

Estudo da irradiação solar horizontal observada e estimada para o estado da Paraíba

LOUISE PEREIRA DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

PAULA ROSE DE ARAUJO SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

SUSANE ETERNA LEITE MEDEIROS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

RAPHAEL ABRAHÃO

Introdução

A radiação emitida pelo Sol atinge a superfície da Terra sob a forma de ondas eletromagnéticas. A radiação solar está em regiões espectrais que variam de raios-x a ondas de rádio (BADESCU, 2008). Em razão da excentricidade da órbita elíptica da Terra, assim como condições climáticas e difusão atmosférica (fenômenos de dispersão, reflexão e absorção), a intensidade da radiação solar na atmosfera não é uniforme (BADESCU, 2008; EL MGHOUCHI et al., 2016). A dispersão da radiação solar na atmosfera influencia na intensidade da radiação medida ao nível do solo.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Os métodos utilizados para obter dados de irradiação solar horária através de satélite podem ser imprecisos. Devido a movimentação de campos e estruturas de nuvens no período de uma hora, uma ou duas imagens de satélite não são suficientes para representar as informações da hora, causando um erro significativo (JANJAI; PANKAEW; LAKSANABOONSONG, 2009). Dada a importância do conhecimento sobre a radiação solar, utilizando bases de dados de irradiação solar total horizontal observada e estimada, este estudo foi elaborado para sete estações meteorológicas pertencentes ao estado da Paraíba (Brasil)

Fundamentação Teórica

A radiação solar total em uma superfície horizontal é a soma das componentes da radiação solar direta e difusa horizontal. Dados demonstram que a irradiação difusa horizontal tem aumentado na China devido à poluição atmosférica (FU et al., 2015). Na África central e no centro da América do Sul, os aerossóis de fumaça são mais presentes durante o verão e o outono em razão das queimadas, enquanto que os aerossóis de poeira são mais elevados durante a primavera e o verão no norte da África (RUIZ-ARIAS; GUEYMARD, 2018).

Metodologia

O estado da Paraíba está localizado na região Nordeste do Brasil. A Paraíba possui uma área territorial de 56.467,239 km² com uma população de 3.766,528 pessoas, de acordo com o censo de 2010. Os dados climáticos históricos de nebulosidade (décimos) e irradiação foram fornecidos pelo INMET através de estações convencionais e automáticas. Os dados estimados de irradiação solar foram coletados do ABES e da NASA. A tendência linear é avaliada através do método de Sen. Foi utilizado o erro de dispersão entre os dados de irradiação solar total horizontal do INMET e NASA.

Análise dos Resultados

Apesar do curto período de coleta de dados houve tendências significativas da irradiação solar total horizontal em alguns meses para algumas estações. Na Índia e na China, entre os anos de 1985 e 2009, devido à industrialização e à produção de energia baseada em recursos não renováveis a irradiação solar apresentou tendências de diminuição mesmo em dias de céu claro (REMUND; MÜLLER, 2010). Os resultados obtidos através das métricas de análise de dispersão MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE não foram uniformes para as estações no estado da Paraíba.

Conclusão

Nos dados de irradiação solar total horizontal do INMET foram detectadas tendências significativas de redução na comparação mensal. Os dados de irradiação solar são de extrema importância para diversas aplicações. O impacto causado com o aumento ou diminuição da irradiação solar ao longo do tempo deve ser avaliado a depender do tipo de fauna, flora e das atividades exercidas na localidade, principalmente no uso da radiação solar para fins energéticos. Além disso, a escolha da base de dados é crucial para aumentar a confiança dos projetos que dependem dos dados de radiação solar local.

Referências Bibliográficas

ABAL, G. et al. Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. *Solar Energy*, v. 141, p. 166–181, 2017. ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; CARVALHO, M. Solar or wind energy for the Brazilian semi-arid? - Climatic characterization and future trends. 30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2017, p. 1–13, 2017. ALEXANDRI, G. et al. A high resolution satellite view of surface solar radiation over the climatically sensitive region of Eastern Mediterranean. *Atmospheric Research*, v. 188, n. 2017, p.

Palavras Chave

Irradiação solar difusa horizontal, Tendências, Mann-Kendall

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio por meio dos projetos 306783/2018-5 e a bolsa 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

1. ARTIGO: ESTUDO DA IRRADIAÇÃO SOLAR HORIZONTAL OBSERVADA E ESTIMADA PARA O ESTADO DA PARAÍBA

1.1. INTRODUÇÃO

A radiação emitida pelo Sol atinge a superfície da Terra sob a forma de ondas eletromagnéticas. A radiação solar está em regiões espectrais que variam de raios-x a ondas de rádio (BADESCU, 2008). Em razão da excentricidade da órbita elíptica da Terra, assim como condições climáticas e difusão atmosférica (fenômenos de dispersão, reflexão e absorção), a intensidade da radiação solar na atmosfera não é uniforme (BADESCU, 2008; EL MGHOUCI *et al.*, 2016). A dispersão da radiação solar na atmosfera influencia na intensidade da radiação medida ao nível do solo. Em torno de 30% da radiação solar é refletida de volta para o espaço e 20% é absorvida pelas nuvens e moléculas no ar (CHEN, 2011). Por isso nem toda radiação solar que entra na atmosfera da Terra atinge o solo.

As informações sobre a radiação solar são fundamentais para diversos estudos. A coleta e a caracterização estatística de dados climáticos históricos a longo prazo podem ser consideradas uma etapa essencial para diversas aplicações (SEDIĆ; PAVKOVIĆ; FIRAK, 2015). Além do balanço de energia atmosférica, os dados de radiação solar são fundamentais para a análise da carga térmica em edifícios, dimensionamento, operação e avaliação econômica de sistemas de energia e para os estudos de impacto ambiental (EL-SEBAILI *et al.*, 2010; MELLIT *et al.*, 2010). Os dados de radiação solar podem ser obtidos através de banco de dados estimados (satélite) ou observados (instrumentos de medição no solo). Para avaliação do recurso solar a radiação registrada a nível do solo fornece dados mais confiáveis (URRACAA *et al.*, 2017).

1.2. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Os métodos utilizados para obter dados de irradiação solar horária através de satélite podem ser imprecisos. Devido a movimentação de campos e estruturas de nuvens no período de uma hora, uma ou duas imagens de satélite não são suficientes para representar as informações da hora, causando um erro significativo (JANJAI; PANKAEW; LAKSANABOONSONG, 2009). Dada a importância do conhecimento sobre a radiação solar, utilizando bases de dados de irradiação solar total horizontal observada e estimada, este estudo foi elaborado para sete estações meteorológicas pertencentes ao estado da Paraíba (Brasil). O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento dos dados observados e estimados de irradiação solar total, verificando se existe a presença de tendências climáticas do parâmetro de irradiação solar total horizontal em localidades do estado da Paraíba.

1.3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A radiação solar total em uma superfície horizontal é a soma das componentes da radiação solar direta e difusa horizontal. Dados demonstram que a irradiação difusa horizontal tem aumentado na China devido à poluição atmosférica (FU *et al.*, 2015). Na África central e no centro da América do Sul, os aerossóis de fumaça são mais presentes durante o verão e o outono em razão das queimadas, enquanto que os aerossóis de poeira são mais elevados durante a primavera e o verão no norte da África (RUIZ-ARIAS; GUEYMARD, 2018). A presença de aerossóis e poluição no ar diminui a radiação direta que chega à superfície (WANG *et al.*, 2012). Dessa forma, na conta da radiação total a parcela da radiação difusa será maior. A radiação total horizontal apresenta valores baixos em regiões úmidas, em razão das condições meteorológicas, devido a presença de nuvens pesadas (SILVA *et al.*, 2010).

A média anual da irradiação solar no Brasil varia entre 3,5 e 6,3 kWh/m²/dia (PEREIRA *et al.*, 2017), uma das razões para essa variação são os diferentes tipos climáticos que compõe o território brasileiro. A região semiárida do Nordeste em especial, possui uma boa disponibilidade anual de irradiação solar diária em razão da baixa pluviosidade ao longo do ano (cerca de 300 mm/ano) e uma menor quantidade média anual de nuvens no Brasil (MARTINS; ABREU; PEREIRA, 2012), além da baixa latitude. A região oeste do estado da Bahia e da Paraíba possuem os níveis mais altos de irradiação solar da região Nordeste (TIBA, 2001). Na estação de Aguiar no estado da Paraíba, por exemplo, a irradiação solar total horizontal no mês de novembro foi de 6,8 kWh/m²/dia (MEDEIROS *et al.*, 2021).

A mediação da radiação solar costuma ser mais difícil do que para outras variáveis meteorológicas (MORADI, 2009). No piranômetro as incertezas relativas variam entre 3,8% a 20% no caso de soma horárias (GEIGER *et al.*, 2002). Os pixels das imagens de satélites estimam a radiação da superfície com base nas informações de nuvens e aerossóis espalhadas em uma determinada área (SENGUPTA *et al.*, 2015), enquanto que as observações de solo são baseadas em um instrumento que vê o céu a partir de um ponto. O piranômetro absorve a energia radiante, o calor gerado é dissipado através de uma resistência térmica e a diferença de temperatura dentro do equipamento é convertida em voltagem (KIPP; ZONEN, 2019). É importante entender a correlação entre as medições de satélite e os dados medidos em solo. A precisão da medição dos dados registrados em estações meteorológicas podem auxiliar na validação dos dados baseados em satélite (URRACAA *et al.*, 2017).

1.4. METODOLOGIA

1.4.1. Área de estudo

O estado da Paraíba está localizado na região Nordeste do Brasil. A Paraíba possui uma área territorial de 56.467,239 km² com uma população de 3.766,528 pessoas, de acordo com o censo de 2010, sendo João Pessoa a capital do estado (IBGE, 2017a). O estado da Paraíba, de acordo com a nova nomenclatura do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), está dividido em quatro regiões geográficas intermediárias: João Pessoa, Campina Grande, Patos e Sousa-Cajazeiras (IBGE, 2017b) (Figura 1). As estações meteorológicas selecionadas estão incluídas nas quatro regiões geográficas intermediárias, sendo uma na região de João Pessoa, quatro na região de Campina Grande, uma em Patos e uma em Sousa.

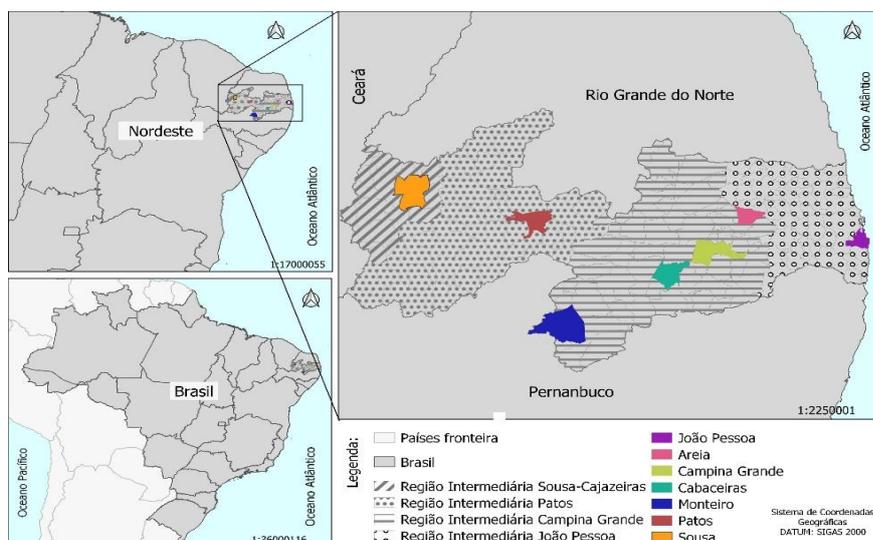


Figura 1- Divisão do estado da Paraíba por regiões geográficas intermediárias e localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.

Fonte: Adaptado do IBGE (2017b).

1.4.2. Coleta dos dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Os dados climáticos históricos de irradiação solar total horizontal (kJ/m^2) são fornecidos pelo INMET através de estações automáticas, na forma de médias horárias diárias. O piranômetro usado foi o CM 6B da Kipp&Zonen, cuja faixa espectral corresponde a 310-2800 nm. Na Tabela 1 estão descritas as estações meteorológicas selecionadas e disponibilizadas pelo INMET para o estado da Paraíba, com o critério de no mínimo 10 anos de coleta de dados. A estação realiza uma amostragem a cada 5 segundos, então o valor instantâneo é uma média representativa de 1 minuto (12 valores de amostragem) (INMET, 2019). O período de amostragem dos dados variou de acordo com o início de instalação do piranômetro de cada estação. Foi realizada a transformação da unidade de irradiação solar dada de kJ/m^2 para $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$.

Os dados climáticos históricos de nebulosidade (décimos) foram fornecidos pelo INMET através de estações convencionais. Foi realizada uma triagem nos dados, eliminando os meses e os anos que não possuíssem dados. O período de coleta de dados em Areia, Campina Grande, São Gonçalo e João Pessoa foi de janeiro de 1961 a dezembro de 2019, em Monteiro de janeiro de 1963 a 31 de dezembro de 2019, em Patos de janeiro de 1976 a dezembro de 2019. Em Cabaceiras não há dados de nebulosidade.

Tabela 1 - Estações meteorológicas selecionadas para o estudo de irradiação solar total horizontal com sua localização geográfica, período de coleta de dados e região geográfica intermediária a que pertencem.

Localidades	Latitude	Longitude	Período	Região Geográfica Intermediária
Areia	06°58' S	35°41' W	Nov. de 2004 - Jun. 2019	
Cabaceiras	07°29' S	36°17' W	Fev. 2008 - Jun. 2019	
Campina Grande	07°13' S	35°53' W	Dez. de 2006 - Jun. 2019	Campina Grande
Monteiro	07°53' S	37°06' W	Mai de 2008 - Jun. 2019	
João Pessoa	07°08' S	34°51' W	Jul. de 2007 - Jun. 2019	João Pessoa
Patos	07°04' S	37°16' W	Jul. de 2007 - Jun. 2019	Patos
São Gonçalo (distrito de Sousa)	06°45' S	38°13' W	Nov. 2007 - Jun. 2019	Sousa-Cajazeiras

Fonte: INMET (2019)

1.4.3. Coleta dos dados de irradiação solar do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição e da NASA

O Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) utiliza o Atlas Brasileiro de Energia Solar (ABES) como fonte de dados. O ABES disponibiliza uma base de dados de radiação solar produzida a partir de um total de 17 anos de imagens de satélite - de 1999 até 2015, a resolução espacial é de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (aproximadamente 10 km x 10 km) (LABREN, 2017). Os dados foram produzidos pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) (LABREN, 2017). O Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição, fornece as médias anuais e mensais do total diário da irradiação total, e irradiação difusa horizontal ($\text{Wh/m}^2.\text{dia}$).

Os dados de radiação solar fornecidos pela NASA são baseados em satélites e modelos precisos (NASA, 2019). As séries temporais diárias incluem os parâmetros básicos solares,

como a irradiação solar total e difusa horizontal (kWh/m².dia). Os parâmetros solares estão disponíveis na forma de médias diárias, mensais e anuais. Todos os parâmetros da NASA relacionados à energia solar são derivados de dados retirados do arquivo da NASA GEWEX / SRB, versão 3.0, a partir do ano de 1983, a resolução espacial é de 0,5° x 0,5° (aproximadamente 50 km x 50 km) (NASA, 2019).

1.4.4. Estatística e métodos de avaliação dos dados

1.4.4.1. Tendências

O teste de Mann-Kendall é um método não paramétrico que pode ser usado para demonstrar a existência de tendências em uma série de dados (SNEYERS, 1990). O teste de Mann-Kendall é um dos testes mais utilizados para detectar tendências em séries temporais (YUE; WANG, 2004). Este teste compara cada valor de uma série temporal com os outros valores restantes em ordem sequencial (SILVA *et al.*, 2010), além de ser recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (FANG *et al.*, 2019).

A tendência linear é avaliada através do método de Sen, que normalmente é aplicado em conjunto com o teste de Mann-Kendall e no qual o modelo linear é utilizado para estabelecer a amplitude da tendência e a variação dos dados no tempo (SALMI, 2002). Os dados não precisam estar em conformidade com nenhuma distribuição específica para a aplicação desses testes (OLOFINTOYE; SULE, 2010).

1.4.4.2. Erro de dispersão dos dados de irradiação solar total horizontal do INMET e da NASA

Foi realizada uma análise dos valores diários da irradiação solar total horizontal entre os dados do INMET e da NASA. Para isso uma triagem foi feita para utilizar o mesmo período de tempo em ambas as fontes de dados. As métricas selecionadas foram a tendência do erro médio (MBE- Mean Bias Error), erro médio absoluto (MAE- Mean Absolute Error) e o erro médio quadrático (RMSE- Root Mean Square Error) (Eq. (1), Eq. (2), Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6)) (URRACA *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2018).

O MBE representa o erro sistemático dos dados estimados em relação aos dados observados, ou seja, os dados estimados podem estar abaixo ou acima dos dados observados, enquanto que o MAE fornece a magnitude média dos erros dos dados estimados (KATO, 2016). O RMSE representa uma medida do desvio padrão entre os dados observados e estimados, neste método grandes erros terão um peso maior (LI *et al.*, 2016; KATO, 2016). Os indicadores de erros independentes de escala são representados em porcentagem, MAE normalizado corresponde ao rMAE, MBE normalizado corresponde ao rMBE e o RMSE normalizado corresponde ao rRMSE. Esses métodos para avaliar a dispersão dos dados, têm sido utilizados nos estudos de validação dos dados de irradiação solar (YANG *et al.*, 2018).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m - H_s \quad (1)$$

$$rMBE = \frac{MBE}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |H_m - H_s| \quad (3)$$

$$rMAE = \frac{MAE}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (H_m - H_s)^2} \quad (5)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m} \quad (6)$$

Onde o H_m corresponde ao valor observado, H_s ao valor estimado e o n é a quantidade de dados.

1.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.5.1. Irradiação solar total horizontal e nebulosidade

Através da organização dos dados de irradiação solar total horizontal do INMET, ABES e NASA e de nebulosidade do INMET, foi possível obter médias mensais para cada localidade, exceto o parâmetro de nebulosidade para Cabaceiras que não existe (Figura 2). Foi observado um comportamento semelhante da irradiação solar horizontal por meio das três bases de dados ao longo do ano, com valores menores no meio do ano (período que abrange as estações de outono e inverno) e valores elevados no início e final do ano (período que abrange as estações da primavera e verão) para todas as estações estudadas. O parâmetro de nebulosidade apresentou comportamento distinto para cada estação (Figura 2), em Areia a nebulosidade variou pouco longo do ano, em Campina Grande e João Pessoa a nebulosidade oscilou um pouco mais. E em Patos e São Gonçalo a nebulosidade no primeiro semestre foi bem maior do que no segundo semestre, representando o período chuvoso nesta área semiárida (ABRAHÃO; PEIXOTO; CARVALHO, 2017).

Os menores valores de irradiação solar total horizontal foram observados na estação de Areia, sendo justificado pelos dados elevados da nebulosidade acima de 7 décimos em quase todos os meses. O pico da irradiação solar total horizontal dos dados do INMET e do ABES foi o mês de novembro para todas as localidades, exceto na cidade de Patos, onde o valor máximo do INMET e NASA ocorreu no mês de outubro, 7,0 kWh/m².dia e 6,9 kWh/m².dia respectivamente (Figura 2). Em Areia os dados de irradiação solar total horizontal do ABES e da NASA apresentaram valores semelhantes, ficando acima dos dados do INMET. Isso pode ter acontecido devido à presença elevada de nebulosidade na região. Além disso, a topografia em Areia pode ter influenciado nos valores estimados. Os autores Marques *et al.* (2018) destacam em Areia-PB a presença de morros de topos planos e encostas ravinadas, com várzeas e vales de altitudes que variam de 509 a 635 m e declividades de 15° a 45°.

Nas demais localidades as diferenças entre os dados do INMET e ABES foram menores do que as diferenças entre os dados do INMET e NASA (Figura 2). A resolução espacial dos dados do ABES é maior do que a resolução dos dados da NASA (LABREN, 2017; NASA, 2019). Quanto maior a resolução melhor será a relação entre os dados medidos em solo, justificando a proximidade dos dados do ABES e do INMET. O valor máximo da nebulosidade em Campina Grande e João Pessoa ocorreu no mês de junho, coincidindo com o valor mínimo da irradiação solar total horizontal do ABES e NASA (período de inverno com chuvas). Em Monteiro, Patos e São Gonçalo a irradiação solar total horizontal foi maior do que nas demais localidades principalmente no segundo semestre.

Além da redução da nebulosidade, a declinação solar no hemisfério sul neste período do ano (setembro a março) é favorável para a incidência solar (MEDEIROS; MARTINS, 2020). A variação anual da radiação está relacionada com a declinação solar, ou seja, o movimento aparente do sol afetará a intensidade da radiação solar em um determinado ponto da superfície (ALEXANDRI *et al.*, 2017).

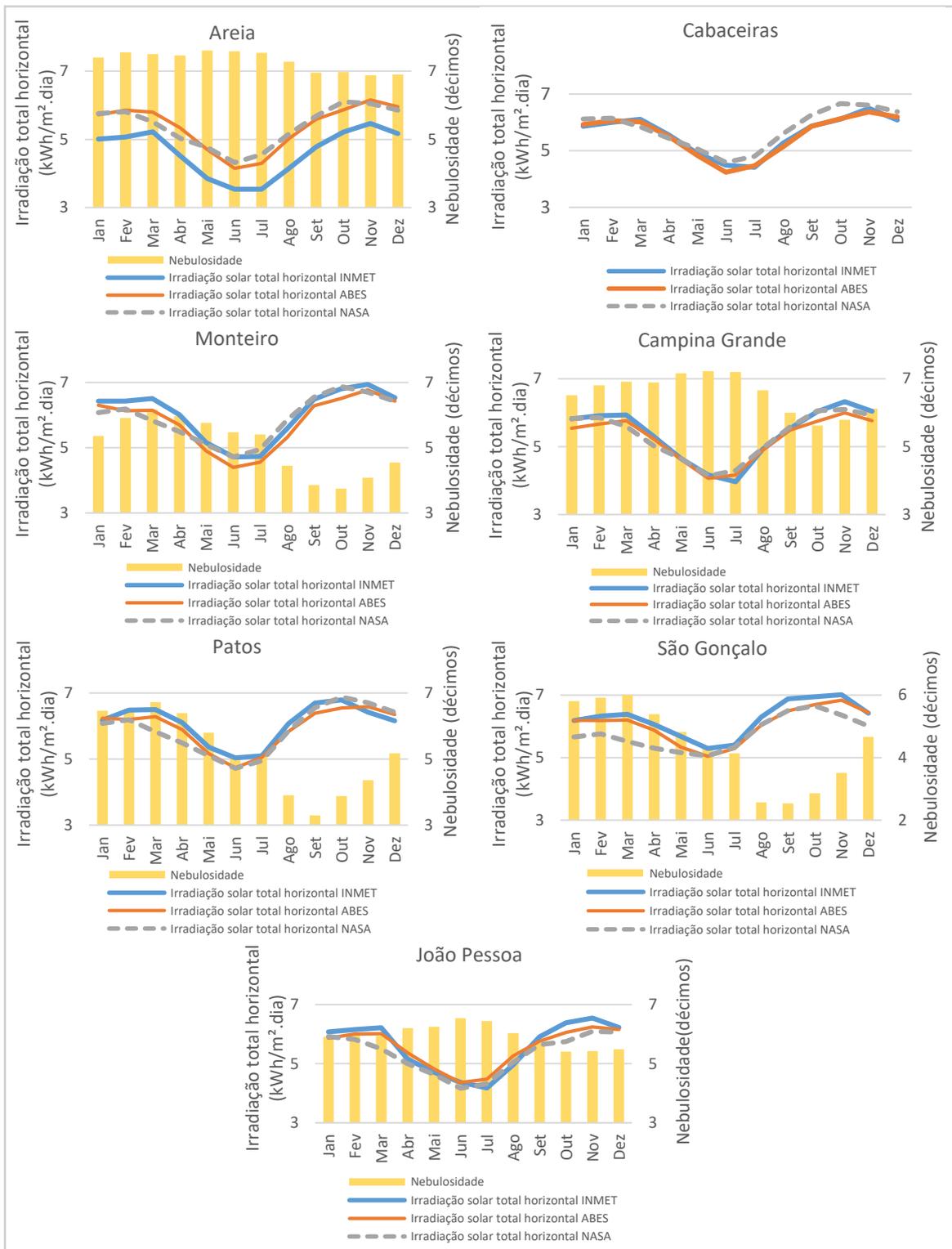


Figura 2 - Análise da nebulosidade (INMET) e da irradiação solar total horizontal mensal do INMET, ABES e NASA para a estação de Areia, Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande, Patos, São Gonçalo e João Pessoa na Paraíba.

Fonte: Autor.

1.5.2. Tendências da irradiação solar total horizontal

Na comparação anual Areia e Cabaceiras apresentaram tendências significativas de diminuição na irradiação solar total horizontal ($p < 0,05$ e $p < 0,10$, respectivamente) (Tabela 2). Na comparação mensal, a redução da irradiação em Areia ocorreu nos meses de janeiro e dezembro foi mais significativa ($p < 0,01$). Janeiro e dezembro apresentaram diminuição de 0,21 kWh/m²ano e 0,15 kWh/m²ano respectivamente. A irradiação solar total horizontal também decresceu nos meses de fevereiro, abril, julho, setembro, outubro e novembro em Areia ($p < 0,05$).

No caso de Cabaceiras, na comparação mensal, a irradiação solar total horizontal apresentou tendência significativa de redução de 0,09 kWh/m²ano, apenas no mês de outubro (Tabela 2). Em Monteiro, a tendência nos dados de irradiação foi significativa no mês de novembro ($p < 0,10$), com uma redução de 0,09 kWh/m²ano (Tabela 2). Em Campina Grande, a irradiação solar total horizontal apresentou tendência significativa no mês de março, com uma diminuição de 0,06 Wh/m²ano ($p < 0,001$) (Tabela 2).

Tabela 2 - Tendências das médias diárias mensais dos dados de irradiação solar total horizontal do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, para as estações meteorológicas de Areia, Cabaceiras, Monteiro e Campina Grande.

Período	Areia (kWh/m ² ano)	Cabaceiras (kWh/m ² ano)	Monteiro (kWh/m ² ano)	Campina Grande (kWh/m ² ano)
Jan	-0,21 **	0,00 ns	0,00 ns	-0,01 ns
Fev	-0,16 +	0,01 ns	0,04 ns	0,01 ns
Mar	-0,10 ns	-0,12 ns	-0,03 ns	-0,06 ***
Abr	-0,12 *	-0,01 ns	-0,01 ns	0,06 ns
Mai	-0,10 ns	0,01 ns	0,01 ns	0,02 ns
Jun	-0,03 ns	-0,02 ns	0,00 ns	0,02 ns
Jul	-0,13 *	-0,09 ns	0,01 ns	0,01 ns
Ago	-0,08 ns	0,05 ns	0,06 ns	0,05 ns
Set	-0,13 *	-0,06 ns	-0,01 ns	0,05 ns
Out	-0,19 *	-0,09 +	0,00 ns	0,03 ns
Nov	-0,18 *	-0,05 ns	-0,09 +	-0,02 ns
Dez	-0,15 **	-0,01 ns	-0,05 ns	0,00 ns
Anual	-0,12 *	-0,03 +	0,02 ns	0,00 ns

ns = não significativo; + $p < 0,10$; * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Na comparação anual nas estações de João Pessoa, Patos e São Gonçalo não foram observadas tendências significativas de irradiação solar total horizontal (Tabela 3). Na comparação mensal na estação de João Pessoa não foram observadas tendências significativas de irradiação. Na estação de Patos, a tendência significativa de irradiação solar total horizontal apresentada no comparativo mensal foram os meses de agosto e novembro (Tabela 3). A irradiação solar total horizontal no mês de agosto aumentou 0,07 Wh/m²ano e em novembro reduziu 0,15 Wh/m²ano.

Tabela 3 - Tendências das médias diárias mensais dos dados de irradiação solar total horizontal do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, para as estações meteorológicas de João Pessoa, Patos e São Gonçalo.

Período	João Pessoa (kWh/m ² ano)	Patos (kWh/m ² ano)	São Gonçalo (kWh/m ² ano)
Jan	0,02 ns	-0,01 ns	0,08 ns
Fev	0,03 ns	-0,02 ns	-0,07 ns
Mar	-0,04 ns	-0,02 ns	-0,01 ns
Abr	-0,01 ns	0,00 ns	-0,02 ns
Mai	-0,05 ns	0,04 ns	-0,05 ns
Jun	0,01 ns	0,01 ns	0,00 ns
Jul	0,12 ns	0,01 ns	-0,01 ns
Ago	0,01 ns	0,07 **	0,08 *
Set	0,00 ns	0,02 ns	-0,01 ns
Out	-0,03 ns	-0,00 ns	0,00 ns
Nov	0,01 ns	-0,15 +	-0,08 ns
Dez	-0,03 ns	-0,01 ns	-0,02 ns
Anual	-0,01 ns	-0,02 ns	0,00 ns

ns = não significativo; +p < 0,10; *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001

Apesar do curto período de coleta de dados houve tendências significativas da irradiação solar total horizontal em alguns meses para algumas estações, como pode ser observado nas Tabela 2 e Tabela 3. Na Índia e na China, entre os anos de 1985 e 2009, devido à industrialização e à produção de energia baseada em recursos não renováveis a irradiação solar apresentou tendências de diminuição mesmo em dias de céu claro (REMUND; MÜLLER, 2010). Já a Europa e o Japão diminuíram a produção de aerossóis depois de 1985 e a irradiação solar cresceu entre os anos de 1985 e 2009.

Na região Nordeste do Brasil houve uma tendência decrescente na irradiação solar total (no período de 1948 a 2009) em algumas áreas localizadas na região semiárida (SILVA *et al.*, 2010). A maior parte das tendências no estudo de Silva *et al.* (2010) foi estatisticamente significativa no nível $p < 0,05$, de acordo com o teste de Mann-Kendall. Na comparação mensal, também foram observadas tendências significativas de diminuição na irradiação solar em alguns meses nas estações de Patos, Monteiro, Cabaceiras, Campina Grande e Areia. A redução da irradiação solar pode estar associada ao aumento de poluentes no ar que modificam as propriedades ópticas da atmosfera (SILVA *et al.*, 2010), além da presença de nebulosidade.

1.5.3. Avaliação das diferenças nos dados de irradiação solar total horizontal entre o INMET e a NASA

Os resultados obtidos através das métricas de análise de dispersão MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE não foram uniformes para as estações no estado da Paraíba, conforme observado na Tabela 4 Tabela 5 e Tabela 6. Em Areia (Tabela 4) todos os meses apresentaram valores negativos de MBE, isso demonstra que os valores dos dados da NASA foram mais altos que os medidos na estação do INMET em todos os meses. Além disso, os valores de rMBE e o rMAE indicam uma grande diferença entre os dados. Avaliando o RMSE o mês de agosto em Areia correspondeu ao maior espalhamento dos dados no RMSE com 1.749,5 Wh/m².dia, que equivale ao erro médio normalizado de 40,1% do valor medido na estação do INMET (Tabela 4). A topografia de Areia pode estar influenciando nas medições da NASA, que possui uma resolução

baixa (NASA, 2019). Uma resolução espacial alta é menos afetada pela topografia, permitindo revelar melhor as características locais (ALEXANDRI *et al.*, 2017). Na estação de Cabaceiras ocorreu a mesma situação de Areia no período mensal. O MBE apresentou resultados negativos, porém, observaram-se diferenças menores entre os dados. As porcentagens do rMAE e do rRMSE foram mais baixas. A média do desempenho do RMSE foi uma das mais baixas dentre as estações analisadas, 617,9 Wh/m².dia, os erros entre os dados da NASA e do INMET foram menores (Tabela 4).

Tabela 4 – Comparação entre os dados mensais de irradiação solar total horizontal do INMET e NASA, através das métricas de análise de dispersão MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE para as estações meteorológicas de Areia e Cabaceiras na Paraíba.

	Período	MBE	rMBE	MAE	rMAE	RMSE	rRMSE
		(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)
Areia	Jan	-1124,9	-22,9	1.204,8	24,5	1.453,7	29,6
	Fev	-656,1	-13,3	920,2	18,7	1.453,7	23,6
	Mar	-717,3	-14,4	928,3	18,6	1.161,4	23,3
	Abr	-941,4	-21,6	1.094,2	25,1	1.300,1	29,8
	Mai	-1029,3	-26,4	1.104,9	28,3	1.330,0	34,1
	Jun	-1112,2	-32,5	1.171,3	34,2	1.360,0	39,8
	Jul	-1014,2	-28,2	1.079,3	30,0	1.260,9	35,0
	Ago	-938,4	-21,5	1.365,9	31,3	1.749,5	40,1
	Set	-876,0	-17,8	1.214,4	24,7	1.492,7	30,3
	Out	-1029,6	-19,5	1.284,7	24,3	1.632,2	30,9
	Nov	-940,8	-17,5	1.048,4	19,5	1.272,3	23,7
	Dez	-1044,4	-20,5	1.184,6	23,3	1.416,6	27,8
	Média	-952,1	-21,3	1.133,4	25,2	1.406,9	30,7
Cabaceiras	Jan	-286,8	-4,9	510,9	8,7	632,4	10,7
	Fev	-210,4	-3,5	523,6	8,8	674,4	11,4
	Mar	-187,2	-3,1	547,0	9,1	801,6	13,4
	Abr	-148,4	-2,7	430,4	7,8	560,0	10,1
	Mai	-117,5	-2,4	421,5	8,6	542,5	11,1
	Jun	-233,8	-5,2	423,6	9,4	532,8	11,8
	Jul	-269,3	-6,1	477,7	10,8	605,5	13,6
	Ago	-270,7	-5,2	458,4	8,7	620,1	11,8
	Set	-291,3	-5,0	452,5	7,7	581,2	9,9
	Out	-247,4	-4,0	469,6	7,5	590,6	9,5
	Nov	-224,5	-3,5	488,5	7,6	612,8	9,5
	Dez	-260,2	-4,3	519,6	8,5	661,2	10,8
	Média	-229,0	-4,1	476,9	8,6	617,9	11,1

Fonte: Autor.

Em Monteiro a correlação dos dados resultou em um MBE positivo, indicando que as medições da NASA foram mais baixas do que as medidas na estação do INMET, com exceção dos meses de junho, julho e agosto (Tabela 5). No método do MAE e do RMSE os erros foram baixos, ou seja, o conjunto de dados não apresentou muita discrepância. No período mensal o rMAE variou entre 6,1% a 9,0%, enquanto o rRMSE oscilou entre 8,1% e 11,5% do valor real, medido na estação. Em Campina Grande o

MBE teve mais resultados negativos no período mensal, exceto o mês de fevereiro (Tabela 5). O menor erro obtido pelo MAE foi 452,1 Wh/m².dia em novembro. Para o RMSE o menor erro obtido foi em maio, 597,0 Wh/m².dia, que corresponde a 12,8% do valor real.

Tabela 5 - Comparação entre os dados mensais de irradiação solar total horizontal do INMET e NASA, através das métricas de análise de dispersão MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE para as estações meteorológicas de Monteiro e Campina Grande na Paraíba.

	Período	MBE	rMBE	MAE	rMAE	RMSE	rRMSE
		(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)
Monteiro	Jan	206,5	3,2	568,2	8,8	715,5	11,1
	Fev	181,5	2,8	577,1	9,0	732,9	11,4
	Mar	195,3	3,0	562,4	8,7	735,3	11,4
	Abr	82,1	1,4	478,9	8,1	595,8	10,0
	Mai	56,5	1,1	438,7	8,5	546,6	10,5
	Jun	-75,1	-1,6	399,2	8,4	503,3	10,5
	Jul	-107,8	-2,3	420,9	8,8	534,2	11,2
	Ago	-202,5	-3,6	424,9	7,5	584,1	10,3
	Set	-99,1	-1,5	395,5	6,1	520,6	8,1
	Out	16,3	0,2	450,4	6,6	620,3	9,1
	Nov	80,0	1,2	503,2	7,2	692,1	9,9
	Dez	153,8	2,3	552,5	8,4	702,9	10,7
	Média	40,6	0,5	481,0	8,0	623,6	10,3
Campina Grande	Jan	-65,1	-1,1	463,8	8,0	597,5	10,2
	Fev	251,7	4,3	578,3	9,9	729,3	12,4
	Mar	-82,4	-1,4	503,2	8,6	652,5	11,1
	Abr	-107,9	-2,0	491,4	9,3	624,3	11,8
	Mai	-102,7	-2,2	456,7	9,8	597,0	12,8
	Jun	-316,0	-7,6	508,3	12,2	644,9	15,5
	Jul	-672,6	-16,6	749,2	18,5	932,2	12,7
	Ago	-150,6	-3,1	457,3	9,3	625,0	12,7
	Set	-95,6	-1,7	515,8	9,4	737,1	13,4
	Out	-65,1	-1,1	519,1	8,6	679,9	11,3
	Nov	-22,5	-0,4	452,1	7,1	630,8	9,9
	Dez	-76,0	-1,3	475,9	7,9	603,6	10,0
	Média	-125,4	-2,8	514,3	9,9	671,2	12,0

Fonte: Autor.

Em João Pessoa (Tabela 6) foi observado que os erros apresentados em todas as métricas tiveram valores elevados. O resultado negativo do MBE em todos os meses sugere que os dados do NASA foram mais altos do que os dados obtidos na estação do INMET. O mês de julho apresentou o maior erro para o MAE, 1.417,5 Wh/m².dia, e para o RMSE, 1.784,5 Wh/m².dia. Isso se deve aos altos índices de precipitação nesse mês, e consequentemente alta nebulosidade, demonstrando que os dados da NSA são mais precisos em meses de poucas chuvas. Na estação de Patos, o MBE resultou em valores negativos apenas para o mês de novembro e dezembro (Tabela 6). No mês de novembro

o MAE foi de 816,6 Wh/m².dia, enquanto no RMSE o erro foi de 1.603,7 Wh/m².dia. O RMSE elevado sugere que existem valores dentro do conjunto de dados do mês de novembro mais discrepantes em relação à média. Em São Gonçalo, em todo o período mensal os valores do MBE foram positivos, indicando que os dados da NASA foram menores do que os obtidos pelo INMET (Tabela 6). Os erros encontrados no MAE e no RMSE não foram tão discrepantes comparados com os encontrados nas outras estações.

Tabela 6 - Comparação entre os dados mensais de irradiação solar total horizontal do INMET e NASA, através das métricas de análise de dispersão MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE para as estações meteorológicas de João Pessoa, Patos e São Gonçalo na Paraíba.

(Continua)

	Período	MBE	rMBE	MAE	rMAE	RMSE	rRMSE
		(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)
João Pessoa	Jan	-526,6	-8,8	720,7	12,0	929,9	15,5
	Fev	-442,4	-7,2	657,8	10,7	887,2	14,5
	Mar	-316,2	-5,1	622,8	10,0	884,3	14,2
	Abr	-494,4	-9,8	762,3	15,0	1116,0	22,0
	Mai	-236,2	-5,0	557,0	11,8	758,6	16,1
	Jun	-445,5	-10,2	696,3	16,0	989,3	22,7
	Jul	-584,8	-13,9	1.417,5	33,6	1.784,5	42,3
	Ago	-636,1	-12,5	820,9	16,2	1277,3	25,1
	Set	-325,3	-5,5	639,0	10,8	899,5	15,2
	Out	-333,5	-5,2	510,3	8,0	722,4	11,3
	Nov	-483,1	-7,4	605,3	9,3	862,7	13,2
	Dez	-532,1	-8,5	667,9	10,7	930,0	14,9
	Média	-446,4	-8,3	723,2	13,7	1003,5	18,9
Patos	Período	MBE	rMBE	MAE	rMAE	RMSE	rRMSE
		(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)
	Jan	38,8	0,6	618,7	9,9	921,7	14,7
	Fev	195,2	3,0	600,2	9,3	785,8	12,1
	Mar	224,7	3,4	604,9	9,3	781,9	12,0
	Abr	221,2	3,6	564,0	9,3	770,7	12,7
	Mai	290,1	5,4	640,9	11,9	876,9	16,3
	Jun	199,8	4,0	509,6	10,1	655,6	13,0
	Jul	193,6	3,8	485,2	9,5	628,0	12,3
	Ago	185,4	3,1	441,9	7,3	592,5	9,8
	Set	147,2	3,1	371,5	5,6	510,2	7,7
	Out	54,5	0,8	559,7	8,2	977,1	14,3
	Nov	-251,0	-3,8	816,6	12,4	1.603,7	24,3
Dez	-17,9	-0,3	596,1	9,3	945,9	14,8	
Média	123,5	2,2	567,4	9,3	837,5	13,7	
São Gonçalo	Período	MBE	rMBE	MAE	rMAE	RMSE	rRMSE
		(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)
	Jan	104,9	1,7	501,4	8,2	656,6	10,7
	Fev	217,9	3,4	476,8	7,5	607,8	9,6
	Mar	191,2	3,0	583,0	9,2	740,2	11,7
	Abr	320,8	5,3	461,2	7,6	570,8	9,4
	Mai	254,3	4,6	462,2	8,3	566,3	10,1
	Jun	172,2	3,3	408,9	7,7	539,7	10,2
	Jul	134,2	2,5	420,9	7,9	558,0	10,4
Ago	25,0	0,4	379,9	6,1	614,5	9,8	

Tabela 7 - Comparação entre os dados mensais de irradiação solar total horizontal do INMET e NASA, através das métricas de análise de dispersão MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE para as estações meteorológicas de João Pessoa, Patos e São Gonçalo na Paraíba.

	(Conclusão)					
Set	144,6	2,1	307,1	4,5	392,8	5,7
Out	175,4	2,5	381,9	5,5	533,6	7,7
Nov	278,6	4,0	469,0	6,7	626,4	8,9
Dez	216,9	3,4	490,3	7,7	631,1	9,8
Média	186,3	3,0	445,2	7,2	586,5	9,5

Fonte: Autor.

No Brasil um estudo correlacionou dados de 42 estações meteorológicas (INMET e INPE-Instituto Nacional de Pesquisa e Espaciais), juntamente com dados de satélite (HC3v4 e HC3v5) (THOMAS *et al.*, 2016). Na região Nordeste (São Luiz, Natal e Petrolina) os valores de rRMSE foram melhores do que os obtidos nas cidades de Cuiabá, Campo Grande e Chapecó. Foi avaliado que esse resultado era esperado pois as estações do Nordeste estão mais próximas do Nadir do satélite, conseqüentemente o tamanho do pixel é menor (THOMAS *et al.*, 2016). Os resultados do rRMSE apresentados no presente estudo, entre os dados do INMET e da NASA, foram maiores do que os obtidos na pesquisa de Thomas *et al.* (2016). Principalmente na estação de Areia, em que nos meses entre maio e agosto tiveram o rRMSE acima de 33%, no mês de julho da estação João Pessoa também foi observado esse comportamento.

Thomas *et al.* (2016) mostraram que o rMBE do HC3v4 variou entre -3 e 13%, sendo que a maioria dos dados ficaram na faixa entre 2% e 5%. Já o HC3v5 exibiu resultados melhores entre -3 e 7% sendo que a maioria dos dados ficou na faixa entre 1 e 3%. Por isso as bases de dados HC3v4 e HC3v5, derivadas de satélite, foram consideradas para estudos a longo prazo no Brasil (THOMAS *et al.*, 2016). Sengupta *et al.* (2015) sugerem que a validação de dados de satélite no Brasil devam ter valores de rRMSE igual ou inferior a 13% e um rMBE igual ou inferior a 7%. Nas estações de Monteiro e São Gonçalo todos os meses atenderam as duas condições de Sengupta *et al.* (2015), em Cabaceiras e Campina Grande a maioria dos meses se enquadraram no limite proposto. Enquanto na estação de Areia os valores obtidos de rRMSE e rMBE estão distantes dos valores sugeridos por Sengupta *et al.* (2015).

Para outras regiões do mundo, os autores Martín-Pomares *et al.* (2017) também utilizaram em seu estudo os parâmetros de incerteza o rMBE e o rRMSE para avaliar as incertezas das estimativas de satélite em oposição às medições no solo, localizadas no Catar. O rRMSE foi cerca de 15%, e o viés (MBE) foi positivo, indicando uma tendência geral dos dados derivados de satélite apresentarem valores mais baixos do que os dados observados de irradiação total horizontal solar em Doha-Catar (MARTÍN-POMARES *et al.*, 2017). A partir dos resultados foi aplicado uma técnica de correção para reduzir o viés, através do método de adaptação local. Esse método de avaliação entre diferentes bases de dados pode ser aplicado para validar o uso dos dados de irradiação solar (MARTÍN-POMARES *et al.*, 2017).

1.6. CONCLUSÃO

Foi observado que na maioria dos meses os dados de irradiação solar total horizontal do INMET e ABES, no estado da Paraíba (Nordeste do Brasil), ficaram mais próximos. Principalmente nas localidades de Campina Grande, Cabaceiras, Monteiro, Patos, São Gonçalo e João Pessoa. Em Areia os dados de irradiação solar total horizontal do ABES ficaram mais distantes do INMET, nesse caso os dados do ABES se assemelhou

aos dados da NASA. Isso pode ter relação com a alta nebulosidade no local influenciando nas medições estimadas.

Nos dados de irradiação solar total horizontal do INMET foram detectadas tendências significativas de redução na comparação mensal, através do teste de Mann-Kendall quantificada pelo declive de Sen, na região intermediária de Campina Grande. Na estação de Areia, em termos mensais, na maioria dos meses foram observadas tendências significativas de redução da irradiação solar total horizontal, possivelmente há indícios de aumento de nebulosidade. Em Areia e Cabaceiras no período anual a irradiação solar total horizontal apresentou tendência significativa de diminuição. Em João Pessoa e São Gonçalo em nenhum mês houve tendências significativas para os dados de irradiação solar total horizontal.

Na avaliação das diferenças entre a irradiação solar total horizontal do INMET e da NASA, em Areia, Cabaceiras e João Pessoa o MBE foi negativo em todos os meses. Isso significa que os dados da NASA apresentaram valores mais elevados do que os dados mensais do INMET. Em São Gonçalo e em Patos na maioria dos meses as correlações do MBE foram positivas, indicando que os dados da NASA foram menores do que as medições do INMET. Em Campina Grande, Cabaceiras, Monteiro e São Gonçalo avaliando os resultados do rMAE e do rRMSE, os dados da NASA podem ser utilizados para estudo da irradiação solar total horizontal. Levando em consideração as porcentagem do rMAE e do rRMSE em Areia, o uso dos dados da NASA pode não ser uma boa alternativa, pois o erro em relação à medição em solo foi grande.

Os dados de irradiação solar são de extrema importância para diversas aplicações. O impacto causado com o aumento ou diminuição da irradiação solar ao longo do tempo deve ser avaliado a depender do tipo de fauna, flora e das atividades exercidas na localidade, principalmente no uso da radiação solar para fins energéticos. Além disso, a escolha da base de dados é crucial para aumentar a confiança dos projetos que dependem dos dados de radiação solar local.

1.7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio por meio dos projetos 306783/2018-5 e a bolsa 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

1.8. REFERÊNCIAS

- ABAL, G. *et al.* Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. **Solar Energy**, v. 141, p. 166–181, 2017.
- ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; CARVALHO, M. Solar or wind energy for the Brazilian semi-arid? - Climatic characterization and future trends. **30th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2017**, p. 1–13, 2017.
- ALEXANDRI, G. *et al.* A high resolution satellite view of surface solar radiation over the climatically sensitive region of Eastern Mediterranean. **Atmospheric Research**, v. 188, n. 2017, p. 107–121, 2017.
- ALI, R. e al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 9, 2019.
- BADESCU, V. Modeling solar radiation at the earth's surface: Recent advances. **Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances**, n. 2008, p. 1–

517, 2008.

CHEN, C. J. *Physics of Solar Energy*. **John Wiley & Sons**, p. 1–21, 2011.

EL-SEBAILI, A. A. *et al.* Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 568–576, 2010.

EL MGHOUCHI, Y. *et al.* Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 87–99, 2016.

FU, C. *et al.* Trends of the sunshine duration and diffuse radiation percentage on sunny days in urban agglomerations of China during 1960–2005. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 34, p. 206–211, 2015.

GEIGER, M. *et al.* A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. **Solar Energy**, v. 73, n. 6, p. 475–480, 2002.

HUANG, J. *et al.* Spatial and temporal variability of precipitation indices during 1961–2010 in Hunan Province, central south China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 118, n. 3, p. 581–595, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área territorial brasileira**. Rio de Janeiro, IBGE, 2017a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/monteiro.html>. Acesso em: 24/06/2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias**. Rio de Janeiro, IBGE, 2017b. Disponível em: https://portaldemapas.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas/. Acesso em: 24/06/2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Dedução do cálculo da radiação realizada pelo programa da maws301 – vaisala. 2019.

JANJAI, S.; PANKAEW, P.; LAKSANABOONSONG, J. A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics. **Applied Energy**, v. 86, n. 9, p. 1450–1457, 2009.

KATO, Takeyoshi. Prediction of photovoltaic power generation output and network operation. In: *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems*. Academic Press, 2016. p. 77–108

KIPP ZONEN. Technical specifications. Pyranometers CM6B. Disponível em: <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/3/Pyranometers>. Acesso em: 20/02/2020.

LABREN. Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017). 2017. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 09/06/2020.

LI, Z. *et al.* A hierarchical approach using machine learning methods in solar photovoltaic energy production forecasting. **Energies**, v. 9, n. 1, 2016.

MARQUES, A. D. L. *et al.* Paisagem urbana, vulnerabilidade e risco em brejos de altitude: o sítio urbano de Areia/PB. **Nature and Conservation**, v. 10, n. 2, p. 25–34, 2017.

MARTÍN-POMARES, L. *et al.* Analysis of the long-term solar potential for electricity generation in Qatar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, n. January, p. 1231–1246, 2017.

MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. **Energy Policy**, v. 48, p. 640–649, 2012.

MELLIT, A. *et al.* An adaptive model for predicting of global, direct and diffuse hourly solar irradiance. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 4, p. 771–782, 2010.

MEDEIROS, C. A. G.; MARTINS, A. M. GEOMETRIA SOL-TERRA : REVISÃO DIDÁTICA COM ÊNFASE NO HEMISFÉRIO SUL E DIRECIONADA PELA ABNT NBR 10899 : 2013 GEOMETRIA SOL-TERRA : REVISÃO DIDÁTICA COM ÊNFASE NO HEMISFÉRIO SUL E DIRECIONADA PELA ABNT NBR 10899 : 2013.

2020.

MEDEIROS, S. E. L. *et al.* Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 184, n. October 2020, 2021.

MORADI, I. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. **Energy**, v. 34, n. 1, p. 1–6, 2009.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Methodology. Data Sources. 2019. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/>. Acesso em: 09/06/2020.

NEVES, G. M. Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos. **Inpe**, p. 198, 2016.

OLOFINTOYE, O. O.; SULE, B. F. Impact of Global Warming on the Rainfall and Temperature in the Niger Delta of Nigeria. v. 7, n. 2, p. 33–48, 2010.

PEREIRA, E. B. *et al.* Atlas brasileiro de energia solar (2ª edição). p. 80, 2017.

REMUND, J.; MÜLLER, S. Trends in Global Radiation Between 1950 and 2100. n. Table 1, p. 1–7, 2010.

RUIZ-ARIAS, J. A.; GUEYMARD, C. A. Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface. **Solar Energy**, v. 168, n. November 2017, p. 10–29, 2018.

SALMI, T. **Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS**. Finlândia, Ilmatieteen laitos, 2002.

SEDIĆ, A.; PAVKOVIĆ, D.; FIRAK, M. A methodology for normal distribution-based statistical characterization of long-term insolation by means of historical data. **Solar Energy**, v. 122, p. 440–454, 2015.

SENGUPTA, M. *et al.* Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications. **World Renewable Energy Forum (WREF)**, v. 76, p. 255, 2015.

SILVA, V. DE P. R. DA *et al.* Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. **Solar Energy**, v. 84, n. 10, p. 1852–1862, 2010.

SNEYERS, R. On the statistical analysis of series of observations. **World meteorological organization**, 1990.

TIBA, C. Solar radiation in the Brazilian Northeast. **Renewable Energy**, v. 22, n. 4, p. 565–578, 2001.

THOMAS, C. *et al.* Validation of three satellite-derived databases of surface solar radiation using measurements performed at 42 stations in Brazil. **Advances in Science and Research**, v. 13, n. June, p. 81–86, 2016.

TORRES, J. L. *et al.* Comparative study of various models in estimating hourly diffuse solar irradiance. **Renewable Energy**, v. 35, n. 6, p. 1325–1332, 2010.

URRACA, R. *et al.* Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. **Solar Energy**, v. 164, n. February, p. 339–354, 2018.

URRACAA, R. *et al.* Quality control of global solar radiation data with satellite-based products. v. 158, p. 49–62, 2017.

WANG, Y. *et al.* The magnitude of the effect of air pollution on sunshine hours in China. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 9, p. 1–9, 2012.

YANG, D. *et al.* History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining. **Solar Energy**, v. 168, n. November 2017, p. 60–101, 2018.

YUE, S.; WANG, C. Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to

detect trend in serially correlated hydrological series. **Water Resources Management**, v. 18, n. 3, p. 201–218, 2004.