



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Ciências - Bauru



GABRIEL RIBEIRO ANFRISIO DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR NO ESTADO DE
SÃO PAULO E PREVISÕES FUTURAS.**

BAURU – SP
NOVEMBRO - 2025

GABRIEL RIBEIRO ANFRISIO DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR NO ESTADO DE
SÃO PAULO E PREVISÕES FUTURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”- Unesp, Câmpus de
Bauru, para obtenção do título de
Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Demerval Soares
Moreira

Bauru - SP
Novembro – 2025

GABRIEL RIBEIRO ANFRISIO DOS SANTOS

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR NO ESTADO DE
SÃO PAULO E PREVISÕES FUTURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” - Unesp, Câmpus de
Bauru, para obtenção do título de
Bacharel em Meteorologia, sob
orientação do Prof. Dr. Demerval Soares
Moreira.

Bauru, 13 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Profº. Drº. Demerval Soares Moreira

Profº. Drº. Helber Custódio de Freitas

Profº. Drº. Luiz Felipe Gozzo

S237a Santos, Gabriel Ribeiro Anfrísio
Análise da variação do fluxo de radiação solar no estado de são paulo e previsões futuras. / Gabriel Ribeiro Anfrísio Santos. -- , 2025
35 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências, Bauru,
Orientador: Demerval Soares Moreira

1. Radiação solar. 2. Geração de energia fotovoltaica. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de inicialmente agradecer meu orientador Demerval Moreira que tornou esse projeto possível.

Gostaria de agradecer minha namorada Camila Moreira que me deu suporte e me incentivou durante minha jornada.

Aos meus pais, Andrea Pinheiro e Gilberto Soliman, pelo suporte incondicional e por tornarem possível minha permanência e estruturação na cidade durante a graduação.

À minha avó, Adenilce Pinheiro, e aos meus tios André Pinheiro e Marcelo Ribeiro pelo carinho, incentivo e apoio em toda a minha trajetória.

Aos meus irmãos: Alanis Anfrísio, Morgana Anfrísio, Izabela Anfrísio e Aquiles Soliman, pela cumplicidade e apoio.

Aos amigos do ensino médio: Guilherme Matias, Marcos André, Vinicius Meira, Gabriel Alvez, João Victor, Natan Dourado, entre outros, pela amizade que permanece até hoje.

Aos amigos da faculdade: Rafael Santana, Pedro Miguel, Bianca Monteiro, Linda Muzareli, Caio Teixeira, Gustavo Maedo e Guilherme Lopes, pelos momentos de descontração e apoio acadêmico.

Aos amigos do trabalho: Jonathan Martins, Caroline Esteves, Sarah de Souza, Elias Rosa, Isabelle Corrêa de Souza, ao chefe Carlos e a todos os funcionários do Bistrô Villa Graziela, pelo apoio e flexibilidade.

À equipe do atletismo da UNESP de Bauru, pelo incentivo ao esporte e pela convivência saudável durante a graduação.

Aos moradores do Jardim Colonial que foram meus clientes e, com o tempo, tornaram-se amigos, agradeço pela confiança, pelo apoio e pelos momentos de descontração que tanto enriqueceram minha experiência durante os anos em Bauru.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

Este projeto teve como intuito analisar a variabilidade espaço-temporal do fluxo de radiação solar para o estado de São Paulo, projetar o cenário para os próximos 10 anos com foco na geração de energia solar. Para o estudo foram utilizados dados de 41 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) espalhadas pelo estado, dados de reanálise ERA5 do ECMWF e de projeção climática do modelo climático HadGEM3-GC31-LL de cenário RCP 4.5, com as delimitações do Estado de São Paulo como um todo e para regiões específicas, no caso para a faixa costeira e região mais continental (interior). A análise comparou os dados de estações meteorológicas com dados de reanálise para averiguar a representação do modelo frente ao observado durante o período de 2013 a 2022. Já os dados de projeção foram comparados junto aos dados de reanálise após a validação da representação do modelo. O estudo apontou um aumento da radiação nas regiões continental e costeira, que por consequência, indicou um aumento médio anual de geração solar de aproximadamente 50 kWh/ano. O modelo HadGEM3-GC31-LL manteve consistência nos dados, mas apresentou uma certa superestimação em comparação aos dados de reanálise. De forma geral, o estudo indica que não haverá mudanças expressivas no potencial de geração de energia solar para a próxima década, reforçando a viabilidade de investimentos nesta fonte de energia para o Estado de São Paulo, tanto nas regiões continentais, quanto na região costeira.

Palavras-chave: Radiação solar; Energia solar; Projeções climáticas; São Paulo.

ABSTRACT

This project aimed to analyze the spatiotemporal variability of solar radiation flux and cloud cover patterns in the State of São Paulo and to project the scenario for the next 10 years with a focus on solar energy generation. The study used data from 41 meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET) spread across the state, ERA5 reanalysis data from the ECMWF, and climate projections from the HadGEM3-GC31-LL climate model for scenario RCP 4.5, with the boundaries of the State of São Paulo as a whole and for specific regions, in this case for the coastal strip and more continental (inland) region. The analysis compared data from weather stations with reanalysis data to verify the model's representation against observations during the period from 2013 to 2022, while the projection data was compared with the reanalysis data after validation of the model's representation. The study pointed to an increase in radiation in the continental and coastal regions, which consequently shows a subtle reduction in cloud cover. The HadGEM3-GC31-LL model maintained consistency in the data, but showed a certain overestimation compared to the reanalysis data. In general, the study indicates that there will be no significant changes in solar energy generation potential for the next decade, reinforcing the viability of investments in this energy source for the State of São Paulo, both in regions further away from the coast and in the coastal region.

Keywords: Solar radiation; Solar energy; Climate projections; São Paulo.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CMIP 6	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 6</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MME	Ministério de Minas e Energia
RSDS	<i>Surface Downwelling Shortwave Radiation</i>
SSRD	<i>Surface short-wave (solar) radiation downwards</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Potencial de geração de energia solar fotovoltaica e rendimento energético anual no Brasil.	12
Figura 2: Potencial de energia solar para o Estado de São Paulo.	13
Figura 3: Delimitação da região continental e costeira	17
Figura 4: Média da radiação de onda curta descendente. Dados de reanálise e de observações das estações do INMET localizadas no Estado de São Paulo.	18
Figura 5: Média mensal de 2013 a 2022 da radiação de onda curta incidente observada nas estações do INMET e da reanálise ERA5.	19
Figura 6: Média da radiação de onda curta descendente nos pontos de grade do modelo de projeção HadGEM3-GC31-LL e da reanálise ERA5 delimitados ao Estado de São Paulo.	21
Figura 7: Gráfico de dispersão entre dados de reanálise e projeção.	22
Figura 8: Média da radiação de onda curta descendente nos pontos de grade da reanálise ERA5 e da projeção HadGEM3-GC31-LL delimitados à região continental do Estado de São Paulo.	24
Figura 9: Média da radiação de onda curta descendente nos pontos de grade da reanálise ERA5 e da projeção HadGEM3-GC31-LL delimitados à região costeira do Estado de São Paulo.	25
Figura 10: Comparação da média da radiação de onda curta descendente entre as regiões costeira e continental em pontos de grade da projeção HadGEM3-GC31-LL.	26
Figura 11: Comparação da média da radiação de onda curta descendente entre as regiões costeira e continental em pontos de grade da reanálise ERA5.	27
Figura 12: Gráfico de dispersão entre os dados de reanálise e projeção para a região continental.	28
Figura 13: Gráfico de dispersão entre os dados de reanálise e projeção para a região costeira.	29
Figura 14: Potencial de geração de energia solar médio anual.	30
Figura 15: Projeção do potencial de geração de energia solar anual.	31

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Potencial anual de geração de energia solar_____	13
Equação 2: Conversão de Kj/M^2 para W/M^2 _____	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estações meteorológicas do INMET_____	16
---	----

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT	5
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	7
LISTA DE EQUAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS.....	8
SUMÁRIO.....	9
1. INTRODUÇÃO	10
1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2. OBJETIVO	14
3. METODOLOGIA APLICADA	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 Análise para o Estado de São Paulo como um todo	18
4.1.1 Dados observados e dados de reanálise	18
4.1.2 Dados de reanálise e de projeção	20
4.2 Análise comparativa entre as regiões continental e costeira.....	23
4.3 Implicações para energia solar.....	30
5. CONCLUSÃO.....	32
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

O Estado de São Paulo, localizado na região Sudeste do Brasil, apresenta diversos tipos de climas de acordo com a classificação de Köppen (1900), que foi simplificada para o Estado de São Paulo por Setzer (1966). As classificações definidas para o estado por Alvarez (2013) são: Af, Aw, Am, Cwa, Cwb, Cfa e Cfb.

Os principais fatores climáticos que influenciam o clima são a maritimidade e continentalidade na condição do clima litorâneo definido como Af e do interior do estado Aw, como também os climas Cwa e Cwb que são definidos pela altitude elevada como é descrito por Vilela (2010) e Rolim e Camargo (2007).

Com o advento da emergência climática, determinadas regiões sofreram alterações significativas nos seus regimes de precipitação, nebulosidade e por consequência, os padrões de radiação de acordo com Cabral e Fontenele (2025) e Blain, Sobierajski e Martins (2023).

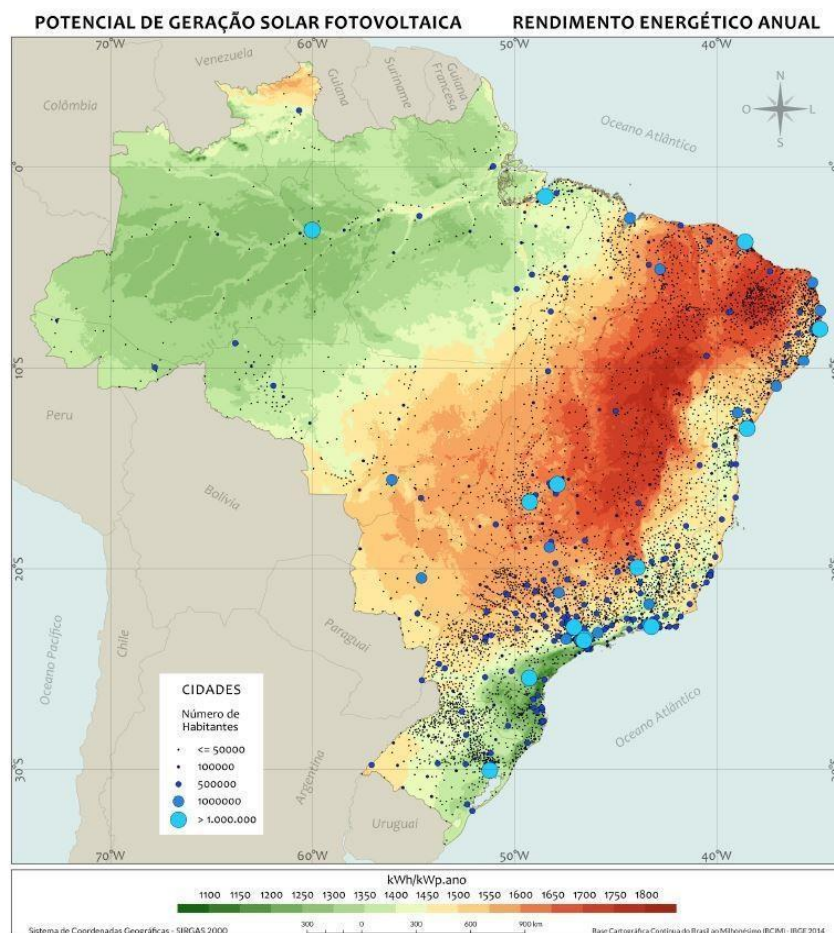
O Brasil possui grande parte de sua matriz energética com base na geração hidráulica, uma fonte sustentável, com grande capacidade de geração e eficiência. No entanto, períodos de seca e estiagem podem acabar impactando a geração de energia elétrica, sendo necessário a ativação de termelétricas que possuem baixa eficiência, elevado custo e são nocivas para o meio ambiente na maior parte dos casos.

Além disso, há possibilidade de ocorrer escassez de recursos energéticos em conjunto, o que diminui a segurança da autossuficiência de geração elétrica no país (Miguel, 2021). Essas flutuações energéticas estão diretamente associadas à variabilidade climática, reforçando a importância de estudos meteorológicos voltados ao recurso solar.

O Brasil, por se tratar de um país predominantemente tropical, apresenta um elevado potencial de geração de energia solar. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2025), a maior parte do potencial fotovoltaico está localizado nas regiões nordeste, sudeste e centro-oeste do país. Essa capacidade vem sendo explorada com um acelerado crescimento de instalações dos sistemas fotoelétricos.

Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Pereira *et al*, 2017), o potencial médio anual de geração de energia no Estado de São Paulo varia entre 4,5 e 5,5 kWh/m²/dia (Figura 1), valores compatíveis com regiões de alto rendimento fotovoltaico.

Figura 1: Potencial de geração de energia solar fotovoltaica e rendimento energético anual no Brasil.

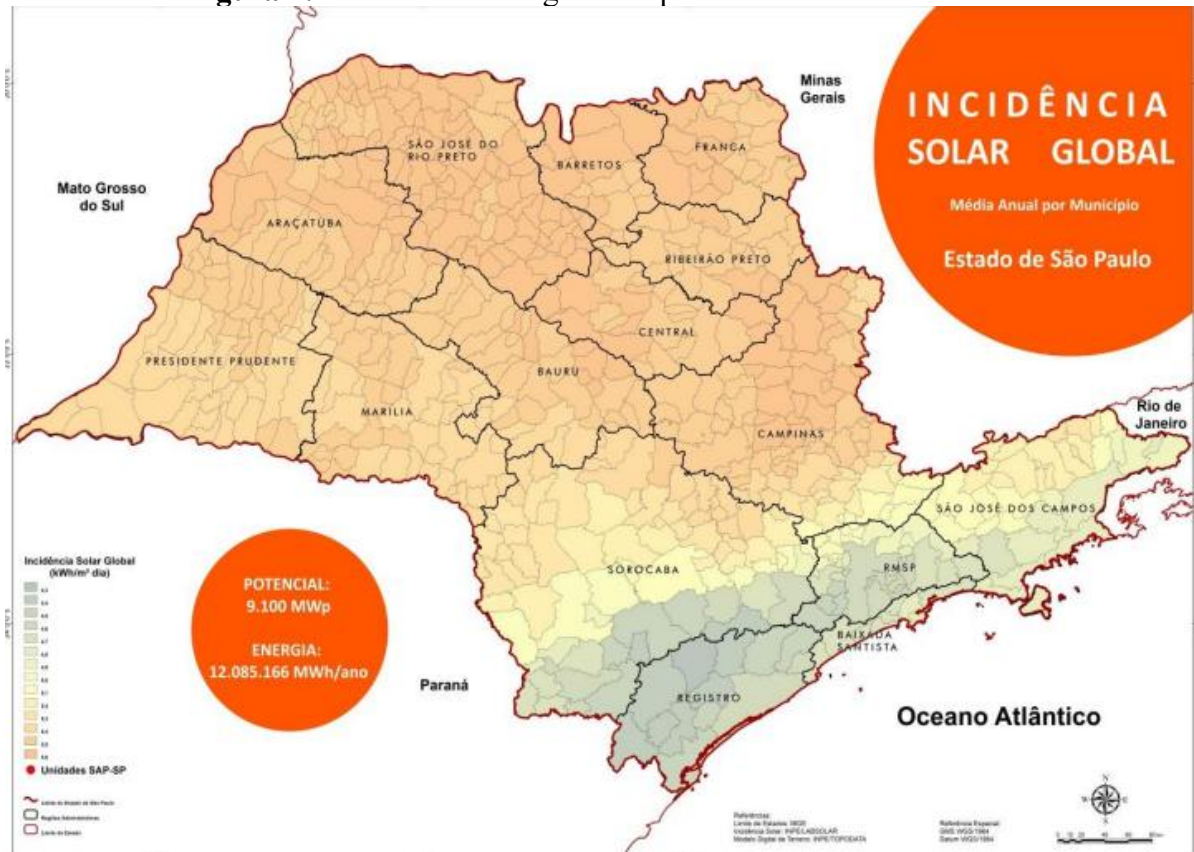


Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira, 2017).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) (2023), no ano de 2023 houve um crescimento de cerca de 3 GWs no potencial de geração de energia solar o que representa aproximadamente 5,25 TWh, cerca de 43,9% do incremento total da capacidade instalada no Brasil, sendo um setor com crescimento significativo e com tendência de aumento no decorrer da década.

De acordo com a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL) do Estado de São Paulo (2025), entre os anos de 2022 e 2023, a geração de energia fotovoltaica dobrou no Estado, indo de 4,5 TWh para 9 TWh. A Subsecretaria de Energias Renováveis do Estado realizou um estudo que indica as regiões com maior potencial de energia solar do Estado (SEMIL, 2025).

Figura 2: Potencial de energia solar para o estado de São Paulo.



Fonte: Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL, 2025).

Este crescimento acelerado da geração solar evidência a confiança no setor e a importância da energia solar para a segurança energética nacional, além de ser um importante meio de diversificação da matriz energética. No entanto, um fator crítico para o planejamento e a eficiência desses investimentos é a compreensão da variabilidade do recurso solar.

O potencial de geração de energia fotovoltaica é intrinsecamente ligado à radiação solar que efetivamente atinge a superfície, um parâmetro profundamente influenciado pela dinâmica atmosférica, em especial pelo padrão de nebulosidade. Considerando que as mudanças climáticas globais projetam alterações nos regimes de precipitação e cobertura de nuvens para o Estado de São Paulo, é plausível esperar que o fluxo de radiação solar também venha a sofrer modificações.

Portanto, a correta estimativa da radiação solar na superfície torna-se crucial. Dessa forma, torna-se estratégico e necessário investigar não apenas o potencial solar atual, mas também sua variação temporal e tendências futuras. De acordo com um estudo presente no Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira, 2017), a tendência geral para a radiação solar incidente é de aumento nas regiões Sudeste e Centro-Oeste e de redução do potencial solar para o Sul do país, como foi concluído por Lima *et al.*(2024). Como mencionado, o Estado de São Paulo apresenta uma diversidade climática, sendo necessário um estudo mais aprofundado da região.

Após analisar o Estado de São Paulo como um todo, é importante realizar uma abordagem que diferencia os padrões do interior do Estado da faixa costeira, pois a geografia das áreas litorâneas se difere em muitos aspectos das demais regiões do Estado, tanto em sua altitude, quanto em outros aspectos meteorológicos, como temperatura e umidade.

1.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos físicos e metodológicos fundamentais para a compreensão deste trabalho, abordando parâmetros de radiação solar, da conversão fotovoltaica, da eficiência dos painéis solares e da conversão de energia fotovoltaica.

O sol fornece anualmente cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia para a atmosfera terrestre, o que corresponde a cerca de 10.000 vezes o consumo mundial durante o mesmo período (Vilela, 2010).

A geração de energia solar, em sua grande maioria, é produzida através do efeito fotoelétrico em painéis fotossensíveis, que utilizam em sua composição materiais semicondutores que ao serem expostos a luz em uma determinada frequência, torna os elétrons ligados em átomos livres, sendo assim capazes de conduzir uma corrente elétrica contínua (Valadares; Moreira, 1998).

O potencial de geração anual de energia para uma região:

$$E_{anual} = G_{anual} \times A \times \eta \times PR \quad (1)$$

Onde:

E_{anual} = energia gerada anualmente (kWh/ano)

G_{anual} = irradiação solar anual total (kWh/m²/ano)

A = área dos painéis (m²)

η = eficiência do sistema

PR = *Performance Ratio*

A equação de conversão de KJ/m² para W/m²:

$$\frac{W}{m^2} = \frac{\frac{KJ}{m^2} \times 1000}{86400} \quad (2)$$

Com base nas equações demonstradas podemos entender como a nebulosidade ou a menor radiação incidente impactam na geração de energia.

2. OBJETIVO

Analisar a variação espaço-temporal da radiação solar global no Estado de São Paulo entre 2013-2022 e 2026-2035 e projetar cenários futuros para avaliar o potencial de geração de energia solar, além de comparar a projeção futura para o setor continental e faixa litorânea do Estado.

3. METODOLOGIA APLICADA

O estudo abrange toda a região do Estado de São Paulo, que se localiza na região Sudeste do Brasil, delimitado entre as coordenadas 19°47'S e 25°19'S e entre as longitudes 44°10'W e 53°05'W. Assim será apresentado uma breve caracterização da classificação climática de Köppen (1900) e mapas salientando o relevo e destacando a posição geográfica do Estado.

Foram utilizados dados de reanálise ERA5 do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF), obtidos da plataforma *Copernicus Climate Data Store* para análise passada e presente, com intervalo de 2013 até 2022.

Para projeção, os dados foram obtidos do modelo climático global HadGEM3-GC31-LL (*Hadley Centre Global Environment Model*), desenvolvido pelo *Met Office Hadley Centre* (Reino Unido) e utilizando o cenário de emissões RCP 4.5, para o intervalo de 2026 até 2035. O modelo consiste em um projeção intermediária, onde se pressupõe que as políticas climáticas limitem o aumento da forçante radiativa em cerca de 4,5 W/m² até 2100.

A variável abordada em ambos os casos é a radiação solar descendente de onda curta, sendo representada pela sigla SSRD na reanálise ERA5 e por RSDS na projeção climática. Os dados da reanálise ERA5 apresentam uma resolução horizontal de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de latitude e longitude (aproximadamente 31 km). Já o modelo de projeção HadGEM-GC32-LL apresenta uma grade de aproximadamente $1,25^\circ \times 1,875^\circ$ (aproximadamente 140 km). Os modelos apresentam grades distintas, contudo as análises e comparações serão realizadas com base nas grades originais de cada um, sem aplicação de *regridding* direto.

Para as comparações entre regiões, foi realizado o cálculo com média espacial dentro das delimitações definidas no Estado de São Paulo. Assim as diferenças representam contrastes físicos entre os produtos sem levar em consideração ajustes espaciais.

Os dados do INMET, por sua vez, foram baixados dos servidores do Instituto, provenientes de 41 estações meteorológicas distribuídas no Estado de São Paulo, que se adequaram ao critério de apresentar 24 dados horários por dia. Os dados de radiação, em KJ/m^2 , foram convertidos em W/m^2 , utilizando a equação 2. Os dados são de radiação diária, entre os anos de 2013 até 2022, onde foi calculada uma média mensal com os dados diários. Em seguida, foi calculada uma média mensal entre as estações, para assim, acompanhar a evolução do comportamento da radiação ao longo do período e comparar com os dados de reanálise. As estações utilizadas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Estações Meteorológicas do INMET.

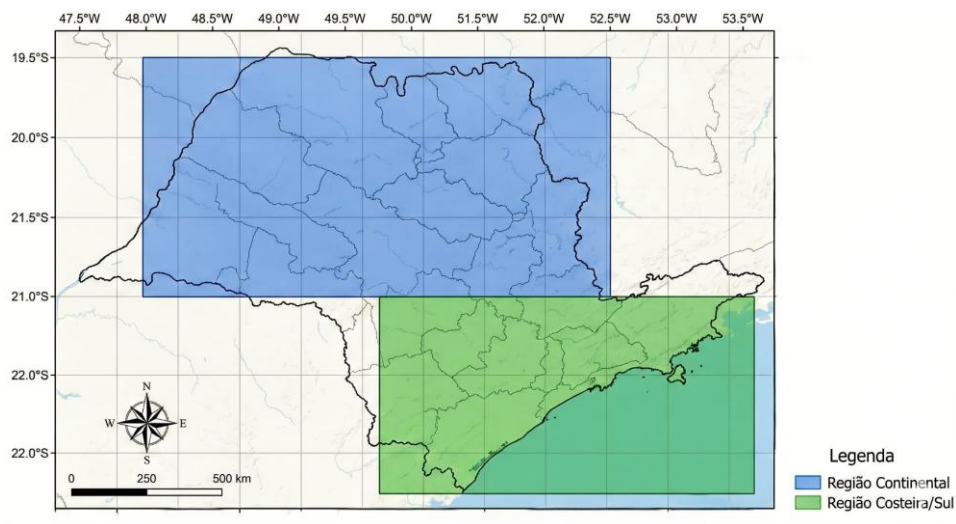
Estação (Cidade)	Código da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)
São Paulo - Mirante	A701	-23,50	-46,62
Bauru	A705	-22,36	-49,03
Campos do Jordão	A706	-22,75	-45,60
Presidente Prudente	A707	-22,12	-51,41
Franca	A708	-20,58	-47,38
São Carlos	A711	-21,98	-47,88
Iguape	A712	-24,67	-47,55
Iperó	A713	-23,43	-47,59
Itapeva	A714	-23,98	-48,89
São Miguel Arcanjo	A715	-23,89	-48,00
Ourinhos	A716	-23,00	-49,84
Rancharia	A718	-22,37	-50,97
Avaré	A725	-23,10	-48,94
Piracicaba	A726	-22,70	-47,62
Lins	A727	-21,67	-49,73
Taubaté	A728	-23,04	-45,52
Jales	A733	-20,17	-50,59
Valparaíso	A734	-21,32	-50,93
José Bonifácio	A735	-21,09	-49,92
Ariranha	A736	-21,13	-48,84
Ibitinga	A737	-21,86	-48,80
Casa Branca	A738	-21,78	-47,08
Itapira	A739	-22,42	-46,81
São Luiz do Paraitinga	A740	-23,23	-45,42
Barra Bonita	A741	-22,47	-48,56
Bragança Paulista	A744	-22,95	-46,53
Barra do Turvo	A746	-24,96	-48,42
Pradópolis	A747	-21,34	-48,11
Barretos	A748	-20,56	-48,54
Ituverava	A753	-20,36	-47,78
Barueri	A755	-23,52	-46,87
Dracena	A762	-21,46	-51,55
Marília	A763	-22,24	-49,97
Bebedouro	A764	-20,95	-48,47
Bertioga	A765	-23,84	-46,14
Registro	A766	-24,53	-47,86
Tupã	A768	-21,93	-50,49
Cachoeira Paulista	A769	-22,69	-45,01
São Sebastião	A767	-23,81	-45,40
Moela	A745	-24,10	-46,30
Votuporanga	A729	-20,40	-49,97

Fonte: INMET (2025).

Para uma análise abrangente entre os dados de reanálise e as observações, foram aplicadas as seguintes ferramentas estatísticas: o coeficiente de correlação de Pearson (r), o coeficiente de determinação (R^2), o teste t de Student (para verificar a significância das correlações), o p -valor, o RMSE (Root Mean Squared Error ou Raiz do Erro Quadrático Médio) e o Viés (Bias). Estes últimos quantificam, respectivamente, a magnitude dos erros e as diferenças sistemáticas entre os valores estimados e observados. No entanto, para a comparação entre os dados de reanálise e as projeções futuras, utilizou-se apenas o coeficiente de Pearson, o R^2 e o coeficiente angular.

Além disso, após os resultados para o Estado de São Paulo como um todo, foi realizada uma divisão geográfica, analisando a tendência climatológica para as áreas que sofrem maior interação com o oceano e áreas mais afastadas da costa, para comparar a progressão em ambos os setores. Essas áreas foram delimitadas pelas coordenadas -22.0°S ; -19.5°S e -53.5°W ; -47.5°W , para a região continental; e -24.5°S ; -23.0°S e -48.5°W ; -45.0°W , para a faixa costeira. Essa divisão nos possibilita contrastar a influência da maritimidade e continentalidade na região estudada e foi definida a partir da Figura 1 entre as regiões de maior potencial e mínimos para o estado.

Figura 3: Delimitação da região continental e costeira.



Fonte: Elaboração do autor (2025)

Por fim, foi calculado, utilizando a equação 1, o potencial solar do período histórico e da projeção climática e realizado uma análise comparativa interpretando a tendência desse potencial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada a comparação da reanálise com os dados observados nas estações meteorológicas. Em seguida, uma comparação entre a reanálise e as projeções. Por fim, uma análise de determinados setores do Estado de São Paulo.

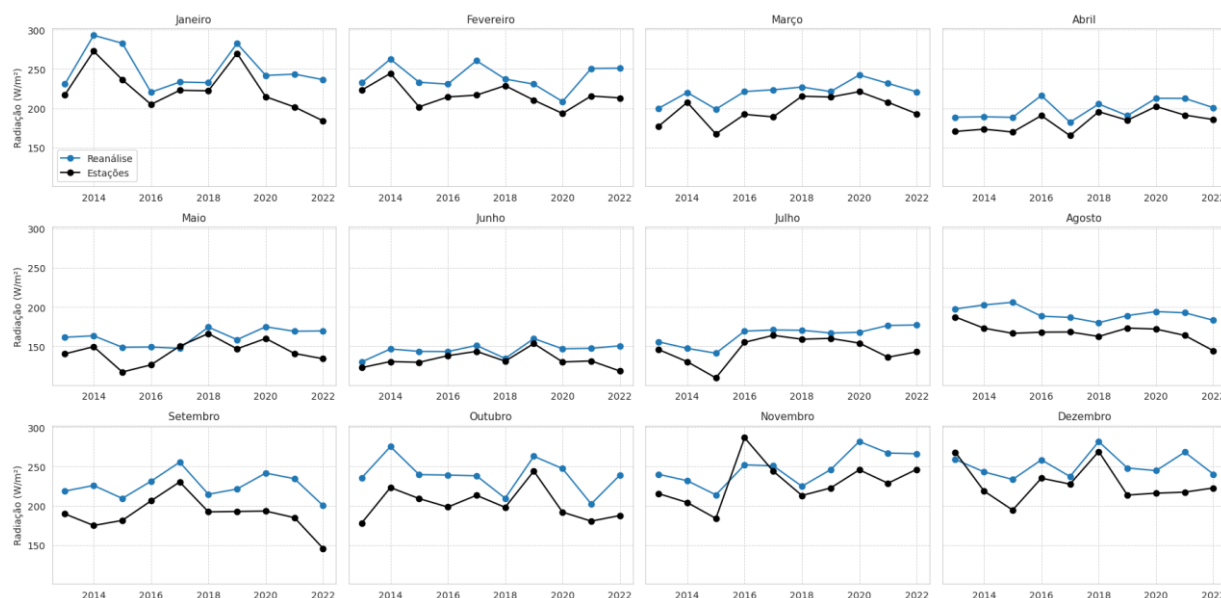
4.1 Análise para o Estado de São Paulo como um todo

4.1.1 Dados observados e dados de reanálise

Observa-se na Figura 4 que os maiores valores de radiação ocorrem durante a estação do verão e menores valores, de modo geral, durante o inverno. Isso está diretamente associado ao ciclo anual, sendo o padrão esperado da radiação no decorrer do ano para essa região.

Figura 4: Média da radiação de onda curta descendente entre 2013-2022. Dados da reanálise ERA5 e de observação do INMET, localizadas no Estado de São Paulo.

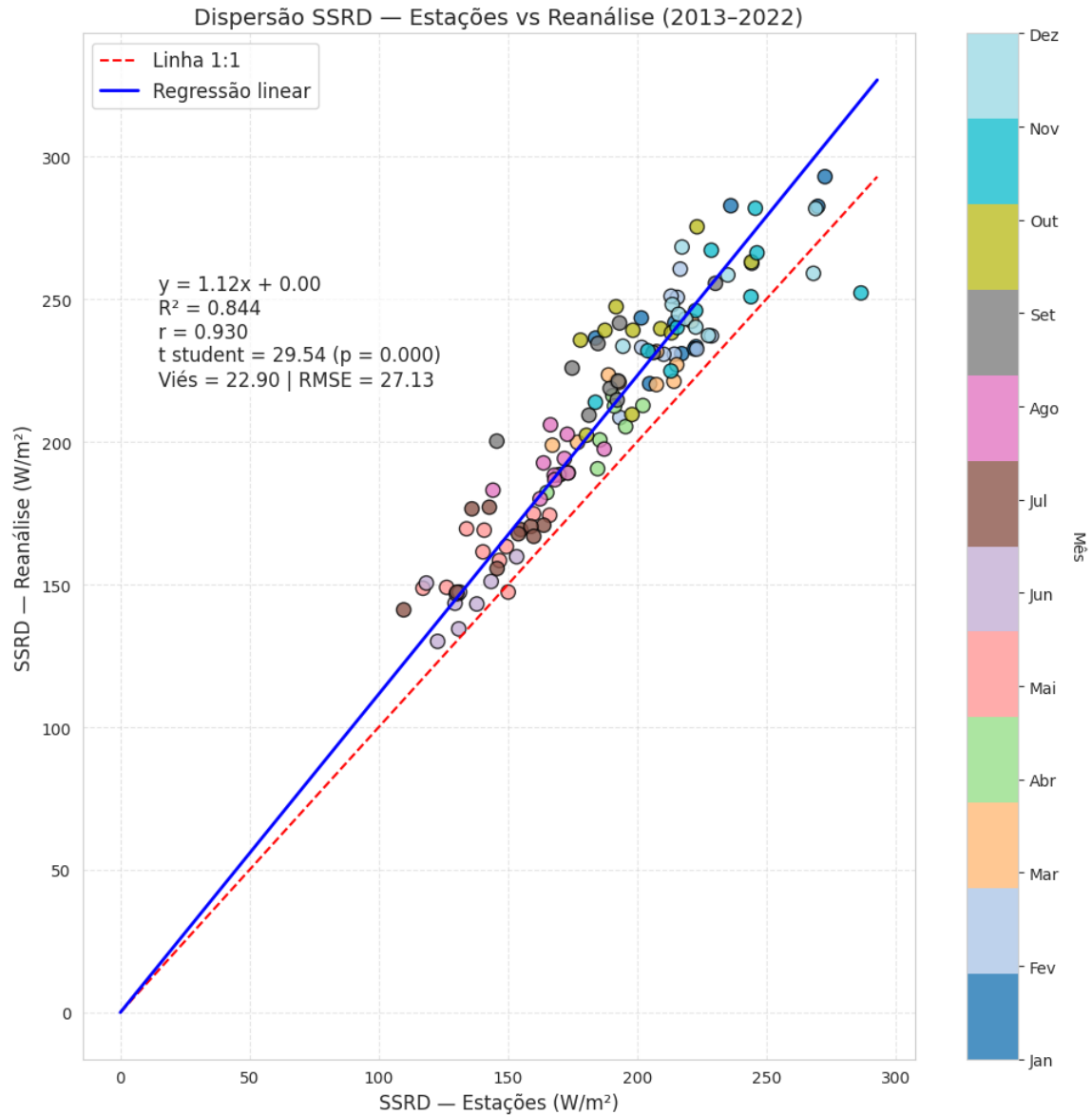
Evolução mensal da radiação solar descendente (Reanálise ERA5 × Observação) - São Paulo (2013-2022)



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP); ECMWF (2023).

Como era esperado, os dados observados seguem o mesmo padrão dos dados da reanálise, com maiores valores de radiação observados durante os períodos de verão e um menor fluxo durante o inverno.

Figura 5: Média mensal de 2013 a 2022 da radiação de onda curta incidente observada nas estações do INMET e da reanálise ERA5.



Fonte: INMET (2025); ERA5 (2023).

Analisando a Figura 5, nota-se que o gráfico de dispersão entre os dados observados e de reanálise apresenta um elevado coeficiente de determinação, com $R^2 = 0,844$ e um forte índice de correlação com $r = 0,930$, o que indica uma ótima representação dos dados de estações pela reanálise. Além disso, o teste t de Student ($t = 29,54$; $p < 0,001$; $\alpha = 0,05$), onde α representa o nível de significância de 95%, o que confirma a significância estatística da correlação, indicando que a probabilidade dessa relação ser ao acaso é relativamente pequena. Por fim o viés de $+22,90 \text{ W m}^{-2}$ indica o valor médio que o modelo superestima os dados observados (aproximadamente 9%) e um RSME de $27,13 \text{ W m}^{-2}$ representa a magnitude média dos erros entre os dados abordados (dispersão).

Resultados semelhantes foram observados por Vieira (2023), que também obteve superestimação dos dados de reanálise frente aos dados observados. Essa superestimação ocorre por fatores como: a resolução da reanálise, a diferença da grade frente a distribuição espacial das estações e um possível viés sistemático do modelo para a região.

Observa-se que os meses representados em tons de azul, que correspondem ao verão e ao período de transição – estação chuvosa na maior parte do Brasil (Bombardi; Carvalho, 2008) –, apresentam elevados valores de radiação, mas uma menor correlação. Esse resultado indica uma menor representatividade dos dados durante esse período.

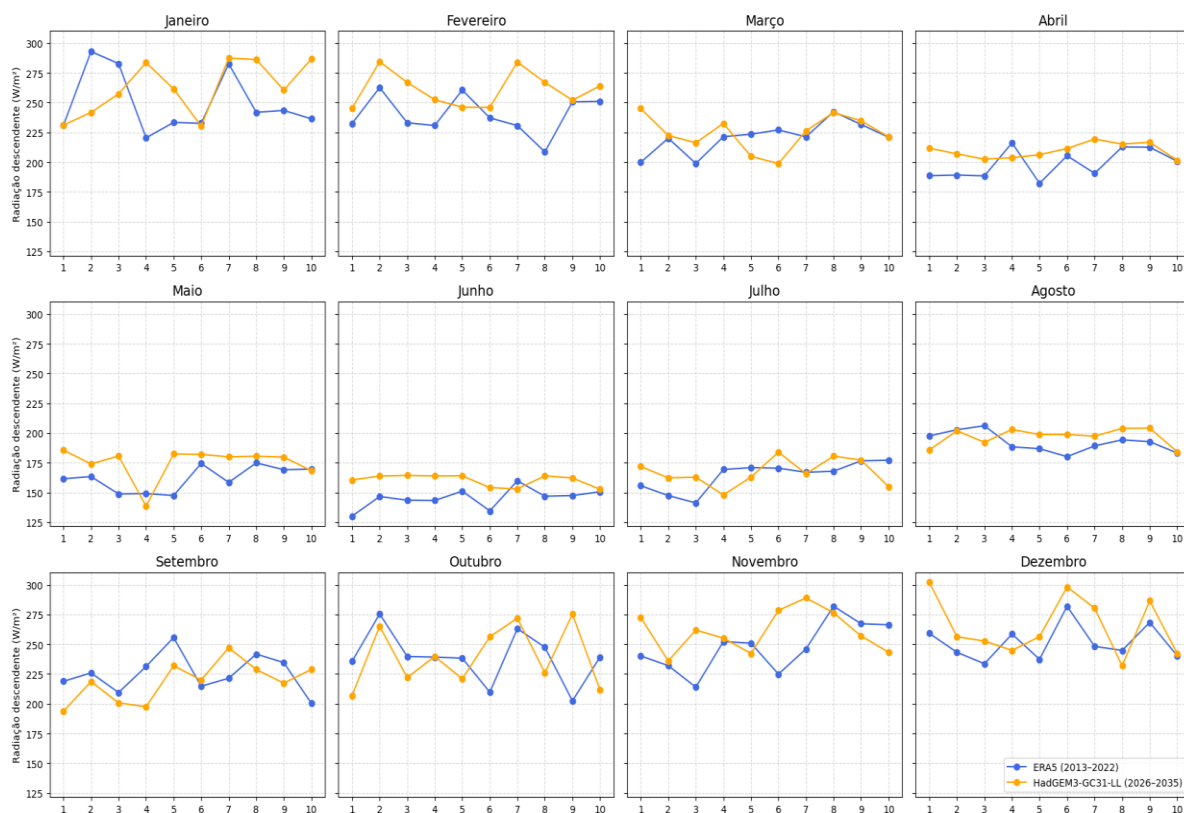
Assim, a reanálise ERA5 é representativa em relação aos dados obtidos pelas estações meteorológicas da variabilidade temporal e sazonal da radiação solar, sendo que aproximadamente 16% ($1 - 0,844 = 0,156$ ou 15,6%) da variabilidade não é explicada pelos dados mesmo apresentando uma alta correlação, sendo adequada para comparações com as projeções do modelo HadGEM3-GC31-LL.

4.1.2 Dados de reanálise e de projeção

Após a validação dos dados de reanálise, foi realizada uma análise comparativa entre o período histórico (2013 a 2022) e a projeção para o futuro (2026 a 2035) para o Estado de São Paulo como um todo. Como é possível observar na Figura 5, tem-se um comparativo mês a mês da radiação solar descendente entre a reanálise ERA5 e o modelo de projeção HadGEM3-GC31-LL. Logo, não é realizada uma correlação ponto a ponto entre séries que coincidem com o tempo. A comparação é feita entre as climatologias médias dos períodos e por meio da análise da mudança projetada ($\Delta = \text{Projeção} - \text{Reanálise}$), que são complementados por avaliações do Viés médio espacial.

Figura 6: Média da radiação de onda curta descendente nos pontos de grade do modelo de projeção HadGEM3-GC31-LL e da Reanalise ERA5 delimitados ao estado de São Paulo.

Comparação mês a mês da radiação descendente - São Paulo (Reanalise ERA5 e Projeção HadGEM3-GC31-LL)



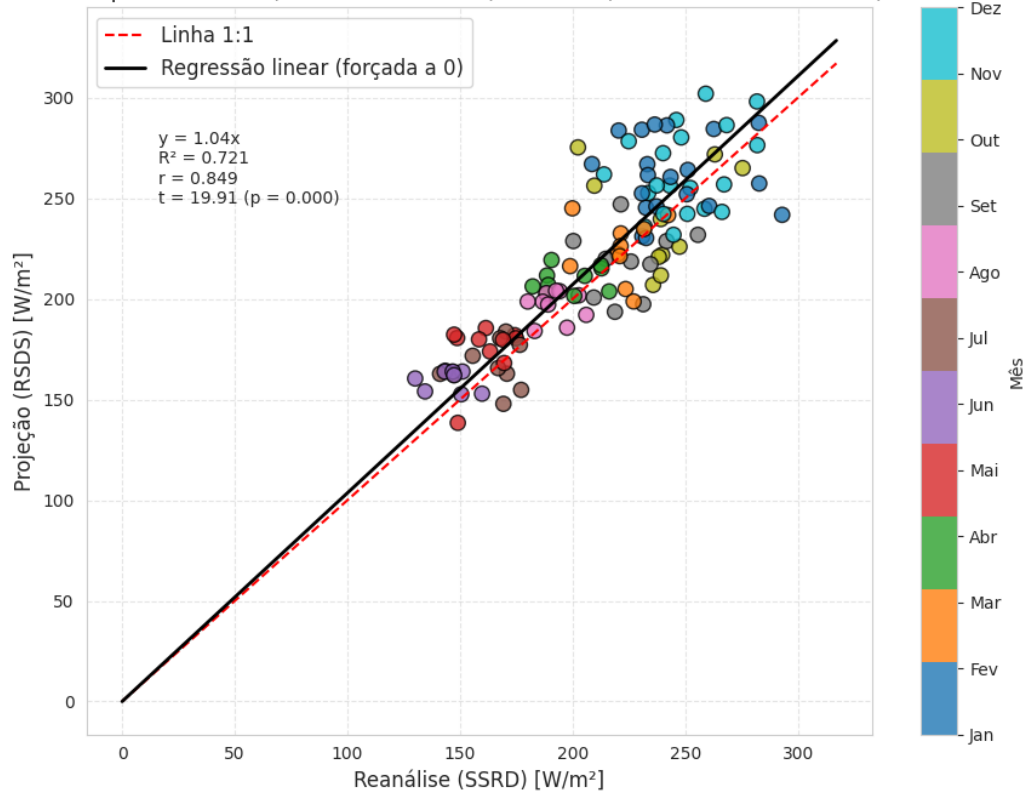
Fonte: CMIP6 (2023); ECMWF (2023).

Os dados de projeção seguem, de modo geral, o mesmo comportamento observado na análise de estações e de reanálise, seguindo o padrão climatológico esperado, onde temos maiores valores de radiação no verão, e menores durante o período do inverno.

A partir dos dados tratados, foi feito um gráfico de dispersão (Figura 7) entre o período histórico e a projeção, com os cálculos da correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação (R^2) e equação da reta.

Figura 7: Gráfico de dispersão entre dados de reanálise e projeção.

Dispersão SSRD (ERA5, 2013–2022) × RSDS (HadGEM3, 2026–2035)



Fonte: ECMWF (2023); CMIP6 (2023).

Como é possível observar no gráfico de dispersão entre a reanálise ERA5 e o modelo de projeção HadGEM 3, existe uma boa correlação positiva ($\cong 0,85$) e um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,72$). Isso indica que o modelo representa aproximadamente 72% da variabilidade observada nos dados de reanálise, algo que é considerado robusto se tratando de modelagem climática.

Essa forte correlação indica que o modelo HadGEM3-GC31-LL representa bem o padrão de radiação para o Estado de São Paulo e valida seu uso para estudo futuro. Contudo, tendo um coeficiente de determinação em 72%, nos diz que aproximadamente 28% da variabilidade climática não é explicada pelo modelo. Isso pode estar associado a locais onde não há uma boa representação do modelo, ou mudanças no padrão para a região. Isso mostra que, por melhor que seja o modelo, sempre haverá certas limitações nos modelos comparados com dados observados.

Esse incremento na radiação provavelmente está associado ao declínio da nebulosidade sobre os continentes (Liu et al., 2023), que se mostra como um fator dominante, mesmo diante de tendências opostas de aumento de nuvens em partes dos trópicos.

De modo geral, com esses valores obtidos nota-se que, a tendência da média do fluxo de radiação descendente para o Estado de São Paulo é de um aumento de cerca de 4% no intervalo de 2026 a 2035, comparado com o período de 2013-2022. Isso indica que a geração de energia solar será favorecida no futuro, com a tendência de leve aumento em comparação com o período histórico.

4.2 Análise comparativa entre as regiões continental e costeira.

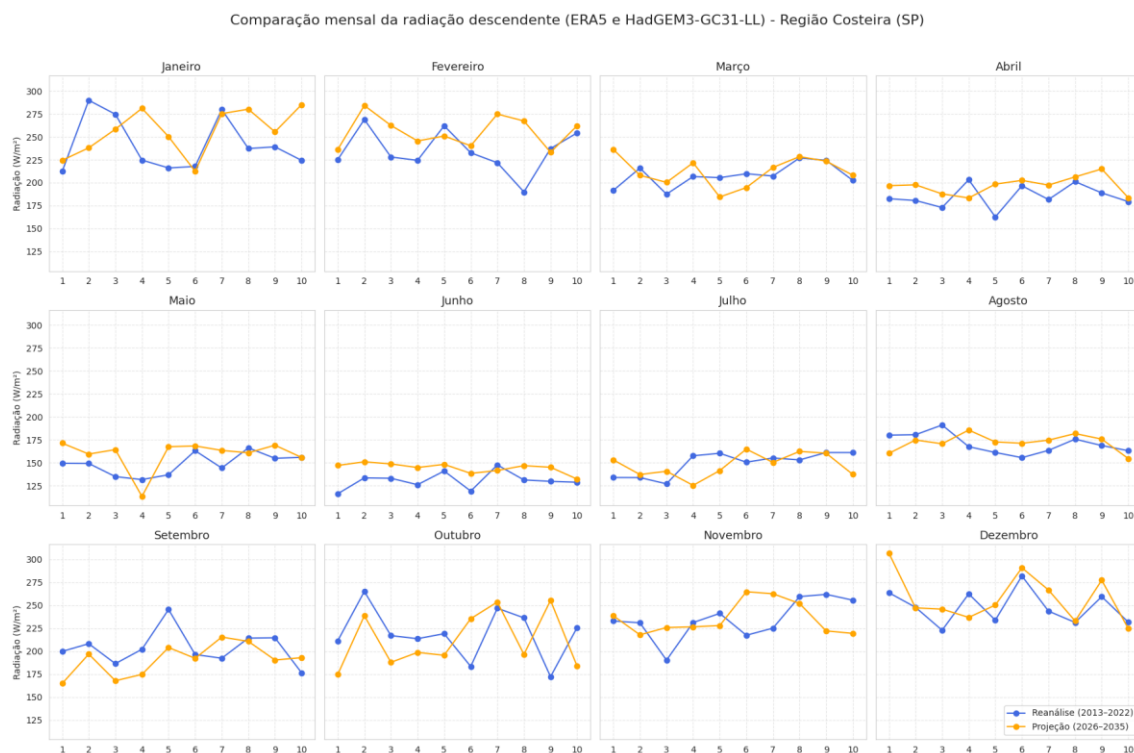
Como mencionado, o Estado de São Paulo apresenta uma grande variedade climática, sendo determinada principalmente pela influência do oceano, de acordo com Setzer (1966). Foram realizados recortes no Estado em duas regiões, para entender se há diferenças na projeção da nebulosidade para a região costeira e continental, demonstrando a progressão com um comparativo mês a mês entre os períodos de 2013 a 2022 e 2026 a 2035.

Analisando os dados de radiação de onda curta descendente (Figura 8 e Figura 9), nota-se padrões distintos de climatologia, por se tratar de períodos diferentes. Entretanto, igual ao analisado na Figura 5, segue o padrão climatológico da região, com valores ainda mais elevados no verão e com mínimos menores durante o inverno. Assim, como observado na análise para toda a região do Estado, temos, em ambos os casos, uma tendência de aumento da média de radiação descendente para o Estado de São Paulo, onde representação do modelo de projeção HadGEM3-GC31-LL, representado pela linha contínua laranja, está na maior parte dos pontos acima da linha azul, que representa a reanálise ERA5.

Comparação mensal da radiação descendente (ERA5 e HadGEM3-GC31-LL) - Região Continental (SP)



Figura 9: Média da radiação de onda curta descendente nos pontos de grade da reanálise do ERA5 e da projeção HadGEM-GC31-LL delimitados a região costeira do Estado de São Paulo.



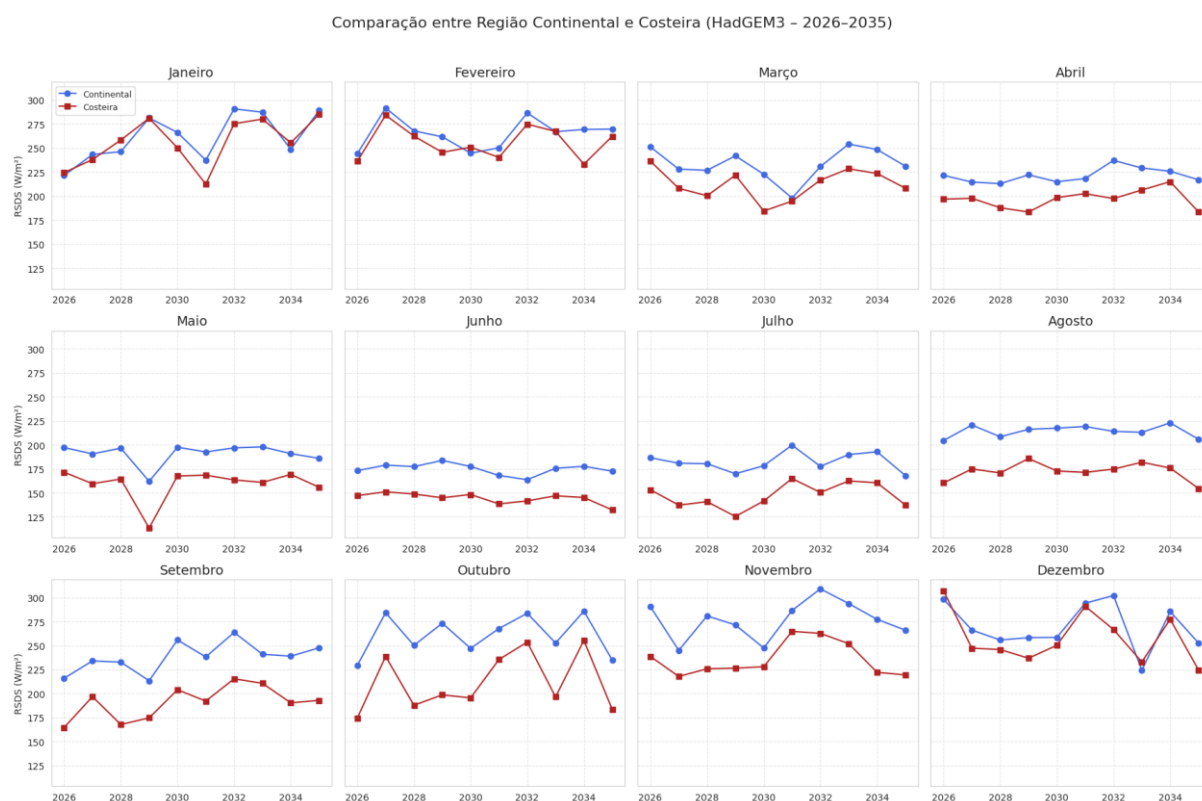
Fonte: ECMWF (2023); CMIP6 (2023).

Já nas Figura 10 e Figura 11, nota-se que, tanto na reanálise quanto na projeção, temos valores mais elevados na área continental devido a uma menor influência da oceanalidade, apresentando menos umidade e, por consequência, menos nuvens, favorecendo maiores valores de radiação descendente em comparação com a faixa costeira (Setzer, 1966). Essa diferença do padrão de radiação é mais evidente nos meses de inverno, devido à menor atuação e intensidade do escoamento de noroeste, o que reduz a umidade e instabilidade na região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, exceto na região costeira devido a atuação da Brisa Marítima (Gan, 2009). Com isso, o período é marcado por apresentar uma maior estabilidade atmosférica, que, por consequência, favorece uma maior radiação incidente.

Já na região costeira, nota-se menores valores de radiação, tanto na reanálise quanto na projeção, além de apresentar um padrão menos instável do fluxo de radiação em comparação ao observado na área continental. Isso é associado diretamente à brisa marítima e à influência de sistemas transientes. Também apresentou uma maior umidade relativa do ar, inclusive na estação seca, em comparação com a região continental (Augusto, 2010).

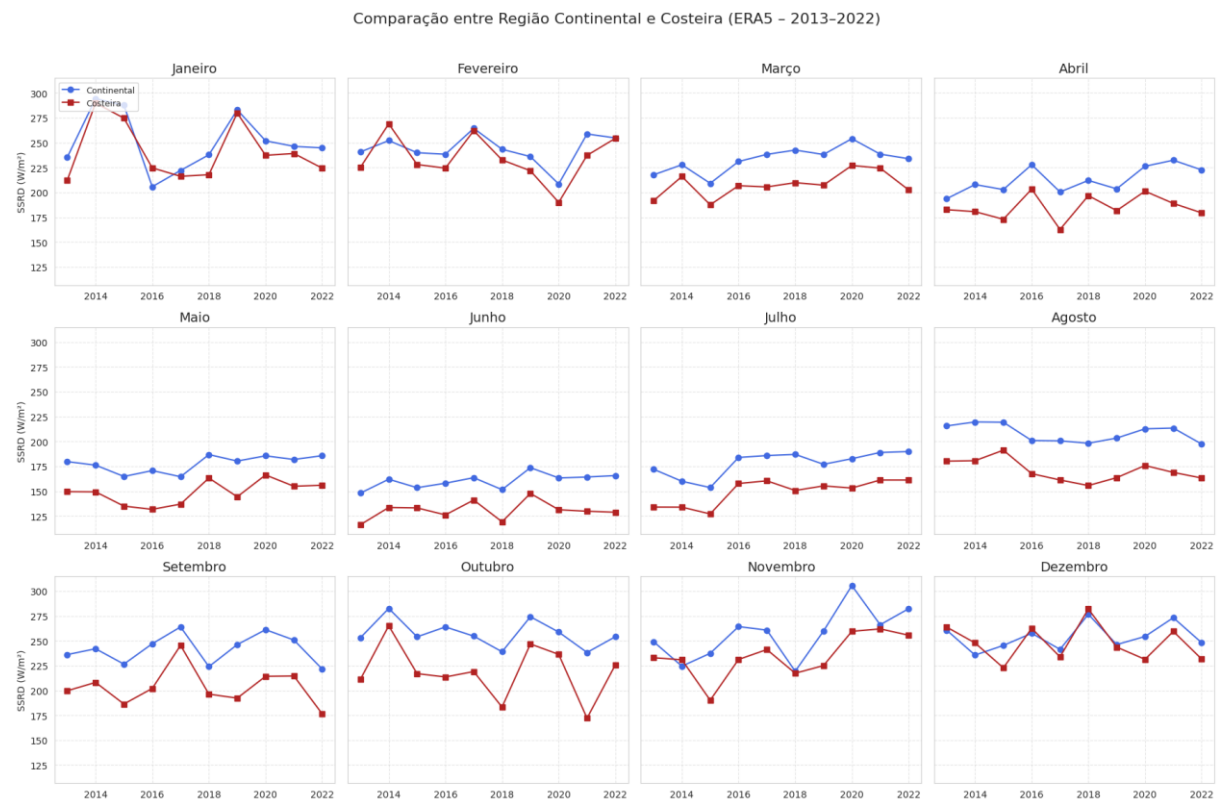
Estes padrões observados são esperados e comuns quando pensamos nos conceitos de continentalidade e maritimidade, como descrito por Setzer (1966). A Figura 10 sugere que o padrão deve se manter, ou seja, os mecanismos fundamentais que determinam a distribuição de radiação solar entre a região continental e a região litorânea devem persistir no cenário climático projetado (RCP 4.5) para os próximos 10 anos. Assim pode-se esperar um potencial razoavelmente maior nas regiões continental e costeira.

Figura 10: Comparação da média da radiação de onda curta descendente entre a região costeira e continental em pontos de grade da projeção HadGEM-GC31-LL.



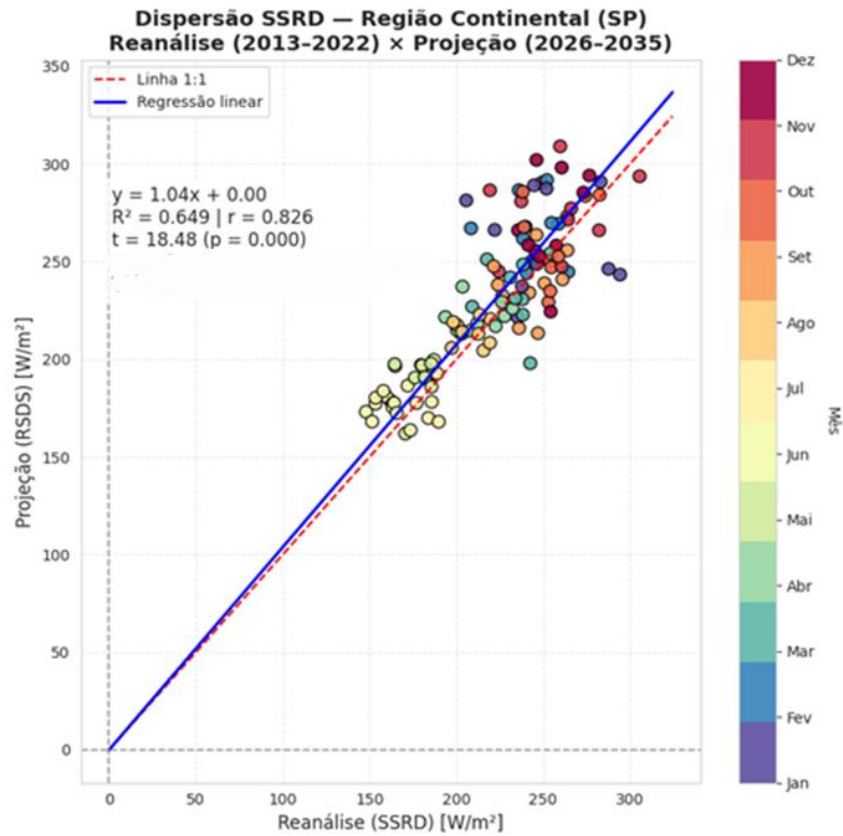
Fonte: CMIP6 (2023).

Figura 11: Comparação da média da radiação de onda curta descendente entre a região costeira e continental em pontos de grade da reanálise ERA5.



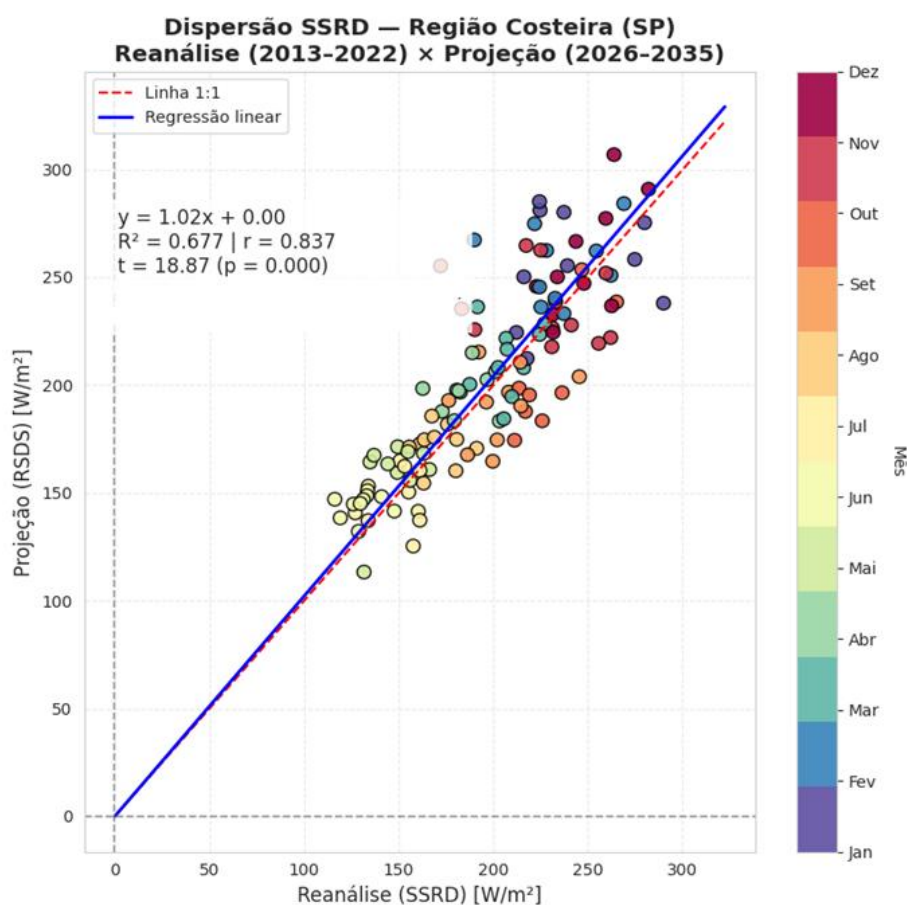
Fonte: ECMWF (2023).

Figura 12: Gráfico de dispersão entre os dados de reanálise e projeção para a região continental.



Fonte: ECMWF (2023); CMIP6 (2023).

Figura 13: Gráfico de dispersão entre os dados de reanálise e projeção para a região costeira.



Fonte: ECMWF (2023); CMIP6 (2023).

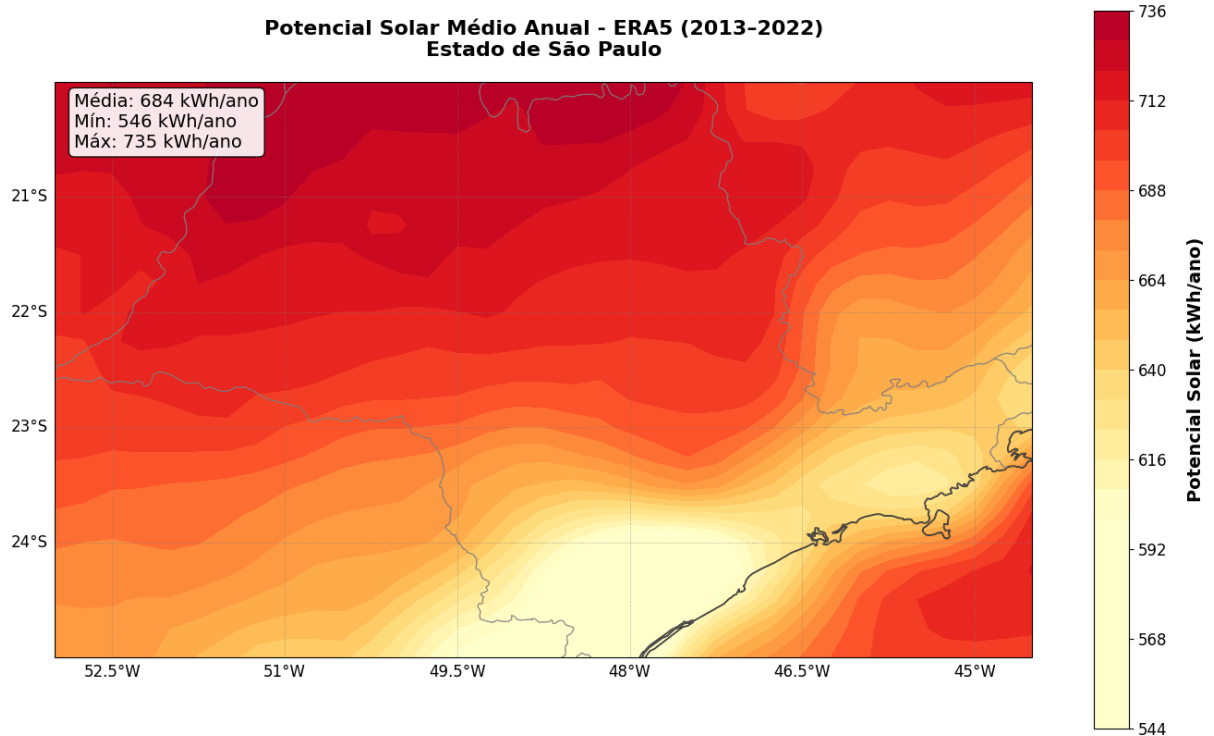
Com base nas Figura 12 e Figura 13, os gráficos de dispersão entre a reanálise ERA5 e o modelo de projeção HadGEM3-GC31-LL para as regiões continental e costeira do Estado de São Paulo demonstra uma tendência de aumento de cerca de 4% e 2% respectivamente, além disso os gráficos apresentam uma forte correlação estatística ($r > 0,82$) e coeficientes de determinação moderados ($R^2 \approx 0,65$ e $0,68$). Os resultados indicam que o modelo de projeção apresenta um cenário futuro de fluxo de radiação solar descendente semelhante ao histórico recente, mas indicando um aumento de 4% e 2% com diferenças sistemáticas associadas a condições atmosféricas locais.

4.3 Implicações para energia solar

Como foi analisado nas seções 4.1 e 4.2, o padrão de radiação descendente para o Estado de São Paulo, tanto na região costeira quanto para o interior do Estado, não tem tendência de mudança significativa. Contudo, a análise, de forma geral, indicou na projeção para os próximos 10 anos para o Estado de São Paulo.

Com base no estudo realizado, foi projetado o potencial médio mensal de geração de energia. Utilizando a Equação 1, foram calculados os potenciais de energia solar para São Paulo, utilizando como padrão um painel solar comum com cerca de 2 m² e eficiência variando de 13 a 24%, sendo a faixa comum nestes equipamentos (Lana *et al.*, 2015).

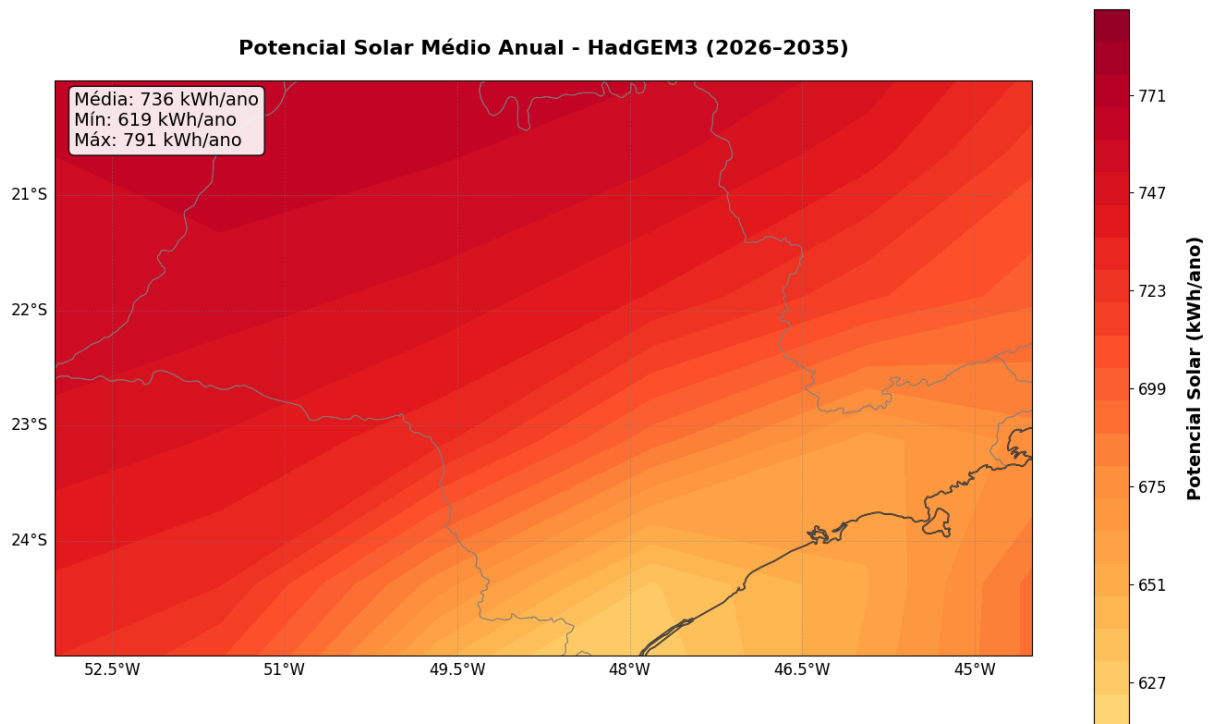
Figura 14: Potencial de geração de energia solar médio anual.



Fonte: ECMWF (2023).

Como era esperado, a região costeira apresenta um menor potencial do que as demais regiões do Estado de São Paulo, devido a fatores que foram mencionados nas análises das Figura 8 e Figura 9. O litoral sul é o que apresenta o menor potencial, como já era estimado, pois essa região além de apresentar maior nebulosidade ao todo decorrer do ano, no período de inverno é a mais atingida por frentes frias, agravando ainda mais esta condição (Veber; Fedorova; Levit, 2020). Já as regiões mais ao oeste e norte apresentaram um elevado potencial médio anual durante o período histórico abordado, com uma leve superestimação do modelo em comparação aos dados de estações meteorológicas.

Figura 15: Projeção do potencial de geração de energia solar anual.



Fonte: CMIP6 (2023).

Na Figura 14, nota-se o mesmo padrão observado na Figura 15, como já era esperado após a análise realizada na seção 4.2, onde a projeção tende a superestimar os dados da reanálise. Justificando assim, os valores de mínima, máxima e média mais elevados em comparação com os dados de reanálise.

Com base nas informações das Figura 14 e Figura 15, reforça-se o que foi analisado nos dados de projeção, representando um aumento de radiação e da geração de energia solar para o Estado de São Paulo. Nota-se que, as regiões mais ao sul e a projeção demonstraram um aumento no potencial, como foi discutido na seção 4.2. Já nas regiões norte, oeste e centro-oeste do estado, esse aumento é bem mais expressivo comparado com os dados de reanálise, indicando um aumento maior no fluxo de radiação descendente, e, por consequência, do potencial de geração de energia solar.

5. CONCLUSÃO

A análise da variação de radiação solar e do padrão de nebulosidade para o Estado de São Paulo possibilitou a compreensão da relação da variabilidade destas variáveis no impacto do potencial de geração de energia solar. As comparações entre dados observados de estações meteorológicas, de reanálise, e de projeção, mostraram que os modelos climáticos utilizados representam, de forma adequada, as condições atuais do fluxo de radiação solar descendente para o Estado.

Com base no estudo, a tendência de radiação para o período projetado (2026-2035) é de aumento da radiação descendente de cerca de 4% a mais para a região continental, e de 2% para a faixa costeira em comparação com o período histórico (2013-2022).

O modelo climático HadGEM3-GC31-LL se mostrou consistente na análise, mesmo apresentando uma leve superestimação dos valores em comparação aos dados de reanálise, algo que também ocorreu com os dados do ERA5 frente aos dados observados.

Para estudos futuros, é interessante aumentar a série temporal e incluir outros modelos de projeção climática, para reduzir assim as incertezas e aperfeiçoar as estimativas do potencial solar.

De modo geral, os resultados demonstraram estabilidade climática no potencial de geração de energia solar para a próxima década, reforçando a viabilidade do investimento recorrente em geração fotoelétrica para São Paulo. Com isso, o estudo contribui para o incentivo deste meio de geração, que, por sua vez, contribui para a descarbonização, amplia as fontes da matriz energética e aumenta a disponibilidade de energia para o consumo, fomentando a expansão sustentável para o Estado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, Clayton Alcarde et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013 Tradução. Disponível em:
Acesso em: 2025
- AUGUSTO, F. L. **Persistência de nebulosidade na faixa leste do estado de São Paulo:** situações sinóticas e influências regionais. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 58-72, 2008.
- CABRAL, M. B.; FONTENELE, A. M. EMERGÊNCIA CLIMÁTICA E A PROTEÇÃO AUTÔNOMA DA NATUREZA. **Revista Argumentum-Argumentum Journal of Law**, v. 26, n. 2, p. 269-295, 2025.
- CONSTANTINO BLAIN, Gabriel; DA ROCHA SOBIERAJSKI, Graciela; LOPES MARTINS, Letícia. **Elevações na frequência de ocorrência de secas meteorológicas no Estado de São Paulo sob condições de mudanças climáticas**. Derbyana, [S. l.], v. 44, 2023. Disponível em: <https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/789>. Acesso em: nov. 2025.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. Nova Jersey: Hoboken, 2013.
- GAN, Manoel Alonso; RODRIGUES, Luiz R.; RAO, Vadlamudi B. Monção na América do Sul. Chapter, v. 19, p. 297-312, 2009.
- KÖPPEN, W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. **Geographische Zeitschrift**, v. 6, n. 11. H, p. 593-611, 1900.
- LANA, L. T. C. et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.
- LIMA, F. J. L. et al. Impacto das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Solar: Uma Análise Multimodelo Utilizando CMIP6. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS, 10, 2024, Natal. **Anais [...]**. Natal: 2024.

LIU H. et al. Opposing trends of cloud coverage over land and ocean under global warming. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, n. 11, p. 6559-6569, 2023.

MIGUEL, J. V. P. **Avaliação da geração de energia elétrica no Brasil em condições de escassez de recursos eólicos e hídricos**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, 2021.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2023.

ROLIM, G. S. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, p. 711-720, 2007.

SETZER, José. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comissão interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1966.

VALADARES, E. D. C.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 15, n. 2, p. 121-135, 1998.

VEBER, M. E.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Desenvolvimento de atividades convectivas sobre a região Nordeste do Brasil, organizada pela extremidade frontal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. especial, p. 995-1003, 2020.

VIEIRA, M. C. R. **Avaliação espacial das temperaturas máximas mínimas e umidade relativa do ar provenientes das reanálise do era5 sobre o estado de são paulo**. 2023. Relatório Final de Iniciação Científica - INPE, Cachoeira Paulista, 2023.

VILELA, W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos, 2010.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET).

Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP): dados observacionais de radiação solar e variáveis meteorológicas de superfície.

Brasília, DF: INMET, 2025.

Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>

Acesso em: ago. 2025.

EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS (ECMWF).
ERA5 Reanalysis Data Set: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate.

Copernicus Climate Data Store (CDS), Reading, 2024.

Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

Acesso em: ago. 2024.

WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME (WCRP).

Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6): HadGEM3-GC31-LL Dataset.
Met Office Hadley Centre, 2025.

Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

Acesso em: set. 2025.

SÃO PAULO (Estado).

Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL).

Dados geográficos e administrativos do Estado de São Paulo.

São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2025.

Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/>.

Acesso em: out. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz elétrica brasileira cresce 3,3 GW até abril de 2023**. Brasília, 10 maio 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/matriz-eletrica-brasileira-cresce-3-3-gw-ate-abril-de-2023>. Acesso em: 2023.