



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Validação do Potencial Uso de Dados de Reanálises Atmosféricas para Estimativa de  
Radiação Solar Considerando o Efeito dos Aerossóis**

Bruno Ribeiro Herdies

Relatório de Iniciação Científica do programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Éder Paulo Vendrasco.

URL do documento original:

<?>

CPTEC/INPE  
Cachoeira Paulista, SP  
Setembro de 2022



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Validação do Potencial Uso de Dados de Reanálises Atmosféricas para Estimativa de  
Radiação Solar Considerando o Efeito dos Aerossóis**

Bruno Ribeiro Herdies

Relatório de Iniciação Científica do programa  
PIBIC, orientado pelo Dr. Éder Paulo Vendasco.

URL do documento original:

<?>

CPTEC/INPE  
Cachoeira Paulista, SP  
Setembro de 2022



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



PÁTRIA AMADA  
**BRASIL**  
GOVERNO FEDERAL

## AGRADECIMENTOS



## RESUMO

Motivado pela grande demanda por fontes alternativas de geração de energia renovável no Brasil, o presente estudo tem como foco a geração de energia por meio da irradiação solar. Nos últimos anos, a tecnologia associada à geração de energia fotovoltaica tem feito grandes avanços, possibilitando maior eficiência e menor custo. Apesar de toda essa evolução de novos equipamentos, no Brasil a disponibilidade de dados observados sobre a irradiação solar para a validação do potencial de geração desse tipo de energia é muito limitada. Tendo em vista que para algumas regiões do país os únicos dados disponíveis são aqueles extrapolados das estações meteorológicas em outros locais, uma das abordagens deste estudo é o uso de dados da reanálise meteorológica para preencher essas lacunas. O foco inicial é o uso da segunda geração da reanálise MERRA2 (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*), a única reanálise que considera a assimilação de dados de aerossol, distribuídas pelo GMAO da NASA, para estimativa de irradiação solar em regiões tropicais e subtropicais do Brasil. Estes dados serão validados com o uso de dados observacionais (2001-2019) coletados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As variáveis utilizadas da reanálise MERRA2 e analisadas nesse trabalho são: *Surface Net Downward Shortwave Flux* (SWGNT), *Surface Net Downward Shortwave Flux* assumindo nenhum aerossol (SWGNTCLN), *Surface Net Downward Shortwave Flux* assumindo céu claro (SWGNTCLR) e o *Surface Net Downward Shortwave Flux* assumindo céu claro e sem aerossol (SWGNTCLRCLN). Inicialmente, os dados de três estações meteorológicas foram comparados com as estimativas de dados de reanálise, onde a cobertura de nuvens e a inclusão de aerossóis foram levadas em consideração. Observou-se um comportamento diferente para as três estações, onde a estação Caicó, com baixo índice de precipitação e de poluição do ar, teve os valores estimados mais próximos de *céu claro* e sem aerossol. A estação Taubaté mostrou um comportamento regular com valores próximos ao esperado considerando as nuvens e aerossol. A estação de Campo Grande apresentou um comportamento próximo às duas estações, com períodos de valores próximos ao esperado, e um segundo período com comportamento mais próximo aos dados com céu claro. Na análise dos efeitos dos aerossóis utilizando a variável AOD (Profundidade Óptica dos Aerossóis) torna-se claro o efeito dos aerossóis de queimadas da região Amazônica na estação de Campo Grande e um pouco menor em Taubaté, principalmente nos meses de agosto e setembro. As conclusões ainda são limitadas devido ao baixo número de estações avaliadas até o presente momento, portanto, serão incluídas outras estações no estudo para obter uma melhor amostragem dos dados e explorar melhor o efeito da consideração dos aerossóis na variável SWGNT em regiões fortemente afetadas pelas queimadas na Amazônia.

**Palavras-chave:** Irradiação Solar, Energia Renovável, Reanálise MERRA-2 e Estações INMET.



## ABSTRACT

Motivated by the great demand for alternative sources of renewable energy generation in Brazil, the present study focuses on energy generation through solar irradiation. In recent years, the technology associated with photovoltaic power generation has made great advances, enabling greater efficiency and lower cost. Despite all this evolution of new equipment, in Brazil the availability of observed data on solar irradiation to validate the generation potential of this type of energy is very limited. Considering that for some regions of the country the only data available are those extrapolated from weather stations elsewhere, one of the approaches of this study is the use of meteorological reanalysis data to fill these gaps. The initial focus is the use of the second generation of *merra2 reanalysis (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications)*, the only reanalysis that considers the assimilation of aerosol data, distributed by NASA's GMAO, to estimate solar irradiation in tropical and subtropical regions of Brazil. These data will be validated using observational data (2001-2019) collected by INMET (National Institute of Meteorology). The variables used in the MERRA2 reanalysis and analyzed in this work are *Surface Net Downward Shortwave Flux* (SWGNT), *Surface Net Downward Shortwave Flux assuming no aerosol* (SWGNTCLN), *Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky* (SWGNTCLR) and *Surface Net Shortwave Flux assuming clear sky and no aerosol* (SWGNTCLCLN). Initially, data from three meteorological stations were compared with estimates of reanalysis data, where cloud cover and aerosol inclusion were considered. A different behavior was observed for the three seasons, where the Caicó station, with low precipitation and air pollution index, had the values estimated closer to clear *sky* and without aerosol. The Taubaté station showed a regular behavior with values close to expected considering the clouds and aerosol. The Campo Grande station presented a behavior close to the two stations, with periods of values close to expected, and a second period with behavior closer to the data with clear *sky*. In the analysis of the effects of aerosols using the variable AOD (Optical Depth of Aerosols), the effect of aerosols from fires in the Amazon region at Campo Grande station becomes clear and a little smaller in Taubaté, especially in August and September. Conclusions are still limited due to the low number of stations evaluated so far, therefore, other stations will be included in the study to obtain a better sampling of the data and to better explore the effect of aerosol consideration on the SWGNT variable in regions strongly affected by fires. in the Amazon.

**Keywords:** Solar Irradiation, Renewable Energy, MERRA-2 Reanalysis and INMET Stations.



## LISTA DE FIGURAS

**Pág.**

- Figura 1: Localização das estações utilizadas neste estudo. Estação de Caicó (preto), estação de Campo Grande (azul) e estação de Taubaté (branco). Fonte: Produção do autor. . . . . 14
- Figura 2 – Componentes da Irradiância Solar. Fonte: Pereira et al., 2017. . . . . 16
- Figura 3 - O padrão diurno médio e a média mensal de irradiação solar observada sobre a estação de Taubaté (linha verde claro), respectivamente. As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul). Fonte: Produção do autor. . . . . 18
- Figura 4 - O padrão diurno médio e a média mensal de irradiação solar observada sobre a estação de Caicó (linha verde claro), respectivamente. As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul). Fonte: Produção do autor. . . . . 19
- Figura 5 - O padrão diurno médio e a média mensal de irradiação solar observada sobre a estação de Campo Grande (linha verde claro), respectivamente. As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul). Fonte: Produção do autor. . . . . 20
- Figura 6 – a) Pluma de poluição poluente em setembro e b) comparação de um dia com o céu limpo e com o céu poluído em Ji – Paraná RO. Fonte: Angel et al. 2021 (BAMS) e CPTEC/INPE. . . . . 21
- Figura 7 - Diagramas de Taylor para a correlação média anual e desvio padrão das estações Caicó, Campo Grande e Taubaté, utilizando como referência a irradiação solar observada. Fonte: Produção do autor. . . . . 21



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



PÁTRIA AMADA  
**BRASIL**  
GOVERNO FEDERAL

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Informações sobre as estações meteorológicas. Fonte: Produção do autor. . . . . 15



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

GMAO: Global Modeling and Assimilation Office.

MERRA-2: *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*, version 2.

GEOS-5: *Goddard Earth Observing System*, versão 5.12.4.

GSI: *Gridded Statistical Interpolation System*.

SWGNT: Surface Net Downward Shortwave Flux

SWGNTCLN: Surface Net Downward Shortwave Flux assuming no aerosol.

SWGNTCLR: Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky.

SWGNTCLRCLN: Surface Net Downward Shortwave Flux assuming clear sky and no aerosol.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.1. Objetivos específicos .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
<b>3. DADOS E METODOLOGIA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Observações e Conjunto de Reanálise .....</b>	<b>13</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>17</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>6. ETAPAS FUTURAS .....</b>	<b>22</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>22</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos diversos estudos têm sido realizados buscando avaliar o potencial de energias renováveis em todo o globo, associado ao aumento crescente dos impactos de mudanças climáticas. O Brasil, devido à sua localização equatorial e com grande potencial de uso de energia solar e eólica, apresentou uma grande alteração em sua matriz energética, incluindo fontes alternativas de geração de energia. Este crescimento foi possível devido ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e de menor custo. Apesar de toda a evolução no desenvolvimento de novos sistemas, a disponibilidade de dados observados é bem limitada, e alguns poucos estudos utilizam dados estimados via satélite (Martins et al., 2007, Viana, et al., 2011) ou extrapolações de dados observados em outras regiões (Tiba 2000), o que compromete o uso eficiente de novas tecnologias. Um dos mais importantes estudos nessa área é a publicação do *Atlas Brasileiro de Energia Solar* (Pereira et al., 2017), em sua segunda edição, onde são utilizados dados observados e de satélite, com o uso de modelo de transferência radiativa BRASIL-SR (Pereira et al., 1996).

Estudos recentes (Boiley and Wald, 2015, Tahir et al., 2018, Sianturi et al., 2020) tem utilizado informações de dados de reanálises meteorológicas globais para estimar a radiação solar que atinge a superfície terrestre. Reanálises meteorológicas utilizam o estado da arte em modelagem numérica e um sistema de assimilação de dados, em que dados observados de diversas variáveis de estado, tais como pressão de superfície, temperatura, umidade e dados de vento, entre outras, são utilizados para compor uma análise retrospectiva dos diversos parâmetros atmosféricos. No procedimento de assimilação de dados, utilizado para compor o estado da atmosfera em um dado instante, são utilizados dados de diversas fontes, incluindo dados de estações em superfície, de navios, de aviões, de radiossondagens e estimados por satélites; e uma condição inicial da atmosfera proveniente de modelos de previsão numérica de tempo (PNT). Apesar do potencial destes estudos, com altas resoluções temporais e espaciais (horárias e dezenas de km, respectivamente), existem poucos registros de uso de dados de



reanálises para o Brasil em trabalhos de irradiância solar (radiação solar por unidade de área), o que motivou a realização do presente estudo.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste estudo é analisar informações que permitam a avaliação e caracterização da variabilidade temporal da irradiação solar em diferentes regiões do Brasil por meio de dados de modelagem numérica e validados por observações em superfície, considerando a influência dos aerossóis.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- Fazer o levantamento da base de dados observacionais disponível de radiação solar nas regiões Nordeste Centro-Oeste e Sudeste do Brasil;
- Realizar o controle de qualidade dos dados observacionais;
- Validar o estado da arte das reanálises meteorológicas disponibilizadas pelo GMAO/NASA para a estimativa de radiação solar;
- Caracterizar a variabilidade temporal e espacial da radiação solar nas diferentes regiões fazendo uso de dados de reanálise;
- Analisar o impacto dos efeitos da cobertura de nuvens e de aerossóis na radiação solar nas regiões analisadas.

## **2. REVISAO BIBLIOGRAFICA**

O uso de dados de reanálises representa uma importante fonte de informação para aplicações científicas no uso de radiação solar para fins de geração de energia fotovoltaica. Boiley and Wald (2018) analisaram os dados das reanálises do MERRA (Rienecker et al., 2011), do GMAO/NASA, e do ERA-Interim, do ECMWF, comparando os mesmos com dados observados em localidades da Europa, África e Oceano Atlântico, onde foi evidenciado a



tendência de ambas reanálises a apresentar condições de céu claro, quando o observado é céu com nebulosidade e com menor frequência o oposto, deixando claro que essa superestimação de céu claro leva a uma superestimação da irradiação. Sendo essa característica menos evidente na reanálise do ERA-Interim. Em regiões de pouca nebulosidade os efeitos de superestimativa são menores, sendo recomendado o uso das reanálises.

Feing and Wang (2019) fizeram uma comparação entre os dados das reanálises MERRA e MERRA2 (Gelaro et al., 2017), validados com dados observados irradiação solar de estações de superfície na China de 1980-2014. Assim como uma avaliação dos dados com cobertura de nuvens e aerossóis. Os resultados foram similares aos encontrados por Boiley and Wald (2018), com uma superestimativa da irradiação solar devido aos problemas de ambas as reanálises de subestimar os valores de nebulosidade, com os maiores vieses na região Sul e os menores valores na região Leste. O MERRA2 apresenta uma redução dos vieses na região Norte, possivelmente devido a assimilação de aerossóis, com melhor performance comparado ao MERRA.

Trabalhos recentes (Sianturi et al., 2020) avaliaram os dados da reanálise MERRA-2, do GMAO/NASA, e do ERA5, do ECMWF como estimativa para dados de Irradiação solar, os quais foram validados com dados observados de irradiância global horizontal obtidas sobre a região da Indonésia. Nestes estudos foi possível observar que em sua grande maioria os dados da reanálise ERA5 apresentam viés positivo, quando comparado aos dados observados de irradiância solar horaria, com os dados do MERRA2 em sua maioria apresentaram viés negativo. Resultados similares foram encontrados para os valores mensais. Em geral as estimativas da ERA5 apresentaram os melhores resultados, quando comparados aos dados observados.

Estudos que relacionam os efeitos dos aerossóis são muito recentes, em um destes trabalhos (Silveira Jr. et al., 2020) foi apresentada a influência dos aerossóis na geração de energia solar, deixando claro o decréscimo na eficiência da geração de energia na presença de aerossóis, principalmente quando é analisado o período de março a outubro quando ocorre a maior carga de aerossóis devido às queimadas que ocorrem na região Norte e Centro-Oeste.



Yamasoe et al. (2021) analisou dados observados de 56 anos (1961-2016), de irradiação solar diária para a cidade de São Paulo, onde observou uma tendência negativa, caracterizando o efeito de escurecimento, com um efeito oposto na fração de cobertura de nuvens. As possíveis causas podem ser associadas com a ocorrência de nevoeiro, efeitos de ilha de calor, variação na carga de aerossóis e aumento na concentração dos gases do efeito estufa.

### **3. DADOS E METODOLOGIA**

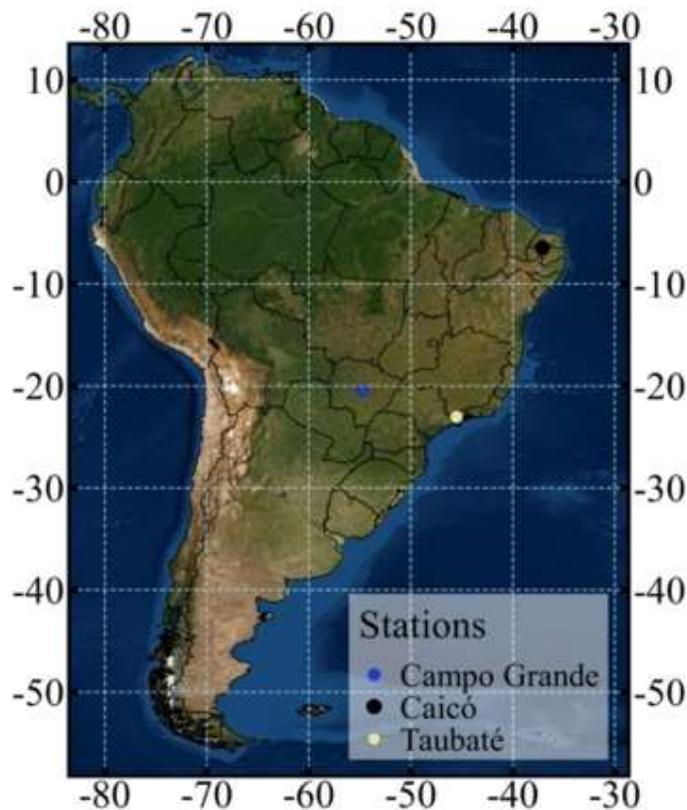
Nesta seção, serão apresentados os dados observados e os dados de reanálise que fazem parte da análise de validação do uso de dados de reanálise para estimativa de radiação solar em diferentes regiões do Brasil. Também serão definidos os métodos de avaliação utilizados para essa validação.

#### **3.1 Observações e Conjunto de Dados de Reanálise**

Inicialmente, três locais diferentes foram escolhidos a partir de estações com medições de radiação solar utilizando dados observacionais (2001-2019) coletados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). A escolha foi feita de acordo com sua representatividade na posição climática e geográfica do Brasil. A localidade de Caicó, no Estado do Rio Grande do Norte (Fig. 1), devido à sua localização próxima ao equador e seu regime de precipitação bem definido, com pouca precipitação durante a maior parte do ano, sendo a máxima no mês de março, com média de 99 mm, e precipitação mínima entre os meses de agosto e novembro, quando o total médio dos quatro meses atinge o acumulado de 12 mm, a média anual é de 377 mm. Campo Grande, no estado de Mato Grosso do Sul, na região mais central da América do Sul (Figura 1), apresenta uma distribuição mais homogênea de precipitação, com máxima em janeiro de 234 mm, e mínima em julho de 30 mm, sendo a média anual de 1573 mm. Taubaté, no estado de São Paulo (Fig. 1), está localizada entre as montanhas da Mantiqueira e da Serra do Mar, com precipitação anual média de 1592 mm, com máxima em janeiro de 299 mm e

mínima de precipitação em junho, 30 mm. As três estações escolhidas possuem mais de 12 anos de dados (Tabela 1), considerado um conjunto representativo para o presente estudo.

**Figura 1:** Localização das estações utilizadas neste estudo. Estação de Caicó (preto), estação de Campo Grande (azul) e estação de Taubaté (branco).



Fonte: Produção do autor.

**Tabela 2.** Informações sobre as estações meteorológicas.

Estações	Latitude, Longitude e Altitude	Período de dados
Caicó, RN	-6.47; -37.09; 171.3 m	Jan. 2007 até Dez. 2019
Campo Grande, MS	-20.45; -54.72; 528.5 m	Out. 2001 até Dez. 2019
Taubaté, SP	-23.04; -45.52; 582,3 m	Dez. 2006 até Dez. 2019

Fonte: Produção do autor.



O conjunto de dados de reanálise utilizado neste estudo é a segunda geração da Análise Retrospectiva para Pesquisa e Aplicações da Era Moderna (MERRA-2) pelo GMAO da NASA (National Aeronautics and Space Administration, Global Modeling and Assimilation Office). Ao contrário de qualquer outra reanálise atmosférica de longo prazo produzida anteriormente, o MERRA-2 inclui campos de aerossol on-line, que interagem com campos de radiação do modelo, ou seja, representando os efeitos diretos e semi-diretos dos aerossóis (Gelaro et al. 2017). A resolução espacial dos dados MERRA-2 é de  $0,5^\circ$ , ou aproximadamente 50 km, com resolução temporal horária. As variáveis utilizadas são o Surface Net Downward Shortwave Flux (SWGNT), Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo nenhum aerossol (SWGNTCLN), Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo céu claro (SWGNTCLR) e o Surface Net Downward Shortwave Flux assumindo céu claro e sem aerossol (SWGNTCLRCLN), e para fins de comparação e avaliar a influencia direta dos aerossóis são utilizados os dados de AOD (Profundidade Óptica dos Aerossóis). O mesmo método de interpolação bilinear é usado para estimar a irradiação solar do MERRA-2 até a localização da estação.

Para avaliar os produtos de reanálise, são utilizadas algumas avaliações estatísticas. São calculadas quatro quantidades – Média mensal, Média Diurna, Coeficiente de Correlação (equação 1), Desvio Padrão (equação 2) e raiz do erro quadrático médio (equação 3).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})}} \quad (1)$$

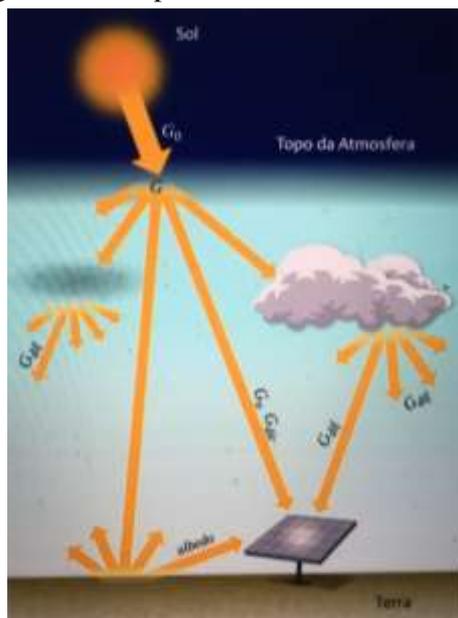
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

Onde x representa a grandeza estimada e y observada, dos dados de irradiação global.

A base de dados do presente projeto será composta de dados de estações meteorológicas de superfície, mais especificamente de dados radiométricos, de irradiação solar, das estações disponíveis nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (tabela 1), que tem sua aplicação direta no uso de geração de energia solar (Figura 2). Também serão utilizados os dados das reanálises MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*, version 2, Gelaro et al. 2017).

Figura 2 – Componentes da Irradiância Solar.



Fonte: Pereira et al., 2017.

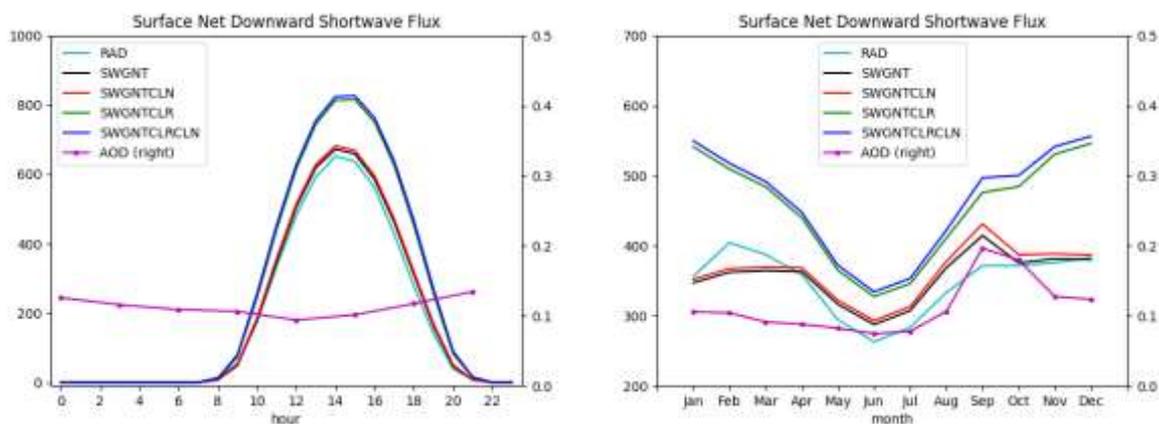
A reanálise MERRA-2 é uma reanálise atmosférica produzida pelo Grupo de Modelagem Global e Assimilação (*Global Modeling and Assimilation Office - GMAO*) da Agência Espacial Americana (*National Aeronautics Space Administration - NASA*). O MERRA-2 inclui alterações e desenvolvimentos do sistema em modelagem e assimilação de dados com novas observações não disponíveis para a primeira análise retrospectiva do MERRA (Gelaro et al., 2017). O MERRA-2 inclui a assimilação de dados de aerossóis, na

qual observações meteorológicas são assimiladas dentro de um sistema global de assimilação. O sistema usa o GEOS-5 (*Goddard Earth Observing System*, versão 5.12.4) e o sistema de assimilação de dados GSI (*Gridded Statistical Interpolation System*). O modelo inclui o núcleo dinâmico de Volumes Finitos com discretização horizontal na esfera cúbica, com resolução aproximada de  $0,5^\circ \times 0,625^\circ$  e 72 níveis na vertical (Gelaro et al., 2017).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Taubaté apresenta um comportamento clássico onde os resultados da reanálise, considerando céu com nebulosidade e aerossóis está próximo ao observado. No ciclo anual pode ser observado uma leve subestimação durante o mês de fevereiro e uma leve superestimação durante os meses de inverno e primavera. O comportamento do campo de irradiação solar gerado pelo modelo apresenta um comportamento muito semelhante quando é considerado a nebulosidade e aerossol, bem como céu claro e sem aerossol, com as maiores diferenças no mês de setembro, onde o AOD também apresenta um pico, possivelmente associado com as queimadas da região Amazônica.

Figura 3 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Taubaté (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).



Fonte: Produção do autor.

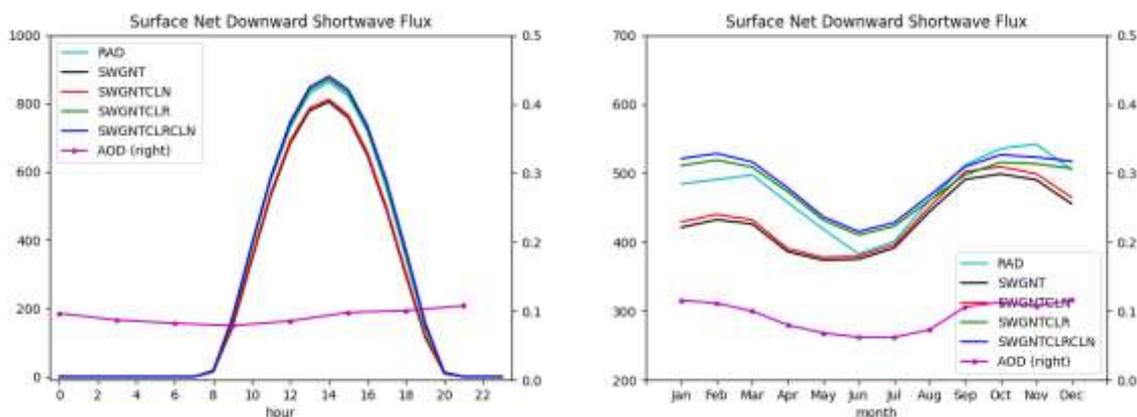


A estação de Caicó se encontra em uma região com um clima quase desértico, a região tem muito pouca nebulosidade e livre dos efeitos da poluição das queimadas. O comportamento diurno da irradiação solar é muito bem representado pelos dados de reanálise de MERRA-2, com um detalhe importante, está bem representado pela irradiação solar do modelo considerando céu claro e céu claro e sem aerossol, comportamento bem diferente do apresentado pela estação de Taubaté. O modelo quando considera os efeitos de nebulosidade e nebulosidade sem aerossóis subestima os valores de radiação observada no ciclo diurno.

No ciclo anual a irradiação solar estimada pelo modelo considerando céu com nebulosidade subestima a irradiação solar observada. É interessante observar que o modelo aproxima os valores na segunda metade do ano, desprezando os efeitos de nebulosidade e de aerossóis, ainda assim subestimando os valores observados no mês de novembro.

Esse comportamento de proximidade dos valores observados com o resultado do modelo considerando céu claro e sem aerossol pode estar associado à baixa precipitação da região, e pouca nebulosidade. Analisando os resultados do modelo, a partir de julho, observa-se a proximidade de todos os valores considerando céu claro, uma vez que é um período muito seco, com precipitações trimestrais abaixo de 15mm.

Figura 4 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Caicó (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).





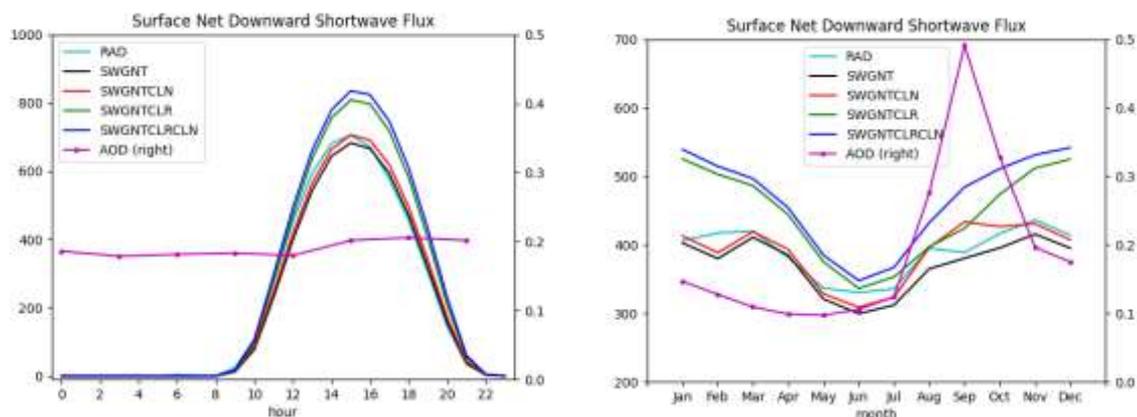
MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



Fonte: Produção do autor.

A estação de Campo Grande está localizada a cerca de 20°S e 55°O, na região central da América do Sul, com uma precipitação média anual é de 1573 mm. O ciclo diurno é similar ao de Taubaté, com valores muito próximos aos resultados do modelo considerando céu com nebulosidade, mas sem nenhum aerossol, e distante dos valores que consideram céu claro, sem nebulosidade. No ciclo anual observa-se uma subestimação durante o mês de fevereiro, sem uma possível explicação para essa diminuição nos valores quando considera nebulosidade. Nos meses de maio a julho, onde os resultados do modelo subestimam o valor observado novamente. Uma situação muito interessante ocorre na estação de Campo Grande durante o segundo semestre, onde os valores que não levam em conta os aerossóis ficam mais próximos do que foi observado, mesmo quando se considera céu claro e com aerossóis. Isso se deve ao fato de que essa região é fortemente influenciada pelos incêndios que ocorrem na Amazônia durante os meses de julho, agosto e setembro. Quando se analisam os dados de AOD fica mais clara essa influência, pois os maiores valores de AOD ocorrem nos meses de agosto-outubro, com um pico no mês de setembro, o qual é inversamente correlacionado com os dados observados de radiação, que sofre uma queda.

Figura 5 - O padrão diurno médio (a) e a média mensal de irradiação solar observada (b) sobre a estação de Campo Grande (linha verde claro). As estimativas de irradiação solar da reanálise MERRA-2 SWGNT (linha preta), SWGNTCLN (linha vermelha), SWGNTCLR (verde escuro) e SWGNTCLRCLN (linha azul), respectivamente. A linha rosa representa o AOD (Profundidade Óptica do Aerossol).

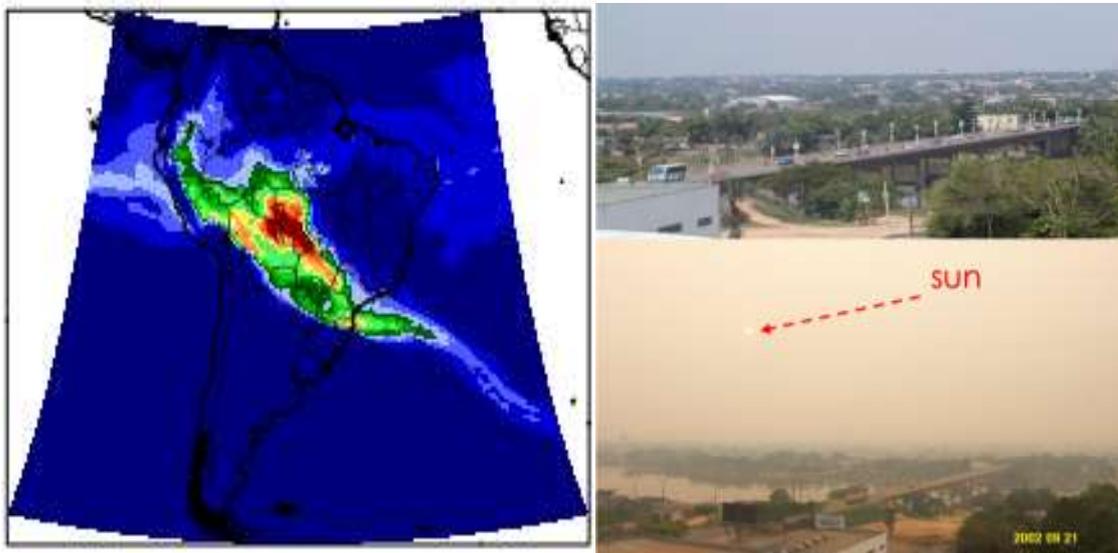


Fonte: Produção do autor.

É importante ressaltar que a região de Campo Grande está sob forte influência da pluma de poluição dos incêndios da região amazônica, que ocorre durante os meses de estiagem (julho, agosto e setembro), influenciando os valores observados da irradiação solar. Esta é a estação onde fica muito claro o impacto dos aerossóis nos resultados do modelo, especialmente na estação seca, com um aumento significativo dos valores de AOD durante os meses de agosto-outubro. Na figura 6, você pode ver o impacto na visibilidade quando se considera dias limpos e dias poluídos na região de Rondonia, que está no mesmo corredor de poluição de Campo Grande.

Também é possível observar que a pluma de poluição não afeta a região de Caicó e tem pouca influência na região de Taubaté. Essa situação pode ser observada nos gráficos anuais de irradiação solar.

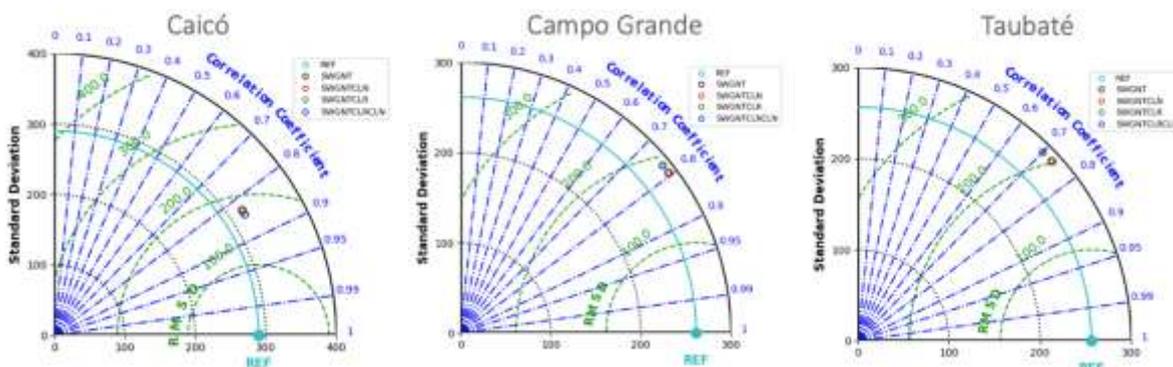
Figura 6 – a) Pluma de poluição poluente em setembro e b) comparação de um dia com o céu limpo e com o céu poluído em Ji-Paraná RO (estação seca - 21/09/2002).



Fonte: a) Angel et al. 2021 (BAMS) e b) CPTEC/INPE Website.

A Fig. 7 resume os resultados com o diagrama de Taylor, onde se observa que a maior correlação e o menor desvio padrão ocorre para a estação Caicó (Fig. 7a), onde a série que melhor representa os valores observados é a série que considera céu claro e sem aerossol, pois é uma região com menor taxa de precipitação e nebulosidade e com menor volume de aerossóis. As estações de Campo Grande e Taubaté apresentam valores semelhantes de desvio padrão e coeficiente de correlação, com valores ligeiramente melhores para Campo Grande.

Figura 7 - Diagramas de Taylor para a correlação média anual e desvio padrão das estações Caicó (a), Campo Grande (b) e Taubaté (c), utilizando como referência a irradiação solar observada.



Fonte: Produção do autor.



## 5. CONCLUSÕES

Os dados de três estações de dados foram comparados com estimativas de dados de reanálise, onde a cobertura de nuvens e o efeito dos aerossóis foram levadas em consideração. Observou-se comportamento diferente para as três estações, sendo que a estação de Caicó, com baixos índices de precipitação e sem poluição, teve os valores estimados mais próximos de céu claro e sem aerossol. A estação de Taubaté mostrou um comportamento regular com valores próximos ao esperado considerando a influência da nebulosidade. A estação de Campo Grande apresentou um comportamento próximo às duas estações, com períodos de valores próximos ao esperado, quando se considera céu com nebulosidade também, e um segundo período com comportamento mais próximo aos dados com céu claro, devido à influência das queimadas na região da Amazônia. No entanto, apesar dos resultados serem satisfatórios, mais estações serão incluídas no estudo para uma melhor amostragem dos dados.

Portanto, existem algumas diferenças da irradiação solar observada com os dados de reanálise, o que geralmente é causado pela falta de capacidade dos modelos em representar a fração de nuvens e aerossóis atmosféricos.

## 6. ETAPAS FUTURAS

Durante a próxima fase do presente projeto será dada continuidade à validação dos dados de reanálise MERRA-2, de acordo com as seguintes etapas:

- Seleção de estações meteorológicas em outras regiões do Brasil para ter uma melhor visualização da influência dos aerossóis e da nebulosidade;
- Obtenção dos dados da reanálise MERRA-2 relacionados aos dados observados que serão incluídos;
- Validação dos dados de reanálise;
- Análise dos resultados;
- Publicação dos resultados;



### **Cronograma de Atividades:**

- Setembro/outubro: Seleção dos dados observados;
- Novembro: Obtenção dos dados de reanálise;
- Dezembro: Controle de qualidade dos dados observados;
- Janeiro/fevereiro/Março: Validação das reanálises;
- Abril/maio/junho: Análise dos resultados;
- Julho/agosto: Publicação dos resultados;

### **Referências bibliográficas**

Boilley, A., Wald, L., 2015. Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy* 75(Supplement C), 135-143.

Feng, F. and Wang, K.C. (2018) Merging satellite retrievals and reanalyses to produce global long-term and consistent surface incident solar radiation datasets. *Remote Sensing*, 10, 115.

Gelaro, R., and Coauthors, 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419–5454, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al (2019) Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsl* 159:17–24. <https://doi.org/10.21957/vf291hehd7>.

Martins, F.R., Pereira, E.B., Abreu, S.L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA Project. *Solar Energy, Phoenix* v.81, p.517-528, 2007.

Pereira, E.B.; Abreu, S.L.; Stuhlmann, R.R.; Colle, S. Survey of The Incident Solar Radiation in Brazil by use of Meteosat Satellite Data. *Solar Energy, Inglaterra*, v. 57, n.2, p. 125-132, 1996.

Pereira, et.al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2.a Edição, 2017.

Sianturi, Y.; Marjuki, and Sartika, K. Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. *AIP Conference Proceedings* 2223, 020002 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0000854>

Silveira Júnior, C. R., Luiz, G. C., Barbosa, G. A. S., and Sousa, L. G. C.: Aerosol Influence on Photovoltaic Solar Energy Generation for the State of Goiás (Brazil), *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3/W12-2020, 413–418, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-413-2020>, 2020.



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



Tahir, Z.; M. Ali, S. Ahmad, M. Asim, N. Hayat, M. Azhar, and A. Hussain, “Evaluation of Solar Radiation from MERRA, MERRA-2, ERA-Interim and CFSR Reanalysis Datasets Against Surface Observations for Multan, Pakistan,” in *12th International Conference Solar Energy for Buildings and Industry, EuroSun 2018 Conference Proceedings*, (International Solar Energy Society, Freiburg im Breisgau, Germany, 2018).

Yamasoe, M. A., Rosário, N. M. É., Almeida, S. N. S. M., and Wild, M.: Fifty-six years of surface solar radiation and sunshine duration over São Paulo, Brazil: 1961–2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 6593–6603, <https://doi.org/10.5194/acp-21-6593-2021>, 2021.