

VALIDAÇÃO DA BASE DE DADOS NSRDB DE ESPECTRO DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE PETROLINA – BRASIL

Janis Joplim Bezerra Galdino¹, Olga de Castro Vilela¹, Naum Fraidenraich¹, Christian Gueymard²

¹Centro de Energias Renováveis – Departamento de Energia Nuclear – Centro de Tecnologias e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco

²Solar Consulting Services - Colebrook, NH 03576, Estados Unidos.

e-mail: janis.joplim@ufpe.br

RESUMO: Com a disponibilidade de dados do espectro da irradiância solar proveniente da NREL-NSRDB englobando toda a América do Sul, torna-se importante a validação dessa base para regiões com dados observacionais. O presente trabalho analisa o desempenho da simulação da NSRDB do espectro da irradiância global horizontal para Petrolina, cidade localizada no semiárido do nordeste brasileiro. A validação engloba as sincronizações temporal e de comprimentos de onda dos dados da NSRDB e observados, e também a aplicação de um filtro gaussiano para casar a resolução do espectro de GHI simulado com a dos espectralradiômetros utilizados para as medições no intervalo de 300 a 1700 nm. Os dados da NSRDB foram analisados de forma global, por faixa do espectro solar (ultravioleta, visível e infravermelho) e para os momentos de céu claro. A irradiância obtida através da integral do espectro de GHI também foi avaliada. Para 4408 espectros observados entre os anos de 2018 e 2021, os valores de RMSE normalizado para o espectro de GHI variou de 16,03 % para os momentos de céu claro e 52,80 % para todos os céus, indicando que a acurácia do modelo da NSRDB é significativamente afetada pela cobertura de nuvens sob o clima de Petrolina.

Palavras chave: espectro da irradiância solar, NSRDB, radiação solar, energia solar, espectralradiômetro.

INTRODUÇÃO

A radiação solar é um conjunto de ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol distribuídas em uma faixa de comprimentos de onda (ou frequências), que vai desde aproximadamente 200 a 4000 nm. Para o estudo do comportamento da radiação solar, a irradiância global horizontal (GHI) é uma variável imprescindível, sendo comumente medida em estações solarimétricas ou meteorológicas através de piranômetros. Porém, seu valor representa a integral (soma) das energias de todas as ondas eletromagnéticas dentro da sua faixa de medição. A irradiância espectral, medida através de um espectralradiômetro, descreve com maior detalhamento a radiação solar, já que fornece a distribuição da irradiância ao longo dos comprimentos de onda. Esse detalhamento permite entender melhor as interações dos materiais com a radiação, já que as propriedades de absorção, transmitância, espalhamento, reflexão e emissão de cada material variam de acordo com o comprimento de onda. Dados do espectro da radiação solar são importantes em diversas aplicações como nos estudos das mudanças climáticas (Xu e Cui, 2021; Bornman et al., 2019), nos impactos da radiação na vida terrestre (Benelli et al., 2020; Miyauchi e Nakajima, 2016), na ciência e tecnologia dos materiais e na avaliação da geração de energia solar (Polo et al., 2017; Dirnberger et al., 2015).

Contudo, dados observacionais da irradiância espectral são raros, pois não é comum ter em estações solarimétricas instrumentos de medição do espectro solar, como espectralradiômetros. Para contornar isso, foram desenvolvidos modelos para simulação da irradiância solar espectral. Os mais difundidos na literatura possuem uma abordagem física, baseada na resolução de equações de transferência radiativa da atmosfera, como o libRadtran (Mayer et al., 2012) e o SMARTS (*Simplified Model of Atmospheric*

Radiative Transfer of Sunshine; Gueymard, 1995; Gueymard, 2019), que empregam vários parâmetros atmosféricos como entrada, como quantidade de água precipitável, profundidade óptica de aerossóis (AOD, *Aerosol Optical Depth*) e concentração de gases atmosféricos (por exemplo, ozônio). Por sua vez, esses parâmetros atmosféricos costumam ser obtidos através de fotômetros solares em estações terrestres (por exemplo, estações AERONET – *Aerosol Robotic Network*), sensores de satélite, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites AQUA e TERRA ou por modelos de reanálise da circulação global da atmosfera, como a CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*) e o MERRA-2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*). Com a finalidade de fornecer informações mais detalhadas da radiação solar, o centro de pesquisa americano NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) criou a base de dados NSRDB (*National Solar Radiation Database*) que disponibiliza gratuitamente dados da irradiância espectral para qualquer ângulo de incidência, empregando dados do MERRA-2 para parâmetros atmosféricos e as imagens do satélite geostacionário GOES para obter informações sobre cobertura e tipo de nuvens. A NSRDB combina as simulações de irradiância espectral de céu claro do SMARTS com a parametrização robusta dos efeitos das nuvens do libRadtran para simular a irradiância espectral com os efeitos da cobertura de nuvens através do modelo FARMS-NIT (*Fast All-Sky Model for Solar Applications – Narrowband Irradiance on Tilted-Surface*; Xie e Sengupta, 2018; Xie et al., 2019). Como saída, a NSRDB é capaz de fornecer simulações do espectro em escala horária para 450 ângulos de visão do céu em 2002 comprimentos de onda, de 0,28 μm até 4 μm (Xie et al., 2019). Diversos estudos utilizaram a base de dados da NSRDB em diferentes aplicações. Em relação à energia fotovoltaica, Ripalda et al. (2020) calcularam para os Estados Unidos o impacto do espectro solar na produção de energia de módulos silício cristalino (c-Si), perovskita e telureto de cádmio (CdTe) em sistemas fixos e com rastreamento, usando como base os dados de espectro da NSRDB. Trabalhos similares foram realizados analisando o impacto do espectro em módulos de multijunção (Warmann e Atwater, 2016; Warmann e Atwater, 2019) e expandindo a avaliação para outros lugares na América Central e do Sul (Kinsey, 2021).

A validação da base de dados de irradiância espectral da NSRDB é importante para garantir confiabilidade aos estudos que a utiliza, avaliando se ela representa bem o comportamento da localidade de interesse. Pelland e Gueymard (2022) compararam os espectros médios para o ano de 2014 para a cidade de Golden nos EUA obtidos através de medições com um espectroradiômetro EKO WISER e por meio da base de dados NSRDB e observaram que o espectro simulado superestima a irradiância abaixo de 500 nm e subestima para comprimentos de onda maiores. Eles apontam como uma possível causa uma subestimação dos valores de AOD e/ou uma baixa acurácia dos modelos de transmitância de aerossol. Resultados similares também verificados por Xie et al. (2021) para outras localidades dos EUA. Por ter inicialmente sido disponibilizado para o território estadunidense, grande parte dos estudos científicos que utilizam a base da NSRDB se concentram nessa região. Porém, atualmente sua área de cobertura inclui também toda a América do Sul. Como uma maneira de ampliar os estudos sobre a base de dados da NSRDB de irradiância espectral, o objetivo deste trabalho é verificar a acurácia das simulações em representar o espectro de GHI para a cidade de Petrolina, localizada na região do semiárido do nordeste do Brasil. Para isso, foram utilizados dados observacionais do espectro de GHI desde o ano de 2018 até 2021, incluindo dias de céu claro e com cobertura de nuvens.

METODOLOGIA

Origem dos dados

Os dados observacionais utilizados neste estudo são provenientes da estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina, localizada no estado de Pernambuco, no semiárido do nordeste brasileiro, cujas coordenadas geográficas são latitude -9.39° , longitude -40.5° , altitude s.n.m. 387 metros. Além de instrumentos para medição de dados radiométricos e meteorológicos, a estação solarimétrica possui dois espectroradiômetros EKO WISER nos modelos MS-711 e MS-712, mostrados na Figura 1. Juntos, os espectroradiômetros fornecem medições do espectro de GHI compreendendo a faixa de 300 a 1700 nm, com intervalo de 1 nm. A série temporal dos dados observacionais incluem 425 dias entre o período de setembro de 2018 até dezembro de 2021 com resolução temporal de 1 minuto.

Para obter os dados do espectro de GHI da base de dados da NSRDB, é necessário realizar uma solicitação no site da plataforma (<<https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>>) selecionando a opção “*Spectral On-demand*”, fornecendo informações sobre as coordenadas geográficas do local de interesse e para qual ano se deseja obter os dados. O modelo FARMS-NIT do NSRDB pode ser aplicado para gerar os espectros de irradiância solar para planos com diversas inclinações, com opção de utilizar um plano fixo (*fixed tilted*) ou realizar rastreamento solar de um eixo (*1 axis tracking*). Como os dados observacionais são exclusivamente de GHI, foram selecionadas as opções para obter o espectro para o plano horizontal para os anos de 2018 a 2021. A base de dados da NSRDB fornece dados horários em tempo universal coordenado (UTC), baseados nas imagens fornecidas pelo satélite GOES. O espectro de GHI da NSRDB está compreendido na mesma faixa simulada pelo SMARTS, de 280-4000 nm com resolução variável ao longo dos comprimentos de onda, 0,5 nm para a faixa de 280-400 nm, 1 nm para a faixa de 400-1700 nm, e 5 nm para a faixa de 1700-4000 nm.



Figura 1: Espectroradiômetros EKO WISER nos modelos MS-711 (à esquerda) e MS-712 (à direita) da Plataforma Solar de Petrolina.

Validação da base de dados NSRDB

Os dados observacionais da Plataforma Solar de Petrolina e as simulações da NSRDB possuem diferenças tanto em relação à resolução temporal quanto à resolução em comprimentos de onda. As medições da irradiância espectral da Plataforma Solar de Petrolina estão registradas em horário local (GMT -3) enquanto que a base de dados NSRDB está em UTC. Por essa razão, foi necessário primeiramente sincronizar as duas bases de dados. Além disso, os espectroradiômetros (MS-711 e MS-712) possuem resolução de 6,5 nm, que é diferente da NSRDB, como descrito anteriormente. Apesar de os dados observacionais terem um intervalo de 1 nm, a medição de um dado comprimento de onda também leva em consideração as medições da irradiância nos comprimentos de onda vizinhos, de acordo com a resolução do instrumento (Xue et al., 2021). Por isso, foi aplicado um filtro gaussiano nos dados da NSRDB, utilizando como parâmetro de largura completa na metade do máximo (FWHM, do inglês, *Full Width at Half Maximum*) de 6,5 nm. As Equações 1 a 4 descrevem o procedimento realizado para aplicar o filtro gaussiano nos dados da NSRDB (Gueymard, 2001). A Figura 2 mostra um exemplo da irradiância espectral da NSRDB com e sem a aplicação do filtro gaussiano.

$$W(\lambda) = \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_c)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma = FWHM \cdot (8 \ln(2))^{-0,5} \cong 2,76 \quad (2)$$

$$\bar{X}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda_c - \Delta\lambda}^{\lambda_c + \Delta\lambda} W(\lambda)X(\lambda)}{\sum_{\lambda_c - \Delta\lambda}^{\lambda_c + \Delta\lambda} W(\lambda)} \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = \frac{FWHM}{d\lambda} + 3 \quad (4)$$

onde:

λ = comprimento de onda

λ_c = comprimento de onda onde ocorre o pico da irradiância

$d\lambda$ = intervalo entre dois comprimentos de onda consecutivos, neste caso, 1 nm

$W(\lambda)$ = operador do filtro gaussiano para o comprimento de onda λ

$X(\lambda)$ = valor da irradiância para o comprimento de onda λ

$\bar{X}(\lambda)$ = valor da irradiância para o comprimento de onda λ após aplicação do filtro

Após a aplicação do filtro gaussiano, foi realizada a sincronização dos comprimentos de onda dos espectros da NSRDB com a observação, sendo selecionados dos dados da NSRDB somente os valores para os comprimentos de onda entre 300 nm a 1700 nm em um intervalo de 1 nm. O procedimento da validação da base de dados NSRDB do espectro de GHI está descrito na Figura 3.

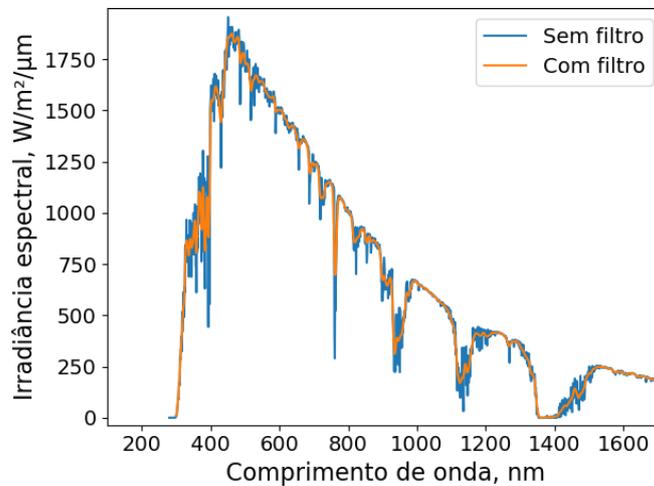


Figura 2: Irradiância espectral da NSRDB com e sem a aplicação do filtro gaussiano.

Para a validação do espectro de GHI da NSRDB para Petrolina, foram utilizados os estatísticos RMSE (*Root Mean Squared Error*), nRMSE (RMSE normalizado pela média da observação), MBE (*Mean Bias Error*), razão dos desvios padrões entre as bases de dados (STDr) e o coeficiente de correlação (COR). A irradiância integrada resultante das duas bases de dados também foi comparada. A avaliação dos dados do espectro de GHI da NSRDB foi realizada de forma global e de acordo com as regiões do espectro solar (ultravioleta – UV, comprimento de onda até 400 nm; visível – VIS, comprimento de onda entre 400 e 700 nm; e infravermelho – IV, comprimento de onda a partir de 700 nm). Além disso, utilizando o algoritmo Bright-Sun (Bright et al., 2020) e as medições de GHI da estação solarimétrica da Plataforma Solar de Petrolina, foram detectados os momentos de céu claro para avaliar a representatividade da base de dados NSRDB para esses instantes.



Figura 3: Procedimento de validação da base de dados NSRDB para Petrolina.

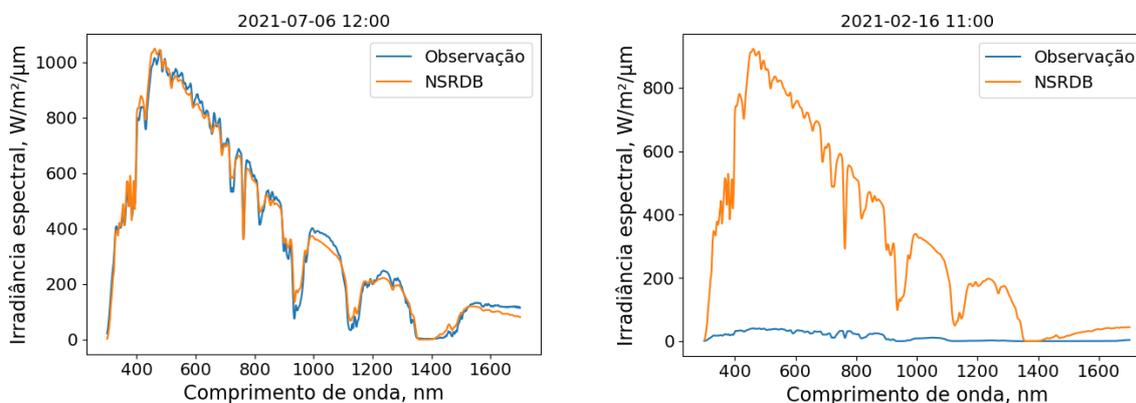
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após os procedimentos de sincronização temporal e de comprimentos de onda, ao todo foram analisados 4408 espectros de GHI, dentre eles 270 foram detectados como momentos de céu claro pelo algoritmo Bright-Sun. A Tabela 1 mostra os estatísticos obtidos na validação dos dados de espectro de GHI da NSRDB para a cidade de Petrolina para todos os céus e somente para os momentos de céu claro, mostrando separadamente a análise para as regiões UV, VIS e IV do espectro solar. Pode-se observar que a NSRDB apresenta um aumento significativo no erro e uma piora nos outros estatísticos (correlação e razão de desvios padrões) para todos os céus em relação aos momentos de céu claro, com o nRMSE passando de 16,03 % para 52,80 %. Além disso, de modo geral, a NSRDB tem um desempenho pior para reproduzir a faixa de radiação IV, mas, ao analisar somente os momentos de céu claro, o erro maior está na região do UV. Em ambos os casos, a faixa de radiação VIS apresenta o melhor desempenho.

Tabela 1: Estatísticos da validação da base de dados da NSRDB para espectro de GHI para a cidade de Petrolina para todos os céus e para os momentos de céu claro.

TODOS OS CÉUS					
Faixa	RMSE (W/m ² /μm)	nRMSE (%)	MBE (W/m ² /μm)	COR	STDr
UV	163.01	50.09	84.58	0.84	1.18
VIS	331.09	40.33	57.89	0.79	0.85
IV	127.19	55.12	14.53	0.76	0.88
Total	192.19	52.80	28.86	0.78	0.95
CÉU CLARO					
Faixa	RMSE (W/m ² /μm)	nRMSE (%)	MBE (W/m ² /μm)	COR	STDr
UV	101.49	36.59	73.20	0.98	1.23
VIS	78.51	10.57	-1.30	0.99	0.99
IV	31.13	15.39	-6.67	0.99	0.93
Total	53.35	16.03	0.24	0.99	0.98

A Figura 4 mostra alguns espectros de GHI observados e obtidos pela NSRDB com destaque para os instantes de menor nRMSE, 6,93 % (Figura 4-a), e maior nRMSE, 3314,01 % (Figura 4-b), para um instante com alta cobertura de nuvens em que a NSRDB simulou incorretamente ser um momento de céu claro. Os outros instantes mostrados nas Figura 4-c e Figura 4-d apresentam um nRMSE de 41,90 % e 10,90 %, respectivamente. Nota-se que os erros bastante elevados foram provocados majoritariamente por uma baixa acurácia na simulação da cobertura de nuvens e, possivelmente, pela incerteza causada por, por exemplo, nos dados de entradas de aerossóis. Além disso, para os momentos em que a NSRDB conseguiu reproduzir bem o comportamento do espectro local, observa-se uma tendência de superestimação para a faixa de radiação abaixo de 500 nm e subestimação para regiões de comprimento de onda maiores, o que pode também ser visto no MBE apresentado na Tabela 1 para momentos de céu claro (negativo para região de radiação IV e positivo para a UV). Resultados similares foram reportados em Pelland e Gueymard (2022) e Xie et al. (2021), que indicaram como possível causa a simulação da transmitância de aerossóis.



a)

b)

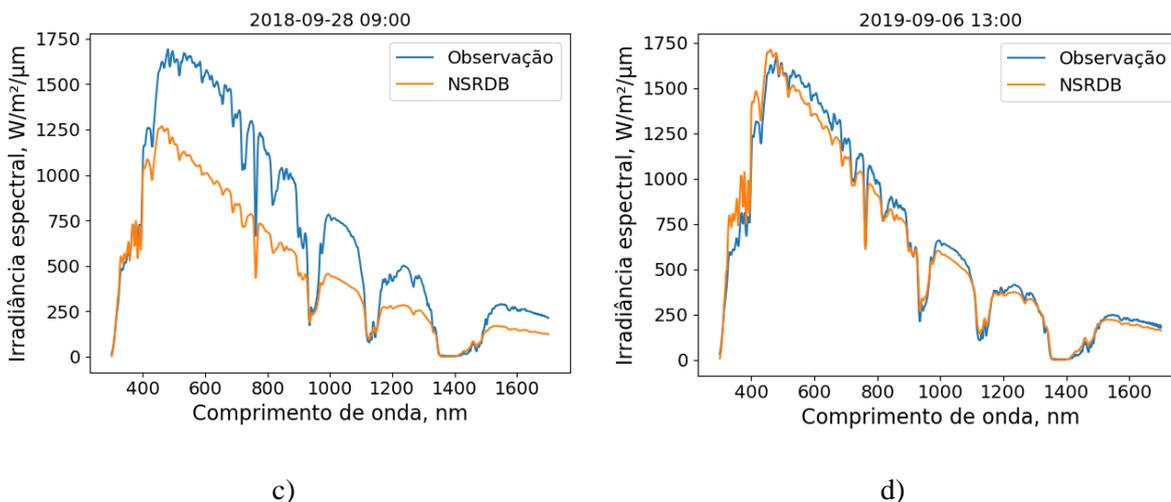


Figura 4: Espectros de GHI observados e obtidos pela NSRDB para os instantes de a) 06/07/2021 às 12h00 com $nRMSE$ de 6,93 %; b) 16/02/2021 às 11h00 com $nRMSE$ de 3314,01 %; c) 28/09/2018 às 09h00 com $nRMSE$ de 41,90 %; e d) 06/09/2019 às 13h00 com $nRMSE$ de 10,90 %.

Os valores de $nRMSE$ também foram discriminados de acordo com o comprimento de onda, como mostra a Figura 5. Pode-se observar erros bastante elevados, até superiores a 100 % em algumas regiões do espectro, onde há absorção por ozônio (abaixo de 330 nm) e por vapor d'água (acima de 800 nm), resultando em valores muito baixos de irradiância e, conseqüentemente, valores muito altos de $nRMSE$ ao se realizar a normalização. Ao se observar o comportamento global, nota-se que o $nRMSE$ se mantém em um valor médio de um pouco mais de 40 % para todos os céus e 10 % para os momentos de céu claro, com um pico na região do UV.

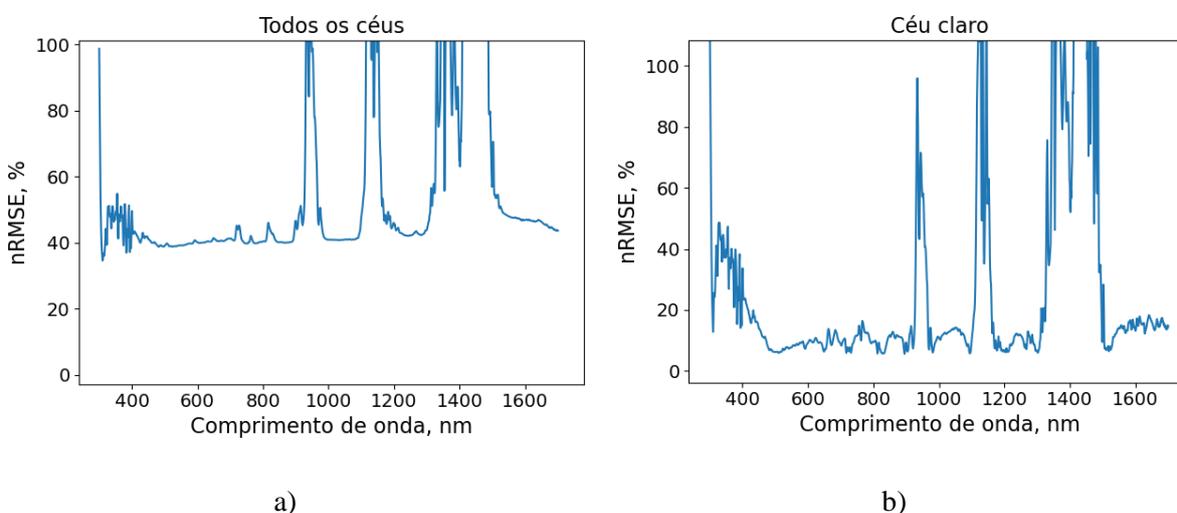


Figura 5: $nRMSE$ do espectro de GHI a base de dados da NSRDB distribuído por comprimento de onda.

Além disso, foi verificada uma tendência no aumento do $nRMSE$ com a massa de ar, como mostra a Figura 6. Resultados similares foram reportados por Galdino et al. (2022) para simulações do espectro de GHI realizadas com o SMARTS para a Plataforma Solar de Petrolina. Esse aumento no $nRMSE$ possivelmente está relacionado com a propagação de erros de imprecisão ou baixa acurácia nos parâmetros atmosféricos de entrada para a simulação do SMARTS.

Foram analisados também os valores de irradiância obtidos a partir da integral do espectro de GHI para o intervalo de 300-1700 nm. A Figura 7 mostra a comparação entre a irradiância integrada observada e obtida pela NSRDB para um período da série temporal e a Tabela 2 mostra os estatísticos encontrados

através desta validação para todos os céus e somente para os momentos de céu claro. Pode-se observar que a NSRDB consegue reproduzir muito bem o comportamento da irradiância integrada de GHI para os momentos de céu claro, com um nRMSE baixo, 5,34 %, porém, ao analisar todos os céus, o nRMSE passa para 40,70 %, indicando mais uma vez dificuldades em obter informações precisas em relação à real cobertura de nuvens e/ou seus efeitos no espectro solar.

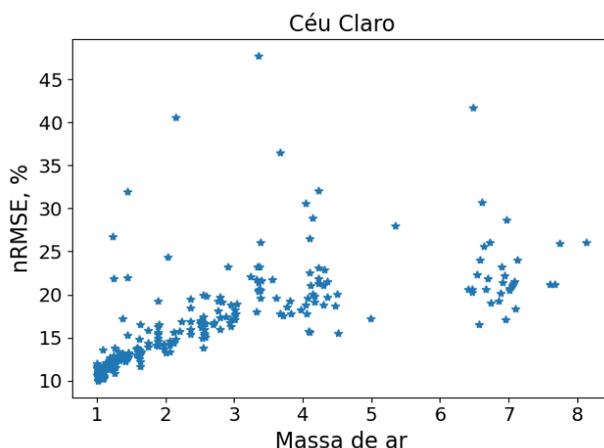


Figura 6: Variação do nRMSE com a massa de ar para os momentos de céu claro.

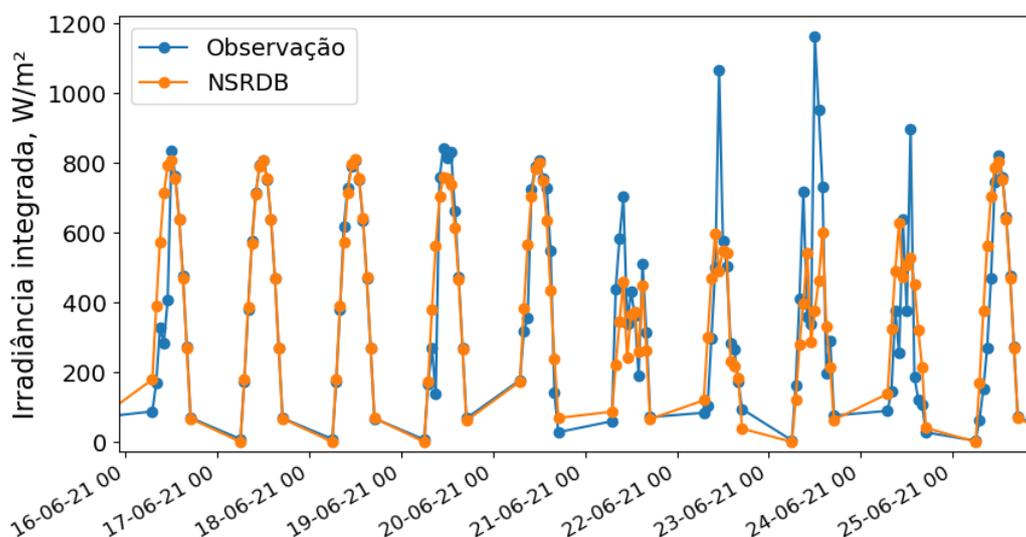


Figura 7: Irradiância integrada dos espectros de GHI observados e obtidos da NSRDB.

Tabela 2: Estatísticos da validação da NSRDB para integral do espectro de GHI para a cidade de Petrolina para todos os céus e para os momentos de céu claro.

Irradiância integrada					
	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	MBE (W/m ²)	COR	STDr
Todos os céus	207,50	40,70	40,45	0,78	0,84
Céu claro	24,90	5,34	0,34	0,99	0,99

CONCLUSÕES

A validação realizada neste trabalho contribuiu para os estudos da irradiância solar espectral na região do semiárido do nordeste brasileiro, avaliando a base de dados NSRDB que está disponível para toda a

América. Além disso, poucos trabalhos utilizaram os dados de espectro da NSRDB para locais diferentes dos Estados Unidos, os resultados aqui apresentados colaboram para a avaliação desta base.

A saída do NSRDB foi significativamente melhor para os momentos de céu claro em comparação com todos os céus, tanto em relação ao espectro de GHI e à irradiância integrada, o que indica que há uma baixa acurácia no modelo FARMS-NIT em simular o efeito das nuvens no espectro solar, causada principalmente em falhas classificação dos instantes em céu claro ou com cobertura de nuvens. Os valores de nRMSE para o espectro de GHI foi de 52,80 % e 16,03 % para todos os céus e para momentos de céu claro, respectivamente. Foi observada também uma tendência de aumento do erro do espectro da NSRDB para massas de ar mais elevadas. Considerando a irradiância integrada entre 300 e 1700 nm, o valor de nRMSE encontrado foi baixo, 5,34 %, para momentos de céu claro, mas passa para 40,70 % quando se leva em consideração todos os céus.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio do projeto 23076.009704/2020-56 no âmbito do Programa de P&D ANEEL, como também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio aos bolsistas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares -PROTEN.

REFERÊNCIAS

- Benelli, A., Cevoli, C., & Fabbri, A. (2020). In-field hyperspectral imaging: An overview on the ground-based applications in agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, 51(3), 129-139.
- Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robson, T. M., Robinson, S. A., Jansen, M. A., Ballaré, C. L., & Flint, S. D. (2019). Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 18(3), 681-716.
- Bright, J. M., Sun, X., Gueymard, C. A., Acord, B., Wang, P., & Engerer, N. A. (2020). Bright-Sun: A globally applicable 1-min irradiance clear-sky detection model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109706.
- Dirnberger, D., Blackburn, G., Müller, B., & Reise, C. (2015). On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 431-442.
- Galdino, J. J. B., de Castro Vilela, O., Fraidenaich, N., Muniz, H., Pereira, A. C., Jatoba, E. B., ... & de Melo Filho, J. B. (2022). Irradiância espectral em Petrolina-Brasil: caracterização e validação de simulações. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 13(1), 20-29.
- Gueymard, C. (1995). SMARTS2: a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. Florida Solar Energy Center.
- Gueymard, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5), 325-346.
- Gueymard, C. A. (2019). The SMARTS spectral irradiance model after 25 years: New developments and validation of reference spectra. *Solar Energy*, 187, 233-253.
- Kinsey, G. S. (2021). Solar cell efficiency divergence due to operating spectrum variation. *Solar Energy*, 217, 49-57.
- Mayer, B., Kylling, A., Emde, C., Hamann, U., & Buras, R. (2012). libRadtran user's guide. Edition for libRadtran version, 1.
- Miyauchi, M., & Nakajima, H. (2016). Determining an effective UV radiation exposure time for vitamin D synthesis in the skin without risk to health: simplified estimations from UV observations. *Photochemistry and photobiology*, 92(6), 863-869.
- Pelland, S., & Gueymard, C. A. (2022). Validation of Photovoltaic Spectral Effects Derived From Satellite-Based Solar Irradiance Products. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(6), 1361-1368.
- Polo, J., Alonso-Abella, M., Ruiz-Arias, J. A., & Balanzategui, J. L. (2017). Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies. *Solar Energy*, 142, 194-203.
- Ripalda, J. M., Chemisana, D., Llorens, J. M., & García, I. (2020). Location-specific spectral and thermal effects in tracking and fixed tilt photovoltaic systems. *Iscience*, 23(10).

- Warmann, E. C., & Atwater, H. A. (2016, June). Predicting energy production for multijunction photovoltaics: Effects of spectral variation and cumulative irradiance. In 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) (pp. 0577-0579). IEEE.
- Warmann, E. C., & Atwater, H. A. (2019). Predicting geographic energy production for tandem PV designs using a compact set of spectra correlated by irradiance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(6), 1596-1601.
- Xie, Y., Habte, A., Sengupta, M., & Vignola, F. (2021). An Evaluation of the Spectral Irradiance Data from the NSRDB (No. NREL/TP-5D00-80439). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States); Univ. of Oregon, United States.
- Xie, Y., & Sengupta, M. (2018). A fast all-sky radiation model for solar applications with narrowband irradiances on tilted surfaces (FARMS-NIT): Part I. The clear-sky model. *Solar Energy*, 174, 691-702.
- Xie, Y., Sengupta, M., & Wang, C. (2019). A fast all-sky radiation model for solar applications with narrowband irradiances on tilted surfaces (FARMS-NIT): Part II. The cloudy-sky model. *Solar Energy*, 188, 799-812.
- Xu, Y., & Cui, G. (2021). Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: Principles and mechanisms. *Atmospheric Environment*, 244, 117908.

VALIDATION OF THE NSRDB DATABASE OF GLOBAL HORIZONTAL SPECTRAL IRRADIANCE FOR THE CITY OF PETROLINA – BRAZIL

ABSTRACT: With the availability of spectral solar irradiance data from the NREL-NSRDB service covering all of South America, it is desirable to validate this database at any site with observational data. The present work analyzes the performance of the NSRDB modelled data of global horizontal spectral irradiance for the city of Petrolina, located in a semi-arid region of northeastern Brazil. The validation procedure includes the temporal and wavelength synchronizations of the NSRDB time series with the observed data, as well as the application of a Gaussian filter to match the spectral resolution of the simulated GHI spectrum with that of the spectroradiometers used for the measurements over the observed spectral range (300–1700 nm). The NSRDB GHI spectrum data were analyzed in different ways: as a whole, by solar spectrum band (ultraviolet, visible, and infrared), and for clear-sky moments. The broadband irradiance obtained by summation of the GHI spectrum was also evaluated. For 4408 spectra recorded during 2018–2021, the normalized RMSE of the modelled GHI spectrum varied between 16.03% for clear-sky periods and 52.80 % under all-sky conditions, indicating that the accuracy of the NSRDB spectral model is significantly affected by cloudiness under Petrolina's climate.

Keywords: solar irradiance spectrum, NSRDB, solar radiation, solar energy, spectroradiometer.