceió (A303), Palmeira dos Índios (A327) e Pão de Açúcar (A323).

Complementarmente, foram processados produtos de reflectância e brilho do satélite GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) para a caracterização e monitoramento da dinâmica de nebulosidade na região.

### Avaliação estatísticas

Inicialmente, as séries temporais foram convertidas para o horário local de Alagoas (UTC-3) e, posteriormente, filtradas para remover valores nulos ou inconsistentes. Os dados do WRF-Solar foram reamostrados para o mesmo intervalo temporal das observações, garantindo alinhamento um a um. Para assegurar a confiabilidade das métricas estatísticas, realizou-se uma qualificação dos dados, visando identificar e corrigir

inconsistências e falhas nos dados, como valores atípicos (*outliers*). Este processo foi crucial para garantir a integridade dos dados e a precisão das análises subsequentes.

A identificação de outliers baseou-se no critério de três desvios padrão ( $3\sigma$ ), um método estatístico comum que pressupõe a distribuição normal dos dados. Calculou-se a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) para definir os limites superior ( $\mu + 3\sigma$ ) e inferior ( $\mu - 3\sigma$ ).

Valores fora desse intervalo foram classificados como outliers e descartados. A análise inicial revelou valores inconsistentes, como medições extremas que sugerem falhas no equipamento ou erros de registro. Dados evidentemente errôneos foram removidos. *Outliers* potencialmente válidos, porém raros, foram investigados mais a fundo para determinar o tratamento adequado. Em alguns casos, esses outliers foram substituídos por valores representativos, como a média ou a mediana.

Após o processamento, registrou-se o número e a proporção de dados descartados, avaliando o impacto da qualificação. Essa etapa foi fundamental para minimizar distorções e garantir que as análises estatísticas fossem realizadas com

dados confiáveis e representativos, evitando conclusões equivocadas.

Estudos mostram as variedades de métricas estatísticas para investigar se os resultados modelados são compatíveis com os observados. A utilização desses indicadores pode ser consultada em Lima (2025). Nesse modo, no presente trabalho utilizou-se as seguintes métricas: A Raiz do erro quadrático médio (REQM) para quantificar a magnitude dos desvios; O Erro Médio Absoluto (EMA) para verificar a distância absoluta entre o valor observado e o previsto; O Viés para indicar tendência de superestimativa ou subestimativa e o Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) que é um parâmetro estatístico que expressa a intensidade que as amostras estão relacionadas.

Para fins descritivos, Devore (2009) relaciona como forte  $r \geq 0,8$ , moderada se  $0,5 < r < 0,8$  e fraca se  $r \leq 0,5$ . O coeficiente de correlação de Pearson é definido como:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \underline{x}_i) \cdot (y_i - \underline{y}_i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \underline{x}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \underline{y}_i)^2}} \quad (4)$$

Sendo  $y$  o valor observado e  $\underline{y}_i$  valor médio observado nas estações meteorológicas;  $x$  o valor simulado e  $\underline{x}_i$  valor médio simulado pelo WRF;  $\sigma$  é o desvio; e  $n$  o número total de observações.

## Resultados e discussão

A variabilidade climática no Nordeste do Brasil (NEB) é amplamente influenciada pelos fenômenos El Niño e La Niña. Estudos recentes confirmam que esses eventos continuam a afetar significativamente os padrões de precipitação na região.

Azevedo et al. (2024) destacam que o NEB sofre impactos severos tanto durante as fases positivas (El Niño) quanto negativas (La Niña) do ENOS. Esses fenômenos estão frequentemente associados a alterações nos padrões pluviométricos, com El Niño geralmente resultando em secas mais intensas e La Niña em chuvas mais frequentes e intensas.

A análise da série histórica do Índice Oceânico Niño (ONI) revela uma alternância entre períodos de seca e chuva, associados respectivamente aos eventos La Niña e El Niño. Por exemplo, o período entre 2000 e 2006 foi caracterizado por uma frequência considerável de anos chuvosos, com destaque para 2000 (La Niña), 2002 (El Niño), sendo 2004 um ano neutro. Essa tendência contrasta com a década seguinte, que registrou maior incidência de eventos La Niña, como em 2008, 2010 e 2011.

Estudos anteriores, como os de Da Silva (2019), Correia Filho et al. (2019), Reboita, (2021), evidenciam a influência do ENOS na variabilidade climática da região, especialmente no Leste do Nordeste, onde os eventos El Niño e La Niña determinam de forma cíclica, mas não repetitiva, os padrões de precipitação. Além dos ENOS, outros modos de variabilidade climática, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação de Madden-Julian (OMJ), também têm impacto sobre a região.

O modo de variabilidade ENOS, a circulação geral da atmosfera (CGA) e a fisiografia local são responsáveis por influenciar a dinâmica da chuva em Alagoas. Costa et al. (2020) destacam que esses fatores interagem para determinar os padrões pluviométricos na região. Onde a chuva tem maior variação em função da coordenada geográfica longitude do que em função da latitude. Outro fator que influencia os índices baixos no Sertão é a altitude, que age como barreira à circulação da brisa marítima e provoca a diminuição da quantidade de umidade que atinge a região mais interiorana.

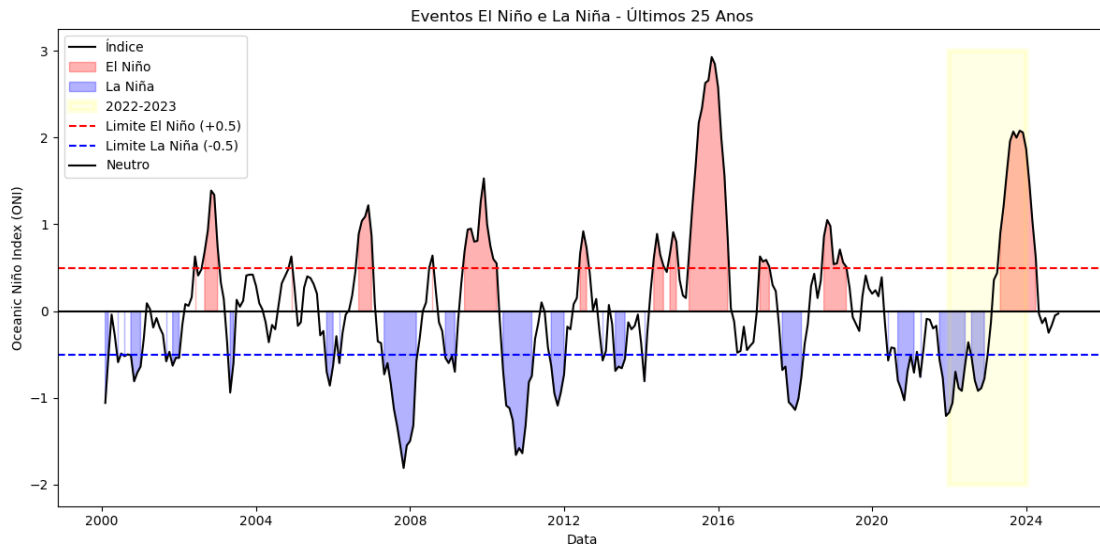


Figura 2. Variação do Índice Ocenânico Niño (ONI) e fases do ENOS nos últimos 25 anos

A presença de nebulosidade, mesmo na ausência de precipitação, pode atenuar a radiação solar incidente na superfície devido à redução da profundidade óptica da atmosfera. A cobertura de nuvens é um dos principais fatores moduladores da radiação solar em regiões tropicais, influenciando a variabilidade diária e sazonal da irradiância (Santos et al. 2022).

A Figura 3 evidencia uma maior quantidade de nuvens na região litorânea em comparação com as áreas mais interioranas do estado. Esse padrão espacial pode ser explicado pela combinação de fatores climáticos e geográficos, como a influência dos ventos alísios, a proximidade com o oceano e a topografia local. Estudos de Silva e Barbosa (2022) indicam que a umidade advectada pelo oceano, associada aos ventos alísios, favorece a formação de nuvens na região costeira de Alagoas. Além disso, a topografia local pode influenciar a formação de nuvens, com áreas de maior altitude apresentando maior cobertura de nuvens devido à elevação orográfica.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também exerce influência significativa sobre o clima de Alagoas, frequentemente transportando pulsos de nebulosidade para o sul,

impactando a radiação solar e os padrões de precipitação. Estudo De Oliveira Júnior et al. (2019) destacam que a ZCIT, ao se deslocar para o sul, pode aumentar a cobertura de nuvens em Alagoas, reduzindo a radiação solar incidente na superfície.

Por outro lado, as áreas mais interioranas do estado apresentam cobertura de nuvens menor, refletindo um clima mais seco e menor frequência de chuvas. A variabilidade da nebulosidade em Alagoas é fortemente modulada pela altitude, distância do litoral e características orográficas locais, como colinas e planaltos que interferem na circulação de ventos e na formação de nuvens. Silva et al. (2023) observaram o maior detalhamento espacial da intensidade do vento, evidenciando o melhor ajuste do escoamento horizontal na atmosfera. Os resultados demonstram uma maior representatividade em áreas acidentadas devido ao refinamento da grade a partir dos parâmetros de estabilidade atmosférica e declividade. Isso revela os efeitos da presença de terrenos complexos, bem como a variação adequada dos comprimentos de rugosidade, os quais, em resoluções espaciais grosseiras, são suavizados e incompatíveis com as características locais (Silva, 2024).

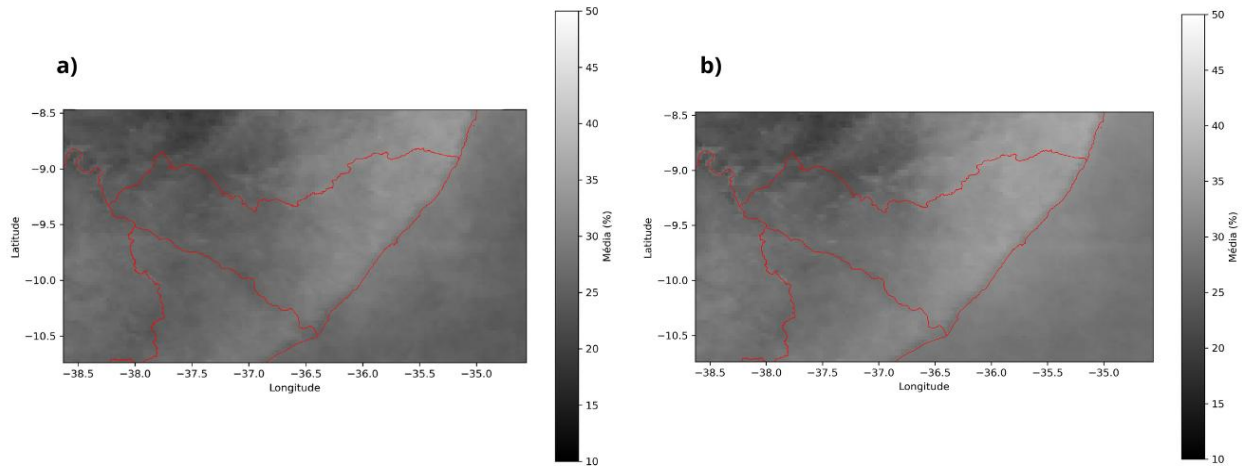


Figure 3. Média anual da nebulosidade para o estado de Alagoas, satélite GOES-16, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b)

Este estudo utilizou o modelo atmosférico WRF-Solar (Jimenez et al., 2016) para realizar um mapeamento detalhado da radiação solar em Alagoas, com o objetivo de identificar as áreas com maior potencial para geração de energia solar. O WRF-Solar foi selecionado devido à sua capacidade de simular a radiação solar com alta resolução espacial e temporal, essencial para capturar variações locais e sazonais da irradiância solar. A partir das simulações para o período de 2020 a 2023, foram gerados mapas de radiação solar, permitindo a análise da distribuição espacial da irradiação no estado. Conforme destacado por Gomes et al. (2019), o mapeamento solarimétrico é fundamental para otimizar o aproveitamento da energia solar.

Para avaliação detalhada, o WRF-Solar foi aplicado a três cidades representando diferentes microclimas em Alagoas: Litoral (Maceió), Agreste (Palmeira dos Índios) e Sertão (Pão de Açúcar). A Tabela 3 apresenta o desempenho do modelo, comparando os dados simulados com os observados pelo INMET.

Os resultados indicam que o WRF-Solar tende a superestimar a radiação solar nas regiões do

Agreste e Sertão, enquanto no Litoral ocorre uma leve subestimação. Especificamente, a diferença média em relação aos dados observacionais foi de  $-13,39 \text{ W/m}^2$  no Litoral,  $29,05 \text{ W/m}^2$  no Agreste e  $57,46 \text{ W/m}^2$  no Sertão. As correlações entre os valores simulados e observados foram elevadas, com  $r$  de 0,74 no Litoral, 0,80 no Agreste e 0,86 no Sertão, indicando uma concordância moderada a forte na variação temporal da radiação solar, de acordo com a classificação de Devore (2009).

As métricas de erro também revelaram variações regionais. O REQM diminuiu progressivamente do Litoral ( $207,77 \text{ W/m}^2$ ) para o Sertão ( $181,33 \text{ W/m}^2$ ), sugerindo maior precisão nas regiões mais interiores. O Viés apresenta  $-13,13 \text{ W/m}^2$  no Litoral,  $29,38 \text{ W/m}^2$  no Agreste e  $57,75 \text{ W/m}^2$  no Sertão, confirmando a tendência de subestimação na região costeira e superestimação nas regiões mais continentais. Esses padrões refletem, provavelmente, a influência da cobertura de nuvens, da orografia e da proximidade com o oceano sobre a radiação solar, reforçando a necessidade de avaliação local detalhada para planejamento de energia solar.

**Tabela 3.** Desempenho da avaliação estatística do WRF-Solar na simulação da Radiação Solar

Região	Quantidade de dados analisados	Percentual de dados rejeitados	$\mu$		$\sigma = 3$		r	REQM	EMA	Viés
			WRF-Solar INMET	INMET	WRF-Solar	INMET				
Litoral (Maceió)	15,996	0,010%	<b>413,86</b>	<b>427,25</b>	<b>292,34</b>	<b>291,58</b>	0,74	<b>207,77</b>	152,13	<b>-13,13</b>
Agreste (Palmeiras dos Índios)	14,242	0,028%	497,98	468,93	329,05	288,36	<b>0,80</b>	<b>197,73</b>	<b>151,72</b>	<b>29,38</b>
Sertão (Pão de Açúcar)	12,909	0,012%	550,04	492,58	337,96	315,13	<b>0,86</b>	<b>181,33</b>	<b>134,80</b>	57,75

As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam a média diária de irradiação solar em Alagoas para os anos de 2022 e 2023, respectivamente. A comparação entre os dois anos revela padrões espaciais semelhantes, com maior incidência de radiação solar no Sertão e menor no litoral e no leste do Agreste. As variações interanuais observadas podem estar associadas a eventos climáticos de grande escala, como o El Niño e La Niña (ENOS), conforme discutido anteriormente.

O ano de 2022, influenciado pela La Niña, apresentou padrão de chuvas mais intenso e prolongado, principalmente em Maceió e Palmeira dos Índios. A maior nebulosidade associada à La Niña contribuiu para a redução da irradiação solar, especialmente nas regiões litorâneas. Em contraste, 2023, sob a influência do El Niño, registrou menores índices pluviométricos, resultando em aumento da irradiação solar, particularmente no Sertão, com valores variando entre aproximadamente 4,5 e 6,9 kWh/m<sup>2</sup>.d.

A distribuição espacial da precipitação em Alagoas é historicamente heterogênea, com maiores volumes no litoral e menores no Sertão. No entanto, em 2022, observou-se um padrão mais homogêneo de precipitação nas três regiões analisadas, indicando uma influência mais ampla da La Niña na região.

Alagoas tem enfrentado eventos climáticos extremos ao longo das últimas décadas, como nos anos de 1988, 1989 e 2010, quando fortes chuvas causaram inundações significativas. De acordo com Cavalcante e Silva (2021), tais eventos provocaram impactos consideráveis em infraestrutura urbana e rural, incluindo desabamentos, interrupção de serviços públicos e deslocamento de populações. O ano de 2022 se destacou como um dos períodos mais chuvosos já registrados no estado, reforçando a influência de fenômenos climáticos de grande escala sobre a variabilidade da radiação solar.

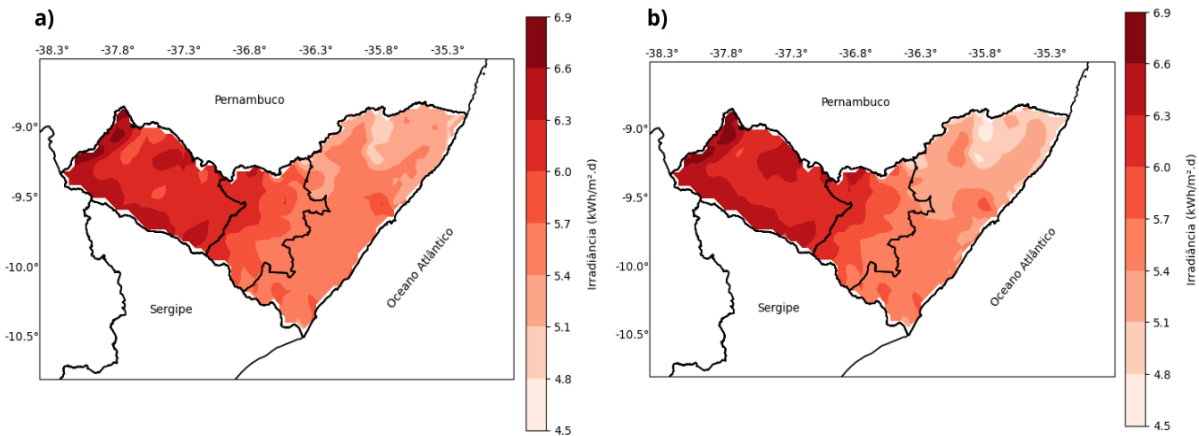


Figura 4. Média da irradiação solar diária em Alagoas para os anos de 2022 (a) e 2023 (b).

A Figura 5 revela pequenas, porém significativas variações espaciais na irradiação solar entre 2022 e 2023. O ano de 2022, marcado por um regime chuvoso excepcional devido à La Niña, apresentou irradiação solar ligeiramente menor, especialmente nas regiões litorâneas e serranas. A maior nebulosidade associada a esse regime, corroborada pela Figura 4, contribuiu para a redução da radiação solar nessas áreas.

Além disso, a profundidade óptica da atmosfera (AOD – Atmospheric Optical Depth), que indica a quantidade de partículas em suspensão no ar, pode ter influenciado a irradiação solar, sobretudo em áreas com maior concentração de poluentes. Fatores adicionais, como a variabilidade da duração do dia ao longo do ano e a atividade solar, também podem ter contribuído para as diferenças observadas.

Ainda com base na Figura 5, observa-se um gradiente espacial na irradiação solar em Alagoas. A região do Sertão apresenta os valores médios mais elevados, próximos a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>.d, enquanto o Agreste e o litoral registram valores em torno de 4,5 a 5,7 kWh/m<sup>2</sup>.d. Esse padrão espacial reflete a influência de fatores geográficos e climáticos, como latitude, proximidade com o oceano e topografia.

A maior incidência solar no Sertão está associada à menor nebulosidade e à menor influência da brisa marítima, como evidenciado na Figura 3. Esse efeito pode ser explicado pela presença do Planalto da Borborema, que atua como barreira topográfica, promovendo a convergência dos ventos alísios de sudeste, resultando em menos chuvas no Sertão (menor nebulosidade) e mais chuvas no litoral alagoano (maior nebulosidade) (Moura et al., 2020).

Os valores de irradiação solar adequados para exploração de energia fotovoltaica variam conforme localização geográfica, condições climáticas e outros fatores ambientais. Em geral, áreas com irradiação solar média anual superior a 4 kWh/m<sup>2</sup>.d são consideradas muito favoráveis para instalação de sistemas fotovoltaicos (SECTI, 2018). Estudos recentes indicam que locais com altos níveis de irradiação solar apresentam maior potencial de geração de energia solar, tornando-se ideais para o uso de tecnologias fotovoltaicas (Santos et al., 2020). No Brasil, o Atlas Brasileiro de Energia Solar fornece dados detalhados sobre os níveis de irradiação mensal em diversas localidades, auxiliando no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de acordo com o potencial solar regional (Pereira et al., 2017).

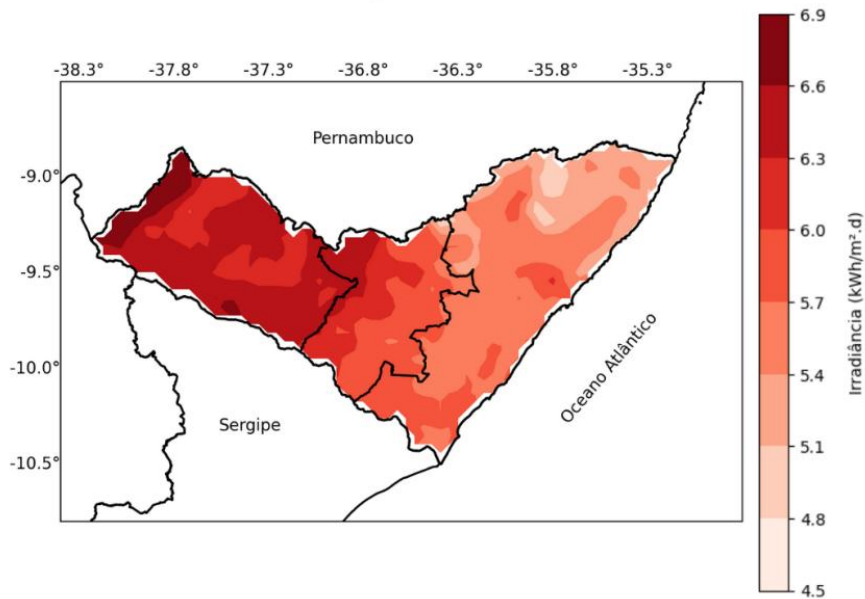


Figura 5. Média da irradiação solar diária em Alagoas para o período de 2022 a 2023

O comportamento sazonal da irradiação solar em Alagoas está presente na Figura 6. Observa-se uma clara variação ao longo do ano, com os maiores valores concentrados no verão (Dezembro a Fevereiro) e os menores no inverno (Junho a Agosto). No verão, a irradiação solar atinge seus picos máximos, com valores superiores a 6,8 kWh/m<sup>2</sup>.d em grande parte do estado, chegando a atingir 7,2 kWh/m<sup>2</sup>.d nas áreas de maior incidência, localizadas principalmente no sertão e uma parte do Agreste. A partir do outono (Março a Maio), a irradiação começa a diminuir gradualmente, com o surgimento de variações regionais mais evidentes. Já para o inverno, a irradiação apresenta os menores valores, com médias em torno de 5,2 kWh/m<sup>2</sup>.d e valores mínimos de 4,0 kWh/m<sup>2</sup>.d em algumas áreas na

região litorânea e Agreste. A variação regional é mais acentuada nesta estação, com diferenças significativas entre as áreas. Na primavera (Setembro a Novembro), a irradiação volta a aumentar, com valores médios em torno de 6,0 kWh/m<sup>2</sup>.d, representando uma transição para o verão.

Este padrão sazonal está diretamente relacionado à inclinação do sol em relação à Terra ao longo do ano e à influência de fatores climáticos regionais, como a nebulosidade. A compreensão deste comportamento sazonal é fundamental para o planejamento e a otimização de sistemas de energia solar em Alagoas, permitindo o dimensionamento adequado das instalações e a previsão da geração de energia ao longo do ano.

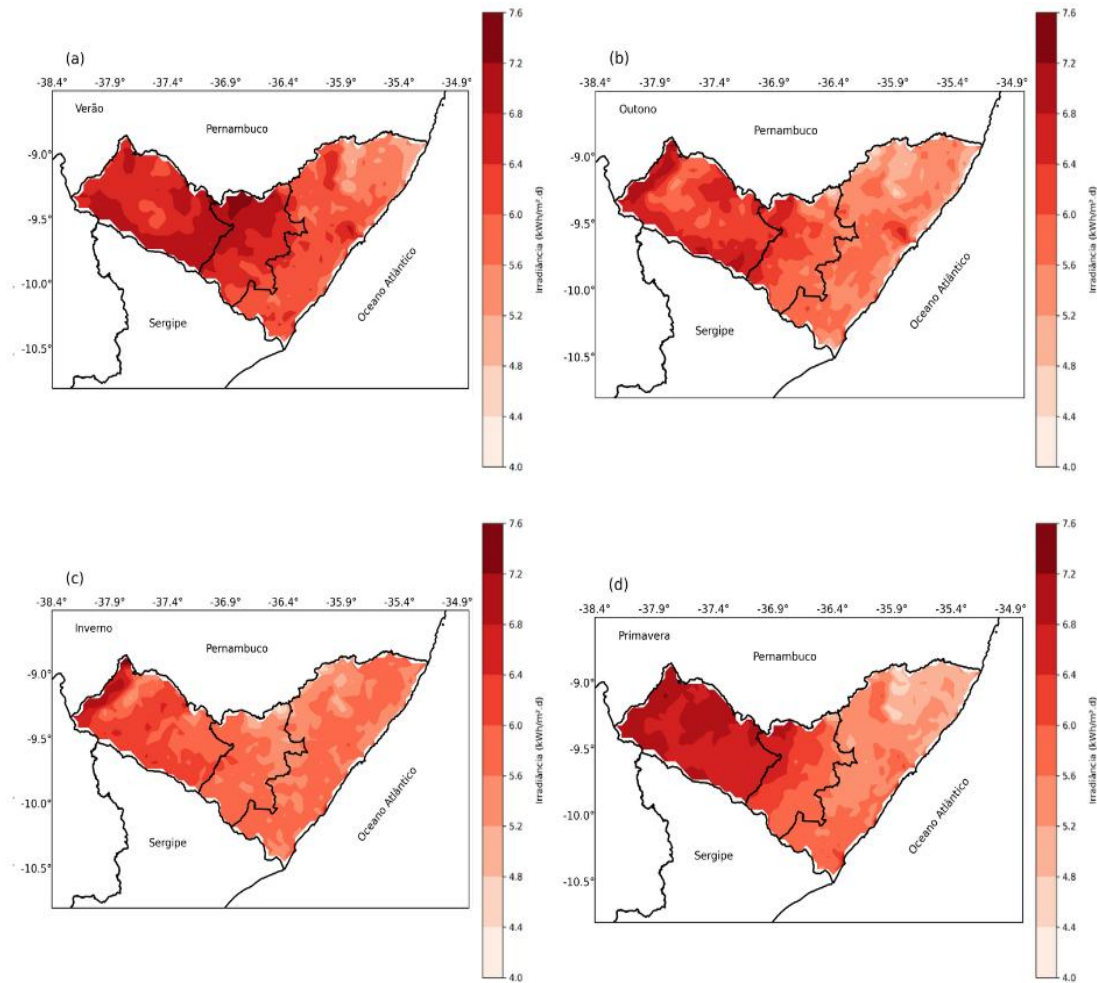


Figura 6. Distribuição espacial da irradiação solar em Alagoas durante as diferentes estações do ano: (a) Verão, (b) Outono, (c) Inverno, (d) Primavera.

## Conclusão

A análise da irradiação solar em Alagoas com o modelo WRF-Solar evidenciou a influência de regimes climáticos, topografia e cobertura de nuvens na distribuição da radiação solar. Eventos de La Niña e El Niño impactaram significativamente a irradiância anual, com 2022 (La Niña) apresentando menor radiação devido à maior nebulosidade e 2023 (El Niño) apresentando maiores índices de radiação.

O WRF-Solar demonstrou boa acurácia, com correlações ( $r$ ) de 0,74 a 0,86, REQM entre 181,33 e 207,77 W/m<sup>2</sup> e viés variando entre -13,12 W/m<sup>2</sup> no litoral e valores positivos no sertão. Apesar de pequenas superestimações, o modelo foi eficiente para mapear padrões espaciais e temporais da irradiância solar.

O estado apresenta alto potencial para energia solar, especialmente no sertão, onde a irradiância média anual supera 6,5

kWh/m<sup>2</sup>.d e atinge picos de 7,2 kWh/m<sup>2</sup>.d no verão. Áreas com irradiância acima de 4 kWh/m<sup>2</sup>.d, como o sertão e parte do agreste, são favoráveis à instalação de sistemas fotovoltaicos. Compreender a variabilidade sazonal e espacial da radiação solar é essencial para o planejamento eficiente de sistemas solares, considerando fatores climáticos, topográficos e ambientais.

## Agradecimentos

Este estudo foi viabilizado graças aos recursos disponibilizados pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a aluna Taiane Alves expressa sua gratidão pela bolsa de pesquisa concedida. Além disso, agradece pelo apoio essencial do Laboratório de Modelagem Atmosférica (LABMODEL) nas pesquisas realizadas.

## Referências

Amorim, A. C. B.; Dantas, V. A.; Reis, J. S.

- dos; Bose, N. de A.; Santos, E. S. de A.; Bezerra, L. A. C.; Matos, M. de F. A. de; Nobre, M. T. C. de M.; Oliveira, L. de L.; Medeiros, A. M. de. (2024). Analysis of WRF-solar in the estimation of global horizontal irradiation in Amapá, northern Brazil. *Renewable Energy*, 235, 121361. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121361>.
- Andreoli, R. V.; Kayano, M. T. (2006). A importância da temperatura da superfície do Atlântico tropical sul na variabilidade de precipitação do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, 1, 1–13.
- Azevedo, M. S.; Brito, E. M. M.; Assis, J. M. O. de; Fontes, A. S. (2024). Análise da correlação entre os fenômenos de El Niño e La Niña e o regime de precipitação da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira/BA. *XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 1.
- Campos, M.S., Alcantara, L.D.S. (2016). Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos; *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31, 4(supl.), 570-579, <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150065>
- Cavalcante, I. B. da S.; Da Silva, D. F. (2021). Período de retorno de eventos extremos em Alagoas e suas causas climáticas. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. e021007. DOI: 10.59824/rmrh.v2i.216. Disponível em: <https://periodicos.meioambiente.mg.gov.br/NM/article/view/216>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- Correia Filho, L.F.; Santiago, D.B.; Oliveira Junior, J.F.; Silva Junior, C.A. (2019). Impact of urban decadal advance on land use and land cover and surface temperature in the city of Maceió, Brazil. *Land Use Pol.* 87, 104026. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104026>.
- Costa, M.S., Oliveira-Júnior, J.F.d., Santos, P.J.d., et al. (2020). Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño–Southern Oscillation. *Int J Climatol.* 1–25. <https://doi.org/10.1002/joc.6835>.
- Da Silva, C.A.; Farias, R.B.; Oliveira, A.A. (2019). Eventos extremos de precipitação na região Nordeste do Brasil: padrões climatológicos e anomalias associadas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, p. 101–119.
- Deng, A.; Gaudet, B.; Dudhia, J.; Alapaty, K. (2014). Implementation and Evaluation of a New Shallow Convection Scheme in WRF. *Anais do 94th American Meteorological Society Meeting, 22nd Conference on Numerical Weather Prediction*, Atlanta, GA.
- De Souza, A., Nunes, R.S.C., Özonur, D. et al. (2025). Statistical modeling of global solar radiation in East and Northeast Brazil. *Arab J Geosci* 18, 150. <https://doi.org/10.1007/s12517-025-12281-0>
- De Oliveira Júnior, A. I., Martins, E. S., da Costa, C. T. F., & Caldas, H. F. M. (2019). Análise da precipitação e determinação de equações de chuvas intensas para o município de Crato-CE situado no semiárido do Brasil. *Revista Geama*, 5(3), 56-65.
- Devore, J. L. (2009). Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. Ferreira Correa, L., Folini, D., Chtirkova, B., and Wild, M. (2024). Trends in observed surface solar radiation and their causes in Brazil in the first 2 decades of the 21st century, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 8797–8819, <https://doi.org/10.5194/acp-24-8797-2024>.
- Grell, G. A.; Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5233–5250, <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>.
- Gomes, H. B.; Ambrizzi, T.; Da Silva, B. F. P.; Hodges, K.; Dias, P. L. S.; Herdies,

- D. L.; Silva, M. C. L. (2019). Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, 51, 1393–1414.
- Herdies, B. R., Vendrasco, E. P., Herdies, D. L., de Oliveira, C. E. L., & de Quadro, M. F. L. (2025). The Use of Atmospheric Reanalysis Data for the Estimation of Solar Irradiation Considering the Effect of Atmospheric Aerosols over Brazil. *Atmosphere*, 16(2), 124. <https://doi.org/10.3390/atmos16020124>
- Hong, S.-Y.; Noh, Y.; Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, v. 134, p. 2318–2341.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Brasil: Divisão territorial do Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- Iacono, Michael J.; Delamere, Jennifer S.; Mlawer, Eli J.; Shephard, Mark W.; Clough, Shepard A.; Collins, William D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 113, n.13. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- Janjic, Z. I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Weather Rev.*, 122(5), pp. 927–945.
- Jimenez, Pedro A. et al. (2016). WRF-Solar: Description and clear-sky assessment of an augmented NWP model for solar power prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 7, 1249-1264.
- Lima, F. J. L.; Santos, T. S. dos; Ramos, D. N. da S.; Weyll, A. L. C.; Jacondino, W. D.; Silva, A. R.; Pereira, L. K. M.; Santos, A. P. P. dos; Melo Filho, J. B.; Carvalho Filho, M. de; Santos, A. Á. B.; Moreira, D. M. (2025). Evaluation of the short and medium-term forecast quality of global solar irradiance from GFS-MOS and WRF-Solar models for the northeast region of Brazil. *Energy Reports*, 13, 2187-2203.
- Mayer, M. J., Yang, D., Szintai, B. (2023). Comparing global and regional downscaled NWP models for irradiance and photovoltaic power forecasting: ECMWF versus AROME. *Applied Energy*, 352, 121958. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121958>.
- Moura, G. B. D. A.; Brito, J. I. B.; Sousa, F. A. S.; Cavalcanti, E. P.; Silva, J. L. B.; Nascimento, C. R.; Lopes, M. O. (2020). Identificação de Preditores Para as Chuvas do Setor Leste do Nordeste do Brasil Utilizando Análise de Correlação Canônica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 4, 1463.
- Monin, A. S.; Obukhov, A. M. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, n. 151, p. 163–187.
- Oliveira Silva, L. S. de, Silva Junior, R. S. da, Lyra, R. F. da F., Martins, F. R., Moura, M. A. L., Leal Junior, J. B. V., Vasconcelos, L. do N. (2024). Avaliação da complementaridade entre os recursos eólico-solar e considerações sobre estabilidade no setor elétrico. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(3), 1942–1960. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.3.p1942-1960>
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. (2017). Atlas brasileiro de energia solar. 2, 80.
- Reis, J. A.; Andrade, K. S.; Ferreira, J. T.

- (2021). Vórtices ciclônicos de altos níveis e sua influência na precipitação do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 2, 225–238.
- Reboita, M. S.; Gan, M. A.; Rocha, R. P.; Ambrizzi, T. (2010). Regimes de precipitação da América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 185–204.
- Reboita, M. S., Oliveira, K. R.; Corrêa, P. Y. C.; Rodrigues, R. (2021). Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.14, n.02, p. 729-742.
- Ren21. Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2021. Disponível em: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. Acesso em: 7 nov. 2024.
- Ruiz-Arias, José A.; Dudhia, Jimmy; Gueymard, Christian A. (2014). A simple parameterization of the short-wave aerosol optical properties for surface direct and diffuse irradiances assessment in a numerical weather model. *Geoscientific Model Development*, 7, 3, 1159-1174.
- Santos, P. R. de A.; Medeiros, S. E. L.; Silva, L. P. da; Abrahão, R. (2024). Projeções de radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil através de um conjunto de modelos climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 39, e39240036. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863910036>.
- Santos, J. A.; Silva, R. C.; Oliveira, P. L. (2020). Irradiância solar e seu potencial para geração de energia fotovoltaica. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, 9, 3, 45-60.
- Secti. (2018). Atlas solar: Bahia
- Silva, L. S. de O., Silva Junior, R. S. da, Lyra, R. F. da F., Martins, F. R., Moura, M. A. L., Leal Junior, J. B. V., & Cardoso, K. R. A. (2023). Avaliação de métodos para atualização do mapeamento eólico do Estado de Alagoas. *Research, Society and Development*, 12(2). <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.40053>
- Silva, M. F. da ; Barbosa, R. V. R. (2022). Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. *Revista Brasileira De Climatologia*, 31(18), 509–538. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15606>
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., Lemone, M. A., Mitchell, K., EK, M., Gayano, G., Wegiel, J., Cuenca, R. H. (2004). Implementation and Verification of the Unified Noah Land Surface Model in the WRF Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 2165–2170.