



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS - CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS – PPGER



LOUISE PEREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS NO ESTADO DA
PARAÍBA E SEU USO EM ESTUDOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**

JOÃO PESSOA-PB

2021

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° XX

LOUISE PEREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DOS DADOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS NO ESTADO DA
PARAÍBA E SEU USO EM ESTUDOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Raphael Abrahão

JOÃO PESSOA - PB

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Louise Pereira da.

Avaliação dos dados climáticos históricos no Estado da Paraíba e seu uso em estudos de energia fotovoltaica /

Louise Pereira da Silva. - João Pessoa, 2021.

97 f. : il.

Orientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Irradiação solar - tendências. 2. MBE. 3. MAE. 4. RMSE. 5. Temperatura do ar. 6. Energias renováveis. 7. Energia fotovoltaica. I. Abrahão, Raphael. II. Título.

UFPB/BC CDU 620.91(043)

Elaborado por WALQUELINE DA SILVA ARAUJO - CRB-15/514

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”
(Mahatma Gandhi).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, por ter guiado meus passos até aqui e por todas as oportunidades dadas.

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Lucivânia Alves, pelo apoio em todos os aspectos durante toda minha vida.

Ao meu marido Giordano Miranda por todo carinho, atenção e encorajamento ao longo desta fase.

Ao meu orientador professor Raphael Abrahão, com quem compartilhei minhas dúvidas e ânsias a respeito do tema, e sempre fui auxiliada. A professora Riuzuani e ao professor Fabiano pelas sugestões apresentadas. E a todos os professores que influenciaram na minha trajetória.

Aos meus companheiros de mestrado, em particular ao grupo de pesquisa, Priscila, Giusep, Paula, Susane e Wallysson pela amizade e incentivo.

A CAPES, pelo auxílio financeiro.

E a todos, que de alguma forma, contribuíram para elaboração deste trabalho.

RESUMO

As mudanças climáticas podem gerar consequências no desempenho de unidades geradoras de eletricidade a partir de recursos renováveis, pois essas tecnologias são dependentes do clima da região de instalação. A partir das séries históricas de dados climáticos e das aplicações estatísticas, como o teste de Mann-Kendall quantificado pelo declive de Sen, é possível investigar indícios de mudanças climáticas. O estado da Paraíba, que está localizado na região Nordeste do Brasil, foi selecionado como área de estudo no presente trabalho. Estudou-se o comportamento climático dos dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de dados climáticos estimados, além da influência na produtividade de sistemas fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino. Foi verificada a presença de tendências significativas decrescentes, através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, nos dados de irradiação solar total horizontal do INMET, nas estações de Areia e Cabaceiras, o que significa que houve uma redução da irradiação solar nessas localidades. Nas análises de dispersão (MAE e RMSE) da irradiação solar total horizontal entre os dados do INMET e NASA, três estações da NASA apresentaram erro aceitável em relação aos dados do INMET. A irradiação difusa horizontal calculada do INMET, relacionada com os dados do ABES e da NASA tiveram comportamento similar. A temperatura média do ar apresentou tendências significativas de aumento no período anual em todas as estações. O impacto na produção fotovoltaica tomando como base o incremento da temperatura média do ar foi menor do que 1% para todas as estações. Mesmo a variação na produção fotovoltaica tendo sido pequena até o momento, há indícios de que esse impacto se incremente no futuro. Dessa forma, é preciso estar ciente das mudanças climáticas e de como ela pode afetar os setores energéticos. Para isso, mais pesquisas devem ser realizadas acerca da temática, a fim de obtenção de conhecimento mais aprofundado e elaboração das possíveis alternativas para mitigar esses impactos das mudanças climáticas.

Palavras-Chaves: Tendências, Irradiação solar, MBE, MAE, RMSE, Temperatura do ar, Energias renováveis, Energia fotovoltaica.

ABSTRACT

Climate change can have consequences on the performance of units generating electricity from renewable resources, as these technologies are dependent on the climate of the region of installation. From historical series of climatic data and statistical applications, such as the Mann-Kendall test quantified by the slope of Sen, it is possible to investigate evidence of climate change. The state of Paraíba, which is located in the Northeast region of Brazil, was selected as the study area in the present study. The climatic behavior of meteorological stations data from the National Institute of Meteorology (INMET) and estimated climatic data were studied, in addition to the influence on the productivity of monocrystalline and polycrystalline silicon photovoltaic systems. The presence of significant decreasing trends was verified through the Mann-Kendall test, quantified by the slope of Sen, in the INMET total horizontal solar irradiation data, at Areia and Cabaceiras stations, which means that there was a reduction in solar irradiation. In the dispersion analyzes (MAE and RMSE) of the total horizontal solar irradiation data, between INMET and the National Aeronautics and Space Administration (NASA), three NASA stations presented an acceptable error in relation to the INMET data. The calculated diffuse horizontal radiation from INMET, related to data from the Reference Center for Solar and Wind Energy Sérgio de Salvo Brito (ABES) and NASA, showed little variation over the year. The average air temperature showed significant upward trends in the annual period in all seasons. The Spearman correlation between the total horizontal solar radiation and the cell operating temperature was significant for all models of photovoltaic panels. The impact on photovoltaic production based on the increase in average air temperature was less than 1% for all seasons. Even though the variation in photovoltaic production has been small so far, there are indications that this impact will increase in the future. Thus, it is necessary to be aware of climate change and how it can affect energy sectors. For this, more research must be carried out on the subject, in order to obtain more in-depth knowledge and elaborate possible alternatives to mitigate these impacts of climate change.

Keywords: Trends, Solar irradiation, MBE, MAE, RMSE, Air temperature, Renewable energies, Photovoltaic energy.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 - Etapas para realizar uma revisão sistemática.	20
Figura 2.2 – Métodos estatísticos utilizados nos artigos selecionados do Science Direct.	21
Figura 3.1 – Divisão do estado da Paraíba por regiões geográficas intermediárias e localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.	42
Figura 3.2 - 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.	49
Figura 3.3 – Análise da média diária mensal da irradiação solar difusa horizontal do INMET, ABES e NASA para a estações de Areia, Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande.	58
Figura 3.4 – Análise da média diária mensal da irradiação solar difusa horizontal do INMET, ABES e NASA para a estações de Patos, São Gonçalo e João Pessoa na Paraíba.	59
Figura 4.1 - Localização das estações meteorológicas selecionados no estado da Paraíba (Brasil) para o estudo.....	68
Figura 4.2 – Média anual da temperatura de operação das células dos módulos fotovoltaicos Pv 1, Pv 2, Pv 3, Pv 4 e Pv 5 para as localidades de Areia (1996-2019), Campina Grande (1974-2019), Monteiro (1963-2019), João Pessoa (1961-2019), Patos (1984-2019) e São Gonçalo (1962-2019) na Paraíba-Brasil.	75
Figura 4.3 – Comportamento da série completa dos dados da temperatura média do ar e da produção fotovoltaica com áreas equivalentes, para as localidades de Areia (1996-2019), Campina Grande (1974-2019) e Monteiro (1963-2019) na Paraíba-Brasil.	77
Figura 4.4 – Comportamento da série completa dos dados da temperatura média do ar e da produção fotovoltaica com áreas equivalentes, para as localidades de João Pessoa (1961-2019), Patos (1984-2019) e São Gonçalo (1962-2019) na Paraíba-Brasil.....	79

LISTA DE TABELA

Tabela 3.1 - 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.....	43
Tabela 3.2 - 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.	50
Tabela 3.3 - 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.	51
Tabela 3.4 – 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.	53
Tabela 3.5 - 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.	54
Tabela 3.6 - 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.	56
Tabela 4.1 – Descrição das estações meteorológicas selecionadas pertencentes ao estado da Paraíba, período de coleta dos dados, coordenadas geográficas e altitude das estações.	69
Tabela 4.2 – Descrição dos painéis fotovoltaicos monofaciais de silício monocristalino e policristalino selecionados para o estudo.	70
Tabela 4.3 – Tendências detectadas nos dados de temperatura média do ar do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, para as estações meteorológicas de Areia (1996-2019), Campina Grande (1974-2019) e Monteiro (1963-2019).	72

Tabela 4.4 – Tendências detectadas nos dados de temperatura média do ar do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, para as estações meteorológicas de João Pessoa (1961-2019), Patos (1984-2019) e São Gonçalo (1962-2019)..... 73

Tabela 4.5– Comparativo da produção fotovoltaica em variação percentual relativa com a área equivalente para as localidades de Areia, Monteiro, Campina Grande. Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS, Pv 2 - Risen RSM60-6-295M-315M/5BB, Pv 3 - Trina / TSM-DD05A.08(II), Pv 4 - Canadian / CS6K-275P, Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P, Pv 6 - Trina / TSM-PD05.08. 80

Tabela 4.6 - Comparativo da produção fotovoltaica em variação percentual relativa com a área equivalente para as localidades de João Pessoa, Patos e São Gonçalo. Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS, Pv 2 - Risen RSM60-6-295M-315M/5BB, Pv 3 - Trina / TSM-DD05A.08(II), Pv 4 – Canadian / CS6K-275P, Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P, Pv 6 - Trina / TSM-PD05.08. 82

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

OMN	Organização Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ABES	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
BDMET	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ABES	Atlas Brasileiro de Energia Solar
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

SUMÁRIO

Capítulo 1	13
1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	13
1.2. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. Objetivo Geral	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
 Capítulo 2	17
2. ARTIGO: Métodos estatísticos para detectar tendências em dados climáticos históricos: Revisão bibliográfica	17
2.1. INTRODUÇÃO	18
2.2. METODOLOGIA	19
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
2.3.1. Métodos estatísticos aplicados a tendências de dados climáticos históricos	21
2.3.2. Países citados nas análises de tendências de dados climáticos históricos 24	
2.3.3. Parâmetros climáticos utilizados nos estudos de tendências climáticas históricas	32
2.4. CONCLUSÃO	33
2.5. REFERÊNCIAS	33
 Capítulo 3	38
3. ARTIGO: Estudo da irradiação solar total horizontal observada e estimada para o estado da Paraíba	38
3.1. INTRODUÇÃO	39
3.2. METODOLOGIA	41
3.2.1. Área de estudo	41
3.2.2. Coleta dos dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)	42
3.2.3. Obtenção da irradiação solar difusa horizontal a partir dos dados do INMET 43	
3.2.4. Coleta dos dados de irradiação solar do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2º edição e da NASA	44
3.2.5. Estatística e métodos de avaliação dos dados	45
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47

3.3.1.	Irradiação solar total horizontal e nebulosidade	47
3.3.2.	Tendências da irradiação solar total horizontal	50
3.3.3.	Avaliação das diferenças nos dados de irradiação solar total horizontal entre o INMET e a NASA	52
3.3.4.	Irradiação solar difusa horizontal	58
3.4.	CONCLUSÃO	60
3.5.	REFERÊNCIAS	61
Capítulo 4		65
4.	ARTIGO: Avaliação da produtividade de painéis fotovoltaicos devido a mudança da temperatura do ar ao longo dos anos na Paraíba (Brasil)	65
4.1.	INTRODUÇÃO	66
4.2.	METODOLOGIA	68
4.2.1.	Local de estudo	68
4.2.2.	Seleção dos dados climáticos	68
4.2.3.	Análise das tendências climáticas	70
4.2.4.	Seleção de painéis fotovoltaicos	70
4.2.5.	Método de cálculo da produção para painéis fotovoltaicos.	71
4.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.3.1.	Tendências da temperatura média do ar	72
4.3.2.	Temperatura de operação da célula fotovoltaica	74
4.3.3.	Potencial fotovoltaico	75
4.3.4.	Comparativo da produção fotovoltaica de painéis de silício monocristalino e policristalino.	80
4.4.	CONCLUSÕES	84
4.5.	REFERÊNCIAS	85
Capítulo 5		88
5.	CONCLUSÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO	88
	REFERÊNCIAS DE TODA A DISSERTAÇÃO	90

Capítulo 1

1.1. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está distribuída em capítulos, apresentados em forma de artigos científicos. Os capítulos estão relacionados entre si, de forma que cada artigo traz uma temática pertinente ao tema central.

- O capítulo 1 dispõe da organização da dissertação, introdução geral, objetivo geral e específicos.
- O capítulo 2 é referente ao artigo: Métodos estatísticos para detectar tendências em dados climáticos históricos: Revisão bibliográfica. Neste artigo foi realizada uma revisão sistemática utilizando o banco de dados do *Science Direct* e do *Web of Science*, sobre o uso de métodos estatísticos para detectar tendências climáticas em dados históricos. Os artigos foram quantificados por países, métodos estatísticos e parâmetros climáticos.
- O capítulo 3 é referente ao artigo: Estudo da irradiação solar total horizontal observada e estimada para o estado da Paraíba. Neste artigo foi realizado um estudo sobre os dados estimados e observados de irradiação solar total horizontal, através do banco de dados do INMET, NASA e ABES. Sete localidades no estado da Paraíba-Brasil foram selecionadas para o estudo. A avaliação das tendências de irradiação solar total horizontal do INMET foi feita por meio do teste não paramétrico de Mann-Kendall, quantificado pelo declive de Sen. Através de métricas de dispersão (MBE, MAE, RMBE) foi realizada a comparação entre os dados de irradiação solar total horizontal do INMET e da NASA. Por fim a irradiação difusa horizontal no INMET foi calculada e analisada juntamente com os dados da NASA e do ABES.
- O capítulo 4 é referente ao artigo: Avaliação da produtividade de painéis fotovoltaicos devido a mudança da temperatura média do ar ao longo dos anos na Paraíba (Brasil). Neste artigo foram selecionadas seis estações meteorológicas localizadas no estado da Paraíba-Brasil. Foram observadas as tendências do parâmetro de temperatura média do ar, utilizando o teste não

paramétrico de Mann-Kendall, quantificado pelo declive de Sen. Foram selecionados seis modelos de painéis fotovoltaicos, sendo três de silício monocristalino e três de silício policristalino. A temperatura operacional da célula e a produção fotovoltaica dos seis painéis foram analisadas. Foi feita uma comparação entre a produção de painéis de silício monocristalino e policristalino em dois intervalos de tempos de coleta de dados de temperatura média do ar.

- O capítulo 5 é referente à conclusão geral da dissertação, nele estão contidas as considerações finais de todos os artigos, assim como as sugestões de trabalhos futuros.

1.2. INTRODUÇÃO GERAL

A análise do clima tem sido de extrema importância para observar os fenômenos que ocorrem no sistema atmosfera-superfície, além de ajudar o desenvolvimento tecnológico. Através da análise dos dados climáticos históricos é possível observar que não existe uma linearidade dos eventos. Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), os elementos fundamentais do clima são: temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. Esses elementos variam na esfera espacial e temporal por influência geográfica do clima. As variações do clima ocorrem porque existem diferentes latitudes, relevos, vegetações, influências naturais e interações antrópicas. Apesar de que muitas dessas variações fazem parte do clima local, nas últimas décadas alguns parâmetros climáticos, como temperatura do ar, velocidade do vento e precipitação estão apresentando tendências abruptas, sejam elas ascendentes ou descendentes (ABRAHÃO; PEIXOTO; CARVALHO, 2017; MEDEIROS *et al.*, 2019; SILVA *et al.* (2020)). Isso afeta todo ecossistema da Terra.

As mudanças climáticas podem gerar consequências no desempenho de unidades geradoras de eletricidade a partir de recursos renováveis, pois essas tecnologias são dependentes do clima da região de instalação. O regime de chuvas, por exemplo, pode determinar o potencial de geração de usinas hidrelétricas. De acordo com De Jong *et al.* (2018), na região Nordeste do Brasil, desde o ano de 2012 não tem tido chuvas suficientes para reabastecer os reservatórios do sistema hidrelétrico do São Francisco. Em 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017 as hidrelétricas nesta região forneceram apenas 42%, 39%, 31%, 25% e 18%, respectivamente, da demanda de energia elétrica da região Nordeste (DE JONG *et al.*, 2018). Por outro lado, o aumento da temperatura média do ar diminui a produção fotovoltaica. Medeiros *et al.* (2021) mostraram que houve uma redução de até -0,5% da produção fotovoltaica no sertão do estado da Paraíba-Brasil devido aos aumentos na temperatura do ar.

Os elementos climáticos são originados pelo Sol, a radiação solar vai induzir a circulação atmosférica em larga escala, dando origem aos ventos e ao aquecimento das águas, causando a evaporação que dá origem ao ciclo das águas (PINHO *et al.*, 2014). A radiação do sol, além de ser importante para a vida na Terra, também pode ser empregada para aquecimento de fluidos, por meio de coletores solares, e para geração de eletricidade através de células fotovoltaicas ou de usinas heliotérmicas. A energia fotovoltaica converte de forma direta a radiação solar em eletricidade. Por meio do efeito fotovoltaico

haverá a formação de uma diferença de potencial sobre uma célula constituída por materiais semicondutores, ou seja, haverá alterações nas propriedades elétricas originando tensões e correntes elétricas (VILLALVA, 2015).

Analisando os dados climáticos históricos por meio de caracterização mensal, anual e de aplicações estatísticas, como o teste de Mann-Kendall e o declive de Sen, é possível observar o comportamento e as tendências de parâmetros (temperatura, radiação solar, precipitação, entre outros) que caracterizam o clima local (GÜÇLÜ, 2018). As tendências climáticas podem servir de base para a compreensão do comportamento dos elementos climáticos, dando suporte na aplicação em novos empreendimentos de energias renováveis (SIQUEIRA, 2012). Utilizando dados locais de radiação solar e temperatura média do ar é possível avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos, promovendo um suporte no emprego dessas tecnologias.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Avaliar os dados climáticos históricos do estado da Paraíba (Brasil), com o intuito de entender possíveis tendências climáticas que possam influenciar na geração de eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão sistemática para dar suporte e trazer informação acerca dos métodos estatísticos utilizados na detecção de tendências climáticas em dados históricos.
- Estudar o comportamento dos dados observados e estimados de irradiação solar total e difusa horizontal, verificando se existe a presença de tendências climáticas do parâmetro de irradiação solar total horizontal em localidades do estado da Paraíba.
- Analisar as tendências climáticas do parâmetro de temperatura média do ar no estado da Paraíba, assim como o impacto das mudanças climáticas na produção de energia fotovoltaica, em painéis de silício monocristalino e policristalino.

Capítulo 2

2. ARTIGO: Métodos estatísticos para detectar tendências em dados climáticos históricos: Revisão bibliográfica

Resumo: As mudanças climáticas podem ser observadas, entre outras indicações, através de alterações nas médias dos dados climáticos. Algumas evidências sugerem que as ações humanas têm influenciado na estrutura térmica da atmosfera. Os testes estatísticos de análise de tendências auxiliam no entendimento do comportamento de dados climáticos históricos. Neste trabalho foi realizada uma revisão sistemática, utilizando palavras-chave, através dos bancos de dados de pesquisas científicas do *Science Direct* e do *Web of Science*, abordando os métodos estatísticos utilizados para avaliar tendências em dados climáticos históricos. Na biblioteca do *Science Direct* a China foi o país com o maior número de artigos voltados para o estudo de tendências climáticas, esses trabalhos estavam relacionados para o setor agrícola e o meio ambiente. Dentre os artigos obtidos nesta seleção, no Brasil foi encontrado um estudo que analisou as tendências de parâmetros climáticos, avaliando o impacto no setor energético, em uma pequena central hidrelétrica e em uma usina solar. A regressão linear e o teste não paramétrico de Mann-Kendall associado ao declive de Sen, foram os métodos estatísticos mais utilizados nas análises de tendências climáticas históricas. Comparados a outros, esses testes sofrem menos influência na presença de *outliers*. Os parâmetros climáticos mais estudados foram a precipitação e a temperatura do ar. Foi visto que poucos artigos abordaram as tendências climáticas em combinação com os impactos no setor energético, principalmente os que são baseados em recursos renováveis que são os mais suscetíveis às alterações no clima, abrindo uma lacuna para mais estudos nessa linha.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Dados históricos; Parâmetros climáticos.

Abstract: Climate change can be observed, among other indications, through changes in the averages of climate data. Some evidence that human actions have influenced the thermal structure of the atmosphere. Statistical trend analysis tests help to understand the behavior of historical climate data. In this work, a systematic review was carried out, using keywords, through the scientific research databases of Science Direct and the Web of Science, addressing the statistical methods used to evaluate trends in historical climate

data. In the Science Direct library in China, it was the country with the largest number of articles focused on the study of climate trends, these works were related to the agricultural sector and the environment. Among the articles selected in this selection, a study was found in Brazil that analyzed the trends of climatic parameters, evaluating the impact on the energy sector, in a small hydroelectric power plant and a solar plant. Linear regression and the non-parametric Mann-Kendall test associated with Sen's slope, were the most used statistical methods in the analysis of historical climate trends. Compared to others, these tests reduced less influence on the presence of outliers. The most studied climatic parameters were exclusion and air temperature. It has been seen that few articles have addressed climate trends in combination with impacts on the energy sector, especially those that are based on renewable resources that are the most susceptible to climate change, opening a gap for further studies along these lines.

Keywords: Climate change; Historical data; Climate parameters.

2.1. INTRODUÇÃO

A superfície terrestre interage continuamente com a atmosfera por meio de trocas de gases de efeito estufa, água, energia ou precursores de forças climáticas de vida curta (compostos orgânicos voláteis biogênicos, poeira, carbono negro) (JIA *et al.*, 2019). Essas interações podem afetar o comportamento do ciclo hidrológico, dos parâmetros climáticos, influenciando o clima local, regional e global. As alterações nas médias climáticas observadas a longo prazo podem caracterizar mudanças climáticas. O termo mudança climática inclui todas as formas de inconstância climática, independentemente de sua natureza estatística ou de suas causas físicas (MOURATO; MOREIRA; CORTE-REAL, 2010).

Desde o ano 1853 diversas pesquisas foram realizadas acerca da variabilidade do clima, mas apenas no ano de 1988, por iniciativa da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) foi criado o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (LOPES, 2008). O IPCC é o órgão das Nações Unidas destinado a avaliar a ciência relacionada às mudanças climáticas e seus impactos ambientais e socioeconômicos, juntamente com estratégias de respostas a essas mudanças climáticas.

Existem diversos métodos para a detecção e entendimento das mudanças climáticas. Através da aplicação de métodos estatísticos é possível analisar o comportamento dos dados climáticos históricos e essas técnicas podem detectar possíveis tendências crescentes ou decrescentes. Os testes de tendências podem ser classificados em métodos paramétricos e não paramétricos. Os testes de tendências paramétricas demandam que os dados sejam independentes e normalmente distribuídos, enquanto os testes de tendências não paramétricos exigem apenas que os dados sejam independentes (GOCIC; TRAJKOVIC, 2013; JAISWAL; LOHANI; TIWARI, 2015). Para a identificação de tendências climáticas, os testes comumente usados são Mann-Kendall (MK), declive de Sen e o teste de tendência de regressão linear (GÜÇLÜ, 2018).

A realização de uma revisão na literatura fornece as melhores evidências a partir de trabalhos já publicados para informar políticas e práticas, sendo um dos principais objetivos da pesquisa para as respectivas comunidades acadêmicas e profissionais (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Diante da necessidade do estudo periódico do clima para diversos fins, foi realizada uma revisão sistemática para dar suporte e trazer conhecimento acerca dos métodos estatísticos utilizados na detecção de tendências climáticas em dados históricos.

2.2. METODOLOGIA

Os autores Gough, Oliver e Thomas (2012) definiram o conceito de revisão sistemática como sendo uma revisão da literatura de pesquisa usando métodos sistemáticos, explícitos e responsáveis. Tranfield, Denyer e Smart (2003) sugeriram três etapas para realizar uma revisão sistemática (Figura 2.1). Essas etapas vão direcionar e moldar uma revisão sistemática mais consistente.

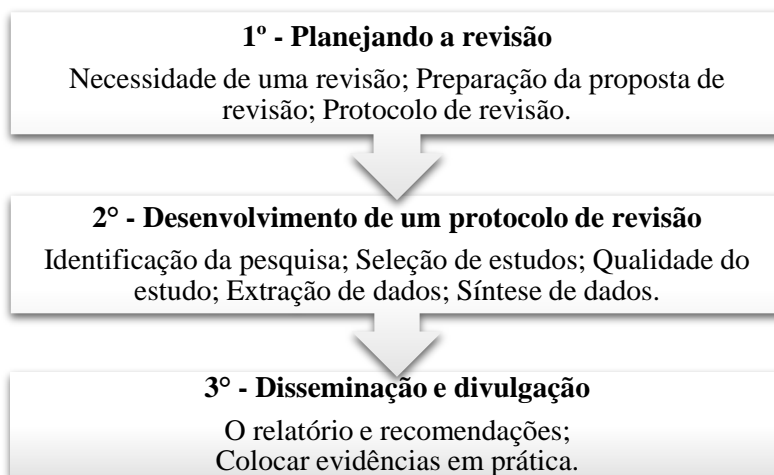


Figura 2.1 - Etapas para realizar uma revisão sistemática.
Fonte: Adaptado de Tranfield, Denyer e Smart (2003).

Para uma revisão sistemática os autores Gough, Oliver e Thomas (2012) definiram etapas semelhantes (Figura 2.1). Os autores descreveram práticas como o uso de palavras-chave em bibliotecas digitais. As tecnologias de classificação de documentos podem atribuir palavras-chave pré-existentes aos documentos. Nas revisões sistemáticas, essas tecnologias são usadas para determinar se um determinado estudo deve ser incluído ou excluído (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012).

O *Google Scholar* é uma ferramenta amplamente usada na pesquisa acadêmica, que se destaca por oferecer abrangência, todavia, muitas vezes não possui a capacidade de fornecer conteúdo detalhado. Os textos completos podem ser acessados nas respectivas bibliotecas digitais, como *Science Direct* ou *Web of Science* (YANG *et al.*, 2018). As bibliotecas selecionadas nesta revisão foram o *Science Direct* que faz parte da *Elsevier*, e o *Web of Science*, que faz parte da *Clarivate Analytics*. Essas bibliotecas possuem um grande banco de dados de pesquisas científicas, sendo uma fonte de pesquisa confiável.

Seguindo as metodologias de revisão sistemática, este trabalho seguiu a temática: Métodos estatísticos para avaliar tendências de dados climáticos históricos. Através do *Science Direct* e do *Web of Science* foram realizadas pesquisas com palavras-chave pertinentes à temática abordada.

Na pesquisa realizada no portal do *Science Direct*, em pesquisas avançadas, na seção “*Title, abstract, keywords*”, foi usada a seguinte sequência de palavras: “*climate trend*” and “*trend analysis*”. No *Science Direct* o resultado da pesquisa gerou 124 artigos. Foram selecionados artigos do tipo de revisão e pesquisa, sendo 6 artigos de revisão e 114 artigos de pesquisas, totalizando 120 artigos.

Na pesquisa realizada no portal do *Web of Science*, em pesquisa básica, com a sessão tópico ativada (Pesquisa o título, resumo, as palavras-chave do autor e o *Keywords Plus*) foi adicionado as seguintes palavras-chave com o conectivo “AND”: “*climate trend*”, “*trend analysis*”, “*historical data*”, “*statistics*”. No *Web of Science* o resultado da pesquisa gerou 71 artigos. Foi aplicado o filtro de artigos com acesso aberto, resultando em 30 artigos.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número total de publicações estudadas foram consideravelmente reduzidas após uma extensa revisão, uma vez que muitos dos artigos selecionados pelas bases de dados estavam fora do contexto do presente trabalho. O número final de artigos utilizados nesta revisão sistemática do *Science Direct* foi de 24 artigos e no *Web of Science* 5 artigos. Não foram encontrados artigos em comum entre os dois bancos de dados.

2.3.1. Métodos estatísticos aplicados a tendências de dados climáticos históricos

Science Direct

Os métodos estatísticos utilizados nos artigos selecionados no *Science Direct* podem ser observados na

Figura 2.2 A regressão linear foi bastante utilizada para visualizar o comportamento dos dados ao longo do tempo, em 48% dos artigos. Porém, nem sempre foi utilizada uma estatística para validar e quantificar o comportamento dos dados.

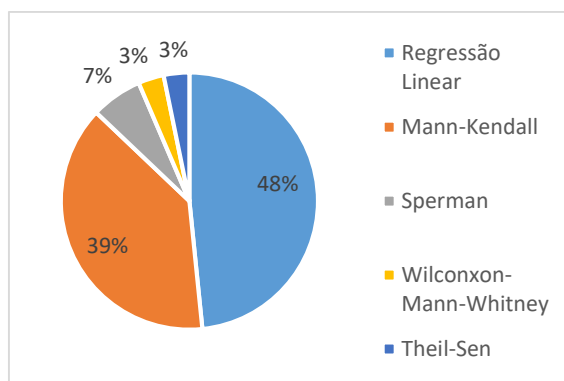


Figura 2.2 – Métodos estatísticos utilizados nos artigos selecionados do *Science Direct*.
Fonte: Autor.

Em Xinjiang-China, os autores Jiapaer *et al.* (2015) utilizaram um método de regressão linear para analisar dados de precipitação e temperatura média do ar. Os coeficientes de inclinação de tendência foram calculados através da equação (2.1).

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^{i=n} A_i B_i - \sum_{i=1}^{i=n} A_i \sum_{i=1}^{i=n} B_i}{n \sum_{i=1}^{i=n} A_i^2 - (\sum_{i=1}^{i=n} A_i)^2} \quad (2.1)$$

Em que n será o número de anos no período de estudo, A_i o valor da variável independente e B_i o valor da variável dependente no 1º ano. Então a variável terá uma tendência crescente se $R > 0$ e decrescente se $R < 0$.

Segundo os autores Cutforth e Judiesch (2007), em geral, para avaliar as tendências dos dados climáticos o teste de Spearman (Eq. (2.2)) ou o Kendall's T produzem resultados semelhantes.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n [R_i - i]^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2.2)$$

Onde R_i corresponde a posição da i -ésima observação na amostra de tamanho n , ρ pode assumir qualquer valor entre -1 e +1, valores positivos e negativos indicam tendências ascendentes e descendentes (WANG *et al.*, 2015).

O teste de Wilcoxon-Mann-Whitney identifica diferenças significativas nas médias mensais (Eq. (2.3)) (FELTOVICH, 2003). É um teste não paramétrico, não requer amostras normalmente distribuídas, e a tendência é validada a partir do valor p crítico inferior a 0,05 (LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2014).

$$Z = \frac{U(YX) - n/2}{\sqrt{n(m + n + 1)/12m}} \quad (2.3)$$

Onde a posição do elemento x_i na amostra X é definido como o número de observações em Y na outra amostra, sendo denotado por $U(YX)$ média aritmética, m e n são o tamanho da amostra de X e Y , respectivamente.

O teste de Theil Sen é um método não paramétrico. Considerando um modelo de regressão linear múltipla é possível calcular o teste de Theil Sen (Eq. (2.4)) (DANG, 2008).

$$Y_i = \alpha + X_i^T \beta + \epsilon_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.4)$$

Onde α é a interceptação, β é a inclinação e ϵ_i são os erros aleatórios.

O teste de Mann-Kendall foi selecionado pelos autores Hartmann e Andresky (2013) por ser menos sensível em comparação aos métodos de detecção de tendência paramétrica, além de ser um procedimento baseado em classificação que testa a hipótese

nula de ‘aleatoriedade’ ou ‘nenhuma tendência’. Segundo os autores Tahir *et al.* (2015), o teste não paramétrico de Mann-Kendall é menos sensíveis aos valores extremos da amostra e não dependem de suposições sobre a natureza das tendências lineares ou não lineares. Tahir *et al.* (2015) afirmaram também que a declinação de Sen é um método de regressão linear robusto. Nepal (2016) afirmou que o teste não paramétrico de Mann-Kendall e o método de Sen não assumem a distribuição de dados e é útil para detectar tendências monotônicas. Fuentes, Van Ogtrop e Vervoort (2020) utilizaram o teste de Mann-Kendall e a declinação de Sen, pois é possível quantificar a magnitude, a direção e a significância das tendências.

Web of Science

Todos os artigos do *Web of Science* utilizaram o teste não paramétrico de Mann-Kendall. O teste estatístico de Mann-Kendall pode testar a significância da tendência de uma série temporal (LIN *et al.*, 2020). Esse teste pode ser usado para detectar tendências que são monotônicas, mas não necessariamente lineares e a hipótese nula no teste indica que os dados são independentes e ordenados aleatoriamente (MCBEAN; MOTIEE, 2006). Os autores Arnone *et al.* (2013) afirmaram que o teste de Mann-Kendall identifica a presença de uma tendência sem fazer uma suposição sobre as propriedades de sua distribuição. Como resultado, é menos influenciado pela presença de *outliers* do que os testes paramétricos. A estatística do teste de Mann-Kendall pode ser expressa a partir da equação (2.5) (FANG *et al.*, 2019).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2.5)$$

$$\text{Em que } \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } (x_i - x_j) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_i - x_j) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_i - x_j) < 0 \end{cases}$$

Onde n é o número total de dados, x_i e x_j são valores de séries temporais em instantes de tempo i e j . Os valores positivos e negativos de S representam tendências ascendentes ou descendentes na série temporal. Sob a hipótese nula de que todos os elementos X são classificados aleatoriamente e independentes, S é uma variável aleatória normal com a média e a variância dada pela equação (2.7) (FANG *et al.*, 2019).

$$E(S) = 0, \quad (2.6)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (2.7)$$

Onde t_i é o número de repetições de uma extensão i . A estatística de teste padronizada Z é definida na equação (2.8).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

A significância da tendência é determinada pela comparação de Z com o valor crítico $|Z| - \alpha / 2$ no nível de significância designado α , se $|Z|$ for maior do que $|Z| - \alpha / 2$ significa a rejeição da hipótese nula e a existência de tendência estatisticamente significativa (FANG *et al.*, 2019), caso contrário, a tendência não será significativa. Quatro níveis de significância podem ser adotados para uma probabilidade de erro menor do que 0,1% ($p < 0,001$), menor que 1% ($p < 0,01$), inferior a 5% ($p < 0,05$) e erro inferior a 10% ($p < 0,10$) (ABRAHÃO; PEIXOTO; CARVALHO, 2017).

Sen (1968) estimou a inclinação da tendência para um conjunto de dados através da equação (2.9) (GOCIC; TRAJKOVIC, 2013).

$$Q = \frac{x_j - x_i}{j - i} \quad \text{para } i = 1, \dots, N. \quad (2.9)$$

Onde x_i e x_j são valores de séries temporais em instantes de tempo i e j . Se houver n valores na série, então:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.10)$$

O estimador de declive de Sen é a mediana dos N valores de Q .

2.3.2. Países citados nas análises de tendências de dados climáticos históricos *Science Direct*

Dos 24 artigos obtidos no *Science Direct*, 16 países foram citados nas análises com dados climáticos históricos. A China foi o país mais referenciado, em 5 artigos. Canadá, Paquistão e Estados Unidos em 3 artigos. Brasil em 2 artigos. México, Peru, Irã, Etiópia, Tailândia, Japão, Grécia, Austrália, Cazaquistão, Nepal e Índia em 1 artigo.

Na China, os autores Jiapaer *et al.* (2015) estudaram as mudanças climáticas e os efeitos induzidos pelo homem na dinâmica da vegetação. Jiapaer *et al.* (2015) aplicaram o método de regressão linear para temperatura média do ar na província de Xinjiang. Foi observado uma tendência crescente na temperatura média do ar, nos últimos 30 anos na primavera, no verão e no outono com taxas de variação de 0,104 °C/ano, 0,0996 °C/ano, e 0,096 °C/ano, respectivamente. A precipitação apresentou tendências de aumento no inverno na região do Tianshan Ocidental e do Xinjiang do Norte, sendo que o maior aumento ocorreu nas montanhas Altay, com uma taxa de variação de 5,8 mm/ano. Foi observado que houve uma alteração no padrão climático de quente-seco a quente-úmido na Província de Xinjiang. Em 2016, outro artigo teve como objetivo compreender o impacto das mudanças climáticas no regime hidrológico na região do Himalaia. Foram incluídos nesse estudo a China, Nepal e Índia foram incluídas no estudo (NEPAL, 2016). O autor Nepal (2016) fez uma análise de tendências utilizando o teste não paramétrico de Mann-Kendall e o método de Sen's para dados históricos de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar. Esse estudo mostrou uma tendência de aumento ($p < 0,001$) para as temperaturas máxima e mínima do ar, a taxa média foi de 0,058 °C/ano e 0,014 °C/ano, respectivamente. A precipitação apresentou poucas tendências significativas. Nepal (2016) afirmou que esses resultados devem ser avaliados como indicadores das condições hidrológicas futuras. Estudos avaliando o impacto das mudanças climáticas na agricultura são importantes, pois é possível avaliar, mitigar e adaptar a produção para as condições climáticas locais. Nesse sentido, os autores Tao *et al.* (2017) utilizaram dados de colheita e climáticos de Huang-Huai-Hai Plain (HHHP) – China para investigar os impactos do clima durante diferentes estágios de crescimento e rendimento de trigo no inverno. Para analisar as tendências, a regressão linear foi utilizada e a significância estatística foi testada usando o teste t. Foi visto que a temperatura máxima e mínima do ar aumentou significativamente em 0,4 °C/década e 0,6 °C/década, respectivamente, de 1981 a 2009. Enquanto a radiação solar diminuiu significativamente em 0,2 MJ/m²/dia e a precipitação não foi alterada (TAO *et al.*, 2017).

Para compreender a eficácia dos programas de proteção ambiental e a sustentabilidade dos ecossistemas de pastagens uma avaliação quantitativa foi realizada mediante dados de sensoriamento remoto, meteorológicos e observações de campo em alguns pontos na China em 2018 (ZHANG *et al.*, 2018a). Zhang *et al.* (2018a) analisaram a inclinação da tendência linear dos dados climáticos mediante a equação (2.1). Os dados de precipitação e temperatura média do ar apresentaram tendência de aumento de 1,51

mm/ano e 0,04 °C/ano respectivamente, no período de 1990 a 2013. Para apresentar a variabilidade do clima com o tempo, no período de 2000 a 2013, a precipitação teve uma tendência de aumento de 2,43 mm/ano e a temperatura média teve um crescimento de 0,03 °C/ano. Ainda em 2018, as mudanças em áreas com lagos e cobertura vegetal no planalto de Qinghai-Tibetano foi avaliado por Zhang *et al.* (2018b) juntamente com suas relações com o clima. Através do método de Mann-Kendall e declive de Sen, deste 1982 a 2013, Zhang *et al.* (2018b) estudaram alguns elementos climáticos, aplicando também a regressão linear simples. Foi visto que a temperatura média anual apresentou tendência significativa de crescimento em 1/3 das estações durante o período de 1981 a 2000. Analisando o período de 1981 a 2013 quase toda a região apresentou tendências significativas de aumento. Os autores concluíram que a temperatura do ar a partir do ano 2000 nessa região teve um aumento rápido.

Os autores Hartmann e Andresky (2013) analisaram os registros de precipitação no período de 1951 a 2010 e 1986 a 2010, ao longo de toda bacia Indus no Paquistão aplicando o teste não parâmetro de Mann-Kendall. Tendências significativas e crescentes de precipitação foram detectadas principalmente nas montanhas: no noroeste (montanhas *Hindu Kush* e *Sulaiman*) e no leste (Himalaia) de *Upper Reaches* do rio Indus. Algumas tendências negativas de precipitação, foram detectadas no nordeste de *Upper Reaches* (*Karakorum* e *Transhimalaya*) (HARTMANN; ANDRESKY, 2013).

Tahir *et al.* (2015) investigaram possíveis tendências em dados de precipitação, temperatura média e vazão do rio em alguns pontos na bacia do Alto Indu, no Paquistão. O teste não paramétrico de Mann- Kendall e o estimador de Theil-Sen (declinação de Sen) foram utilizados na pesquisa de Tahir *et al.* (2015). Nesse estudo, em específico, as variáveis climáticas não apresentaram tendências significativas para a estação de *Astore* ($p > 0,05$). Mesmo com esse resultado foi sugerido a presença de uma tendência de aumento na vazão e na precipitação, e uma diminuição da temperatura média do ar no verão na bacia do rio *Astore* (TAHIR *et al.*, 2015).

Os autores Amin *et al.* (2018) analisaram a tendência de 39 estações meteorológicas no Paquistão, no período histórico de 1996-2015, para a temperatura máxima e mínima do ar utilizando os teste de Mann-Kendall e Sen's. Além disso, os autores avaliaram as projeções dos dados. No estudo foi observado um número maior de tendências significativas de crescimento para a temperatura máxima do ar, como exemplo, nos meses de fevereiro e março os aumentos foram de 0,06 °C/ano e 0,51 °C/ano, respectivamente (AMIN *et al.*, 2018).

Cutforth e Judiesch (2007) analisaram dados meteorológicos históricos em sete cidades (urbanas e rurais) nas Pradarias Canadenses, região no oeste do Canadá entre 1957 e 2005. O teste de Spearman foi utilizado para analisar as tendências climáticas. As temperaturas máximas e mínimas do ar aumentaram cerca de 0,023 °C/década e 0,027 °C/década, respectivamente (CUTFORTH; JUDIESCH, 2007). Em relação aos parâmetros de horas de sol e de radiação solar, apenas a radiação solar apresentou tendências significativas de redução nas estações de *Suffield*, *Bad Lake-Outlook* e *Swift Current*, sendo $p < 0,01$ (CUTFORTH; JUDIESCH, 2007). Foi sugerido que as principais causas da tendência de diminuição da radiação solar incidente tenha sido o aumento da umidade do ar e da nebulosidade.

Os autores Baustian *et al.* (2014) analisaram o comportamento da temperatura do ar e da precipitação no lago *St. Clair*, localizado entre os Estados Unidos e o Canadá no período de 1972 a 2002. Baustian *et al.* (2014), através da regressão linear, observaram que no período de inverno, entre os anos de 1998-1999, houve um aumento da temperatura do ar e como consequência a redução da cobertura de gelo do lago (BAUSTIAN *et al.*, 2014). A temperatura média do ar tem aumentando nos últimos 60 anos ($p < 0,001$) e a temperatura do lago apresentou aumento significativo desde 1948 ($p < 0,001$). Desde o ano de 1900 a precipitação anual aumentou 0,03 mm/ano ($p < 0,05$) (BAUSTIAN *et al.*, 2014).

Em uma região de vinícola no Vale *Okanagan*, na Columbia Britânica-Canadense, a temperatura média do ar foi analisada em períodos entre 1900 e 2014 (RAYNE; FOREST, 2016). No estudo de Rayne e Forest (2016) as tendências foram examinadas usando testes paramétricos e não paramétricos (correlações de classificação de Spearman e Kendall) e modelos de regressão linear usando o pacote de *software* KyPlot v2.0b15. Como resultado foi observado que a temperatura média do ar está aumentando no período de crescimento e de dormência no cultivo de uvas. Essas mudanças na temperatura alteraram a classificação da vinícola estudada de clima frio para zona intermediária (RAYNE; FOREST, 2016).

As análises de tendências de precipitação, evapotranspiração e vazão de rio foram realizadas por Xu *et al.* (2013) em 55 bacias hidrográficas no meio-oeste dos EUA. As tendências foram avaliadas através do teste não paramétrico de Mann-Kendall. Como resultado, em 78% das bacias não houve tendências detectadas de precipitação e nos 22% restantes as tendências foram de aumento ($2,40 \pm 0,39$ mm/ano) (XU *et al.*, 2013). Para a evapotranspiração ocorreu o mesmo, em apenas 22% das bacias as tendências foram

significativas e decrescente ($1,17 \pm 0,24$ mm/ano). O fluxo dos rios aumentou significativamente em 35% das bacias ($2,35 \pm 0,28$ mm/ano) (XU *et al.*, 2013).

Os autores Molina e Allen (2020) investigaram as tendências climáticas, assim como a relação desses parâmetros climáticos com tormentas e tempestades severas que atingem os Estados Unidos vindas do oceano atlântico. Molina e Allen (2020), investigaram tendências climáticas de longo prazo (1981-2017) de umidade relativa do ar usando o teste de Mann-Kendall e regressão linear. Em ambas as análises estatísticas de tendências foi observado que a magnitude e a taxa de umidade têm aumentado desde a década de 1980 (MOLINA; ALLEN, 2020).

O desenvolvimento da urbanização podem influenciar no clima local, neste sentido De Oliveira *et al.* (2020) realizaram um estudo em Belém, capital do Pará-Brasil entre os anos de 1980 e 2017, avaliando o comportamento dos dados climáticos históricos utilizando regressão linear. Os parâmetros selecionados foram velocidade do vento, umidade relativa do ar, precipitação, temperatura máxima, mínima e média do ar. Os resultados mostraram que as temperaturas estão aumentando, enquanto a umidade relativa do ar e o vento estão diminuindo ao longo dos anos, ou seja, o clima local está ficando mais quente e seco. Esse comportamento segue uma tendência climática regional (DE OLIVEIRA *et al.*, 2020). Houve aumento na precipitação anual acumulada, que pode ter sido ocasionado por alterações na dinâmica atmosférica relacionada ao processo de urbanização (DE OLIVEIRA *et al.*, 2020). Os autores Medeiros *et al.* (2021) realizaram um estudo de tendências climáticas, assim como o impacto do clima em uma pequena central hidrelétrica e uma usina solar na região semiárida da Paraíba-Brasil, entre os anos de 1950 e 2016. Os autores Medeiros *et al.* (2021) observaram as tendências climáticas através de regressão linear e do teste não paramétrico de Mann-Kendall quantificada pelo declive de Sen. As tendências da temperatura média do ar no período anual foram de aumento e significativas para Patos (1975-2014) ($0,04$ °C/ano) e inconclusivas para São Gonçalo (1950-2016). Também foi observado um aumento de $0,01$ °C/ano ($p < 0,001$) na temperatura média do ar para as outras localidades analisadas no período de 1950 a 2016.

No México, o estudo realizado por Antaramian e Múzquiz-iribe (1997), analisou as mudanças microclimáticas em áreas com grande urbanização e alta densidade populacional. As tendências de precipitação e temperatura do ar foram analisadas em 5 estações meteorológica de 1949 a 1990/91 localizadas no estado de *Michoacán*-México. As tendências de precipitação através da análise de regressão linear demonstraram decréscimo para todas as estações. A tendência de redução na temperatura média do

ar na cidade de *Zamora* foi de 1°C/década. Em *Morelia*, capital do estado, a temperatura máxima do ar apresentou uma tendência de aumento de 0,092°C/década. Essa tendência de aumento na temperatura máxima do ar em *Morelia* foi atribuída ao rápido desenvolvimento urbano, em contraste com as outras cidades que estão situadas em regiões rurais (ANTARAMIAN; MÚZQUIZ-IRIBE, 1997).

López-Moreno *et al.* (2014) analisaram as tendências climáticas a partir de séries mensais de 11 estações meteorológicas que estavam a 50 km da Cordilheira *Huaytapallana*, Peru. As tendências climáticas foram analisadas através do teste estatístico de Wilcoxon-Mann-Whitney. A temperatura mínima do ar na estação seca teve uma tendência significativa de diminuição de 0,1 °C/década ($p < 0,05$). A temperatura máxima do ar teve aumentos significativos na estação seca e úmida, de 1965 a 2011, a uma taxa foi de 0,22 °C/década (LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2014). Ainda segundo López-moreno *et al.* (2014) a precipitação nesta região também aumentou durante a estação úmida de 1965 a 2011.

Fitchett *et al.* (2014) estudaram as tendências de parâmetros climáticos, e relacionaram com o pico de floração de cinco frutas cítricas, no Irã. Fitchett *et al.* (2014) analisaram as tendências de temperatura máxima, mínima do ar e precipitação por meio de regressão linear no período de 1960 a 2010. Apenas na cidade de *Gorgan*, a precipitação apresentou uma tendência negativa significativa ($r=0,57$, $p < 0,0001$), que corresponde uma diminuição de 4,7 mm/ano. Em *Kerman*, a temperatura máxima e mínima do ar apresentaram tendências significativas de aumento de 0,05 °C/ano para a temperatura máxima do ar e de 0,03 °C/ano para a temperatura mínima. E em *Shiraz* a temperatura mínima, máxima do ar e a precipitação apresentaram tendências significativas de aumento.

Mudanças no clima podem alterar o ecossistema de regiões mais secas. Pensando nisso, os autores Zewdie, Csaplovics e Inostroza (2017) realizaram um monitoramento de mudanças de longo prazo do índice de vegetação, precipitação e temperatura média do ar para um região localizada no noroeste da Etiópia. As tendências climáticas foram avaliadas através o teste de Mann-Kendall no período de 1983 a 2014. Foi observada uma tendência significativa de crescimento na precipitação anual, incluindo aumento na temperatura máxima do ar (0,04°C/ano) e na temperatura mínima do ar (0,03°C/ano) (ZEWDIE; CSAPLOVICS; INOSTROZA, 2017). Esse aumento na temperatura do ar tem um efeito sobre a umidade do solo que afeta o crescimento da vegetação em regiões

áridas e semiáridas. Uma avaliação mais profunda é necessária para quantificar esses efeitos na região (ZEWDIE; CSAPLOVICS; INOSTROZA, 2017).

Para compreender as características do clima e seu impacto na produtividade do arroz, Prabnakorn *et al.* (2018) investigaram as tendências climáticas dos últimos 30 anos (1984-2013), no nordeste da Tailândia. Através do método de regressão linear Prabnakorn *et al.* (2018) investigaram as tendências climáticas. A análise de tendências de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar mostraram em sua maioria que estão aumentando. A temperatura máxima do ar teve taxas crescimento de até 0,8 °C/década (1984-2013) (PRABNAKORN *et al.*, 2018). Shimoda, Kanno e Hirota (2018) analisaram como as variações climáticas recentes impulsionam na produtividade da batata, em Hokkaido-Japão, para o período de 1986 a 2014. Shimoda, Kanno e Hirota (2018) utilizaram regressão linear para avaliar dados climáticos. Foi observada uma tendência de aumento das temperaturas máxima e média do ar no verão desde 1986, com exceção da temperatura mínima do ar, com isso a produção de batata se estabilizou.

Na região do Mediterrâneo Oriental na Grécia foram observados dados de superfície e radiossonda, de temperatura do ar e umidade relativa do ar entre os anos de 1979 a 2017 (TZANIS *et al.*, 2019). Tzanis *et al.* (2019) investigaram a magnitude e a significância estatística das tendências climáticas das séries temporais usando uma abordagem não paramétrica de Theil – Sen combinada com o Mann-Kendall e a inclinação de Sen. Foram observadas tendências significativas (nível de confiança de 95% e 99%) crescentes na temperatura média do ar. Os autores observaram que a temperatura média do ar especificamente a 2 m tende a aumentar mais rapidamente na terra do que na água (TZANIS *et al.*, 2019).

Foi realizada uma análise nas tendências de longo prazo de variáveis climáticas, em uma bacia hidrográfica localizada na Austrália, para compreender as tendências nas perdas de água por evaporação em corpos d'água abertos, entre 1988 e 2018 (FUENTES; VAN OGTROP; VERVOORT, 2020). Nos estudos de Fuentes, Van Ogtrop e Vervoort (2020) o teste de Mann-Kendall e a inclinação de Sen foram utilizados. Como resultado, as temperaturas mínima, máxima e média do ar aumentaram significativamente nos últimos 31 anos. A temperatura mínima do ar variou entre -0,027 °C/ano e 0,073 °C/ano, em 48% da área analisada. A temperatura máxima do ar variou entre 0,009 °C/ano e 0,076 °C/ano em 99% da área analisada. A temperatura média do ar foi de 0,015 °C/ano a 0,047 °C/ano. A precipitação e a umidade relativa do ar no geral estão diminuindo (FUENTES; VAN OGTROP; VERVOORT, 2020).

Os autores Schierhorn *et al.* (2020) avaliaram as tendências climáticas na produção de cereais (trigo e cevada), no período de 1980 a 2015, em quatro províncias do norte do Cazaquistão. Schierhorn *et al.* (2020) avaliaram as tendências de precipitação e temperatura média do ar através do teste de Mann-Kendall. As tendências foram positivas tanto para os dados de temperatura média do ar quanto para a precipitação total durante a estação de crescimento dos cereais, porém o impacto sobre a produtividade foi pequeno entre -1,9% e -4,8% (SCHIERHORN *et al.*, 2020).

Web of Science

Seis países foram citados nos artigos selecionados no *Web of Science*, China, Itália, Zimbábue, Brasil e uma região que abrange Estados Unidos e Canadá.

Os autores Mcbean e Motiee (2006) analisaram o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no sistema dos grandes lagos que abrange os Estados Unidos e o Canadá, nos anos de 1948 a 2000 para temperatura média do ar e de 1930 a 2000 para a precipitação. Nas análises de tendências feitas por Mcbean e Motiee (2006), a precipitação apresentou aumentos significativos no período de 1930 a 2000 ($p < 0,05$), em quatro lagos, *Michigan, Huron, Erie e Ontário*. Para a temperatura média do ar não foi observada nenhuma tendência significativa nessa região.

Streck *et al.* (2011) analisaram tendências históricas de parâmetros climáticos, no município de Santa Maria pertencente ao estado do Rio Grande do Sul-Brasil, para o estudo de impacto do clima na agricultura. No período de 1º de maio de 1970 a 31 de dezembro de 2009, na Estação Meteorológica Principal de Santa Maria (ECPSM). Na agricultura de regiões subtropicais o aumento da temperatura de relva durante o inverno tem impacto na quebra da dormência de frutíferas caducifólias e o aumento no verão aumenta a respiração do tecido vegetal no período noturno. Isso pode ter impacto negativo reduzindo a fotossíntese líquida e a produtividade das culturas do pessegueiro e da macieira (STRECK *et al.*, 2011).

Os autores Arnone *et al.* (2013) utilizaram o teste estatístico para investigar tendências climáticas históricas na Sicília, entre os anos de 1956 e 2005, em 60 estações meteorológicas. Nas análises de tendências de precipitação diária, Arnone *et al.* (2013) verificaram que no intervalo de 1 hora de chuva 14% das estações apresentaram tendências significativas e crescentes, $p < 0,05$. Para as durações de 3, 6 e 12 h uma tendência positiva foi detectada em cerca de 4 e 7% das estações, enquanto para a duração de 24 horas 7% apresentaram tendências significativas de diminuição. Porém para a

maioria das estações não foram observadas tendências significativas (ARNONE *et al.*, 2013).

Utete *et al.* (2018) avaliaram os efeitos do clima em locais onde é realizado a captura de peixes, no lago *Chivero* e *Manyame* no Zimbábue. No período de 1983 a 2016 para parâmetros climáticos que influenciam na captura de peixes. Os dados anuais de velocidade média do vento foram significativos e crescentes de acordo com a pesquisa realizada por Utete *et al.* (2018). As temperaturas de superfície dos lagos, a umidade relativa do ar e a precipitação não indicaram tendências significativas. Houve um aumento significativo na evapotranspiração. Por fim, os autores afirmaram que os elementos climáticos têm uma relação significativa com a captura de peixes em lagos periurbanos.

Os autores Lin *et al.* (2020) utilizaram dados históricos mensais de precipitação e temperatura média do ar de 19 estações meteorológicas de 1960 a 2015 e dados futuros, referentes a bacia do Rio *Huai* localizada no leste da China, para analisar as tendências no índice de seca. Não foram observadas tendências significativas no índice de seca utilizando dados históricos climáticos, no período anual e sazonal (primavera, verão, outono, inverno). No cálculo de índice de seca utilizando dados climáticos futuros, quando a temperatura média do ar foi levada em consideração a tendência foi significativa e crescente (LIN *et al.*, 2020).

2.3.3. Parâmetros climáticos utilizados nos estudos de tendências climáticas históricas

Science Direct

Nas análises dos dados climáticos históricos o parâmetro de precipitação foi o mais utilizado, esteve presente em 19 dos 24 artigos selecionados no *Science Direct*. A temperatura média, máxima e mínima do ar estiveram em 13, 12 e 12 citações, respectivamente. A umidade relativa do ar foi citada em 5 artigos. A irradiação global, em 3 artigos. Horas de sol e número de dias com precipitação, em 2 artigos, e por fim, a evapotranspiração e a velocidade do vento citado em 1 artigo cada.

Web of Science

Na biblioteca do *Web of Science* o parâmetro climático mais utilizado foi a precipitação que esteve presente em três artigos do *Web of Science*. Em seguida os parâmetros de temperatura média, mínima e máxima do ar, temperatura do lago,

velocidade do vento, umidade relativa do ar, evapotranspiração e índice de seca foram selecionados uma vez.

2.4. CONCLUSÃO

Nesta revisão sistemática foram abordados os métodos estatísticos utilizados para as avaliações de tendências de dados climáticos históricos, por meio dos bancos de dados de pesquisas científicas do *Science Direct* e do *Web of Science*. Com a metodologia aplicada o resultado da pesquisa gerou no *Science Direct* 124 artigos, e no *Web of Science* 30 artigos. Após análise nos artigos, 24 artigos no *Science Direct* e 5 artigos do *Web of Science* estavam dentro do contexto da temática.

Muitos estudos foram utilizados para compreensão do clima local, incluindo o impacto no setor agrícola. No *Science Direct* grande parte dos artigos selecionados foram produzidos na China, para discutir o impacto do clima na vegetação e na produção de cereais. No Brasil, um artigo realizado na região semiárida no estado da Paraíba correlacionou as tendências de temperatura média do ar com a produção fotovoltaica. Os parâmetros climáticos mais avaliados nos estudos foram as temperaturas mínima, máxima e média do ar e a precipitação.

A regressão linear e o teste não paramétrico de Mann-Kendall associado ao declive de Sen, foram os métodos estatísticos mais utilizados nas análises de tendências climáticas históricas, no *Science Direct*. No *Web of Science* o teste de Mann-Kendall e o declive de Sen foram os únicos utilizados. O uso da regressão linear foi utilizado para visualizar o comportamento dos dados, porém, nem sempre foi aplicada uma estatística para validar e quantificar a presença de possíveis tendências.

Baseado nesta revisão existem diversas lacunas nas pesquisas de tendências climáticas históricas, principalmente as relacionadas com o setor energético no Brasil. Para obtenção de energia elétrica baseada em recursos renováveis o impacto do clima deve ser avaliado por se tratar de um setor bastante suscetível às alterações do clima.

2.5. REFERÊNCIAS

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.

AMIN, A. *et al.* Evaluation and analysis of temperature for historical (1996–2015) and projected (2030–2060) climates in Pakistan using SimCLIM climate model: Ensemble application. **Atmospheric Research**, v. 213, n. January, p. 422–436, 2018.

ANTARAMIAN, E.; MÚZQUIZ-IRIBE, E. Recent climate trends in Michoacán. **Quaternary International**, v. 43–44, n. 97, p. 33–42, 1997.

ARNONE, E. *et al.* Rainfall statistics changes in Sicily. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2449–2458, 2013.

BAUSTIAN, M. M. *et al.* A one hundred year review of the socioeconomic and ecological systems of Lake St. Clair, North America. **Journal of Great Lakes Research**, v. 40, n. 1, p. 15–26, 2014.

CUTFORTH, H. W.; JUDIESCH, D. Long-term changes to incoming solar energy on the Canadian Prairie. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, n. 3–4, p. 167–175, 2007.

DANG, Xin *et al.* Theil-sen estimators in a multiple linear regression model. **Olemiss Edu**, 2008.

DE OLIVEIRA, J. V. *et al.* Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. **Urban Climate**, v. 31, n. December 2019, p. 100579, 2020.

FANG, W. *et al.* Copulas-based risk analysis for inter-seasonal combinations of wet and dry conditions under a changing climate. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 4, p. 2005–2021, 2019.

FELTOVICH, N. Nonparametric tests of differences in medians: comparison of the Wilcoxon–Mann–Whitney and robust rank-order tests. **Experimental Economics**, v. 6, n. 3, p. 273–297, 2003.

FITCHETT, J. M. *et al.* Spatio-temporal variation in phenological response of citrus to climate change in Iran: 1960–2010. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198, p. 285–293, 2014.

FUENTES, I.; VAN OGTROP, F.; VERVOORT, R. W. Long-term surface water trends and relationship with open water evaporation losses in the Namoi catchment, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 584, n. December 2019, p. 124714, 2020.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 172–182, 2013.

GOUGH, D.; OLIVER, S.; THOMAS, J. An Introduction to Systematic Reviews. p. 303, 2012.

GÜÇLÜ, Y. S. Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. **Journal of Hydrology**, v. 566, n. September, p. 685–704, 2018.

HARTMANN, H.; ANDRESKY, L. Flooding in the Indus River basin - A spatiotemporal

- analysis of precipitation records. **Global and Planetary Change**, v. 107, p. 25–35, 2013.
- JAISWAL, R. K.; LOHANI, A. K.; TIWARI, H. L. Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters. **Environmental Processes**, v. 2, n. 4, p. 729–749, 2015.
- JIA, G. *et al.* Chapter 2: Land–climate interactions. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**, p. 131–248, 2019.
- JIAPAER, G. *et al.* Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator. **Ecological Indicators**, v. 58, p. 64–76, 2015.
- LIN, H. *et al.* Drought trends and the extreme drought frequency and characteristics under climate change based on spi and hi in the upper and middle reaches of the Huai River Basin, China. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 4, 2020.
- LOPES, J. C. D. J. Mudanças climáticas e suas conseqüências socioeconômicas. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. 127–146, 2008.
- LÓPEZ-MORENO, J. I. *et al.* Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. **Global and Planetary Change**, v. 112, p. 1–11, 2014.
- MCBEAN, E.; MOTIEE, H. Assessment of impacts of climate change on water resources – a case study of the Great Lakes of North America. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 3, n. 5, p. 3183–3209, 2006.
- 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.
- MOLINA, M. J.; ALLEN, J. T. Regionally-stratified tornadoes: Moisture source physical reasoning and climate trends. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, n. October 2019, p. 100244, 2020.
- MOURATO, S.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 12, p. 1784–1794, 2010.
- NEPAL, S. Impacts of climate change on the hydrological regime of the Koshi river basin in the Himalayan region. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 10, p. 76–89, 2016.
- PRABNAKORN, S. *et al.* Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 108–119, 2018.
- RAYNE, S.; FOREST, K. Rapidly changing climatic conditions for wine grape growing in the Okanagan Valley region of British Columbia, Canada. **Science of the Total Environment**, v. 556, p. 169–178, 2016.

SCHIERHORN, F. *et al.* Spatially varying impacts of climate change on wheat and barley yields in Kazakhstan. **Journal of Arid Environments**, v. 178, n. October 2019, p. 104164, 2020.

SHIMODA, S.; KANNO, H.; HIROTA, T. Time series analysis of temperature and rainfall-based weather aggregation reveals significant correlations between climate turning points and potato (*Solanum tuberosum* L) yield trends in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263, n. February, p. 147–155, 2018.

STRECK, N. A. *et al.* Temperatura mínima de relva em Santa Maria, rs: Climatologia, variabilidade interanual e tendência histórica. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 696–706, 2011.

TAHIR, A. A. *et al.* Snow cover trend and hydrological characteristics of the Astore River basin (Western Himalayas) and its comparison to the Hunza basin (Karakoram region). **Science of the Total Environment**, v. 505, p. 748–761, 2015.

TAO, F. *et al.* Wheat yield benefited from increases in minimum temperature in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 1–14, 2017.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence- informed approach. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207–222, 2003.

TZANIS, C. G. *et al.* Recent climate trends over Greece. **Atmospheric Research**, v. 230, n. June, p. 104623, 2019.

UTETE, B. *et al.* Fish catches, and the influence of climatic and non-climatic factors in Lakes Chivero and Manyame, Zimbabwe. **Cogent Food & Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2018.

XU, X. *et al.* Relative importance of climate and land surface changes on hydrologic changes in the US Midwest since the 1930s: Implications for biofuel production. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 110–120, 2013.

WANG, Wenpeng *et al.* Linear trend detection in serially dependent hydrometeorological data based on a variance correction Spearman rho method. **Water**, v. 7, n. 12, p. 7045–7065, 2015.

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.

ZEWDIE, W.; CSAPLOVICS, E.; INOSTROZA, L. Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. **Applied Geography**, v. 79, p. 167–178, 2017.

ZHANG, H. *et al.* Changes in multiple ecosystem services between 2000 and 2013 and their driving factors in the Grazing Withdrawal Program, China. **Ecological Engineering**, v. 116, n. November 2017, p. 67–79, 2018a.

ZHANG, Z. *et al.* The response of lake area and vegetation cover variations to climate change over the Qinghai-Tibetan Plateau during the past 30 years. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 443–451, 2018b.

Capítulo 3

3. ARTIGO: Estudo da irradiação solar horizontal observada e estimada para o estado da Paraíba

Resumo: Existem diversas bases de dados de radiação solar, dados de medições no solo e dados de satélite. É importante entender a precisão das medições de satélite em comparação com os dados de superfície. De posse dos dados de irradiação solar total horizontal observados obtidos de estações meteorológicas (INMET) e estimados (ABES e NASA), foi realizada uma análise para sete localidades no estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil. A irradiação solar difusa horizontal foi obtida utilizando os dados de irradiação solar total horizontal do INMET. A irradiação solar difusa horizontal do INMET foi analisada mediante os dados do ABES e da NASA. Os dados de irradiação solar total do INMET e ABES apresentaram diferenças menores do que entre os dados do INMET e NASA, com exceção da estação de Areia. Foi verificada a presença de tendências significativas através do teste de Mann-Kendall quantificadas pelo declive de Sen, no período anual nos dados de irradiação solar total horizontal do INMET, na estação de Areia e Cabaceiras, onde essas tendências foram de redução. Em Areia, Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande e Patos alguns meses apresentaram tendências significativas. Através das métricas de análise de dispersão, MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE, os dados de irradiação solar total horizontal do INMET e da NASA foram correlacionados, no mesmo período de tempo. Nas estações de Areia, Cabaceiras e João Pessoa os dados da NASA apresentaram valores mais baixos que os dados mensais do INMET. Avaliando o rMAE e o rRMSE os resultados estão dentro do limite aceitável para Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande e São Gonçalo. O estudo da irradiação solar é importante para diversas aplicações, escolher uma base de dados segura aumenta a acurácia dos projetos que dependem desse parâmetro, como por exemplo os projetos relacionados à energia solar fotovoltaica.

Palavras-chave: Irradiação solar difusa horizontal; Tendências; Mann-Kendall; Declive de Sen; MBE; MAE; RMSE.

Abstract: There are several databases of solar radiation, ground measurement data and satellite data. It is important to understand the accuracy of satellite measurements compared to surface data. With the observed total horizontal solar irradiation data obtained from meteorological stations (INMET) and estimated (ABES and NASA), an analysis was carried out in seven locations in the state of Paraíba, Northeastern region of Brazil. The diffuse horizontal solar irradiation was obtained using INMET's total horizontal solar irradiation data. The diffuse horizontal solar radiation from INMET was analyzed using data from ABES and NASA. The total solar irradiation data from INMET and ABES showed smaller differences than between the data from INMET and NASA, except for the Areia station. The presence of significant trends was verified through the Mann-Kendall test quantified by the slope of Sen, in the annual period in the data of total horizontal solar irradiation from INMET, at Areia e Cabaceiras station, where these trends were of reduction. In Areia, Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande and Patos some months showed significant trends. Through the dispersion analysis metrics, MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE and rRMSE, the horizontal total solar irradiation data from INMET and NASA were correlated, in the same period of time. At Areia, Cabaceiras and João Pessoa stations, NASA data showed lower values than the monthly data from INMET. Evaluating the rMAE and rRMSE the results are within the acceptable limit for Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande and São Gonçalo. The study of solar irradiation is important for several applications. Choosing a secure database increases the accuracy of projects that depend on this parameter, such as projects related to photovoltaic solar energy.

Keywords: Horizontal diffuse solar irradiation; Trends; Mann-Kendall; Sen's slope; MBE; MAE; RMSE.

3.1. 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 MGHOUCHI *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.

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).

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-SEBAII *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).

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 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). 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).

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 e difusa horizontal, verificando se existe a presença de tendências climáticas do parâmetro de irradiação solar total horizontal em localidades do estado da Paraíba.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. 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 3.1). 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.

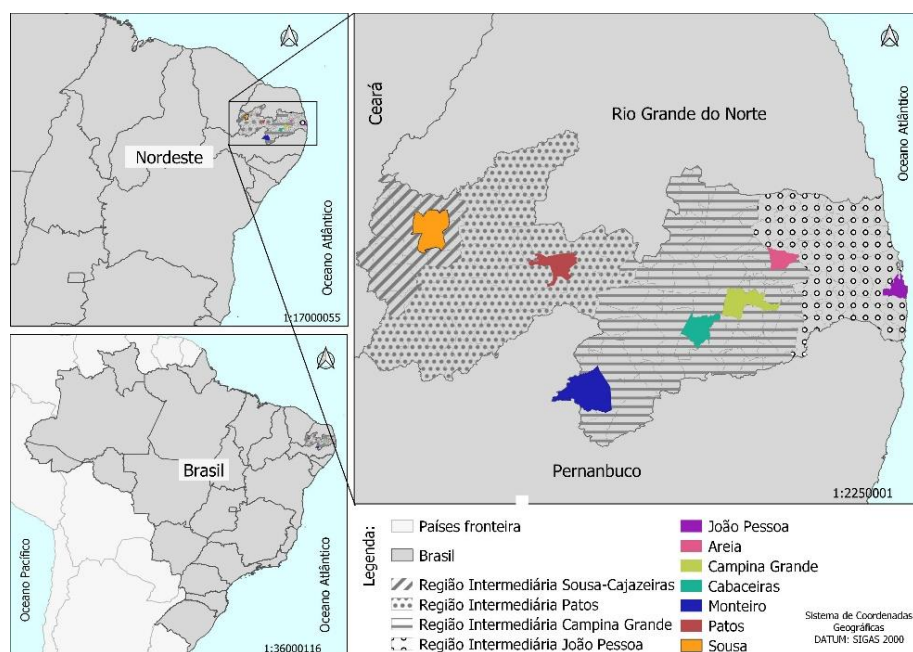


Figura 3.1 – Divisão do estado da Paraíba por regiões geográficas intermediárias e localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo.

Fonte: Adaptado do IBGE (2017b).

3.2.2. 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 3.1 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 $\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$.

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 3.1 - 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	Campina Grande
Cabaceiras	07°29' S	36°17' W	Fev. 2008 - Jun. 2019	
Campina Grande	07°13' S	35°53' W	Dez. de 2006 - Jun. 2019	
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	
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)

3.2.3. Obtenção da irradiação solar difusa horizontal a partir dos dados do INMET

Para calcular a irradiação difusa horizontal é necessário saber o valor da radiação extraterrestre numa superfície horizontal (\bar{H}_0 - valor médio diário representativo do mês) (J/m²) (Eq. (3.1), Eq. (3.2), Eq. (3.3) e Eq. (3.4)) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\bar{H}_0 = \frac{86400 G_{sc}}{\pi} \left[1 + \left(0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \right] \left[(\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s) + \left(\frac{\omega_s \pi}{180} \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \right) \right] \quad (3.1)$$

Onde:

G_{sc} : Constante solar, o valor utilizado foi de 1.367 W/m² (DUFFIE; BECKMAN, 2013);

n : Dia juliano; ϕ : Latitude local; ω_s : Ângulo horário;

Onde:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.2)$$

δ corresponde à declinação solar em função do dia juliano (dia médio) representativo do mês, que foi obtida através da equação de Spencer (1971);

Onde:

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \operatorname{sen} B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \operatorname{sen} 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \operatorname{sen} 3B) \quad (3.3)$$

Onde:

$$B = (n - 1) \left(\frac{360}{365}\right) \quad (3.4)$$

Segundo CHEN (2011) através do índice de claridade atmosférica (\bar{K}_t), é possível relacionar a radiação extraterrestre numa superfície com a radiação total horizontal obtida através de estações meteorológicas, ou seja, a razão entre os dois valores corresponde à transmissividade da atmosfera (Eq. (3.5)).

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (3.5)$$

Onde:

\bar{H} : irradiação total numa superfície.

Por fim, a irradiação difusa horizontal (\bar{H}_d) mensal foi estimada por meio das seguintes relações de Erbs, Klein e Duffie (1982):

Quando o ω_s for $\leq 81,4^\circ$ e $0,3 \leq \bar{K}_t \leq 0,8$, usa-se a equação (3.6).

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560 \bar{K}_t + 4,189 \bar{K}_t^2 - 2,137 \bar{K}_t^3 \quad (3.6)$$

Quando o ω_s for $> 81,4^\circ$ e $0,3 \leq \bar{K}_t \leq 0,8$, usa-se a equação (3.7).

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \bar{K}_t + 3,427 \bar{K}_t^2 - 1,821 \bar{K}_t^3 \quad (3.7)$$

3.2.4. Coleta dos dados de irradiação solar do Atlas Brasileiro de Energia Solar 2º 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 2º edição, fornece as médias anuais e mensais do total diário da irradiação total, e irradiação difusa horizontal (Wh/m².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).

3.2.5. Estatística e métodos de avaliação dos dados

3.2.5.1. 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).

3.2.5.2. 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. (3.8), Eq. (3.9), Eq. (3.10), Eq. (3.11), Eq. (3.12) e Eq. (3.13)) (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).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_{m-t} - H_s \quad (3.8)$$

$$rMBE = \frac{MBE}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m} \quad (3.9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |H_{m-t} - H_s| \quad (3.10)$$

$$rMAE = \frac{MAE}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m} \quad (3.11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (H_{m-t} - H_s)^2} \quad (3.12)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n H_m} \quad (3.13)$$

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

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. 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 3.2). 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 3.2), 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 3.2). 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 3.2). 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).

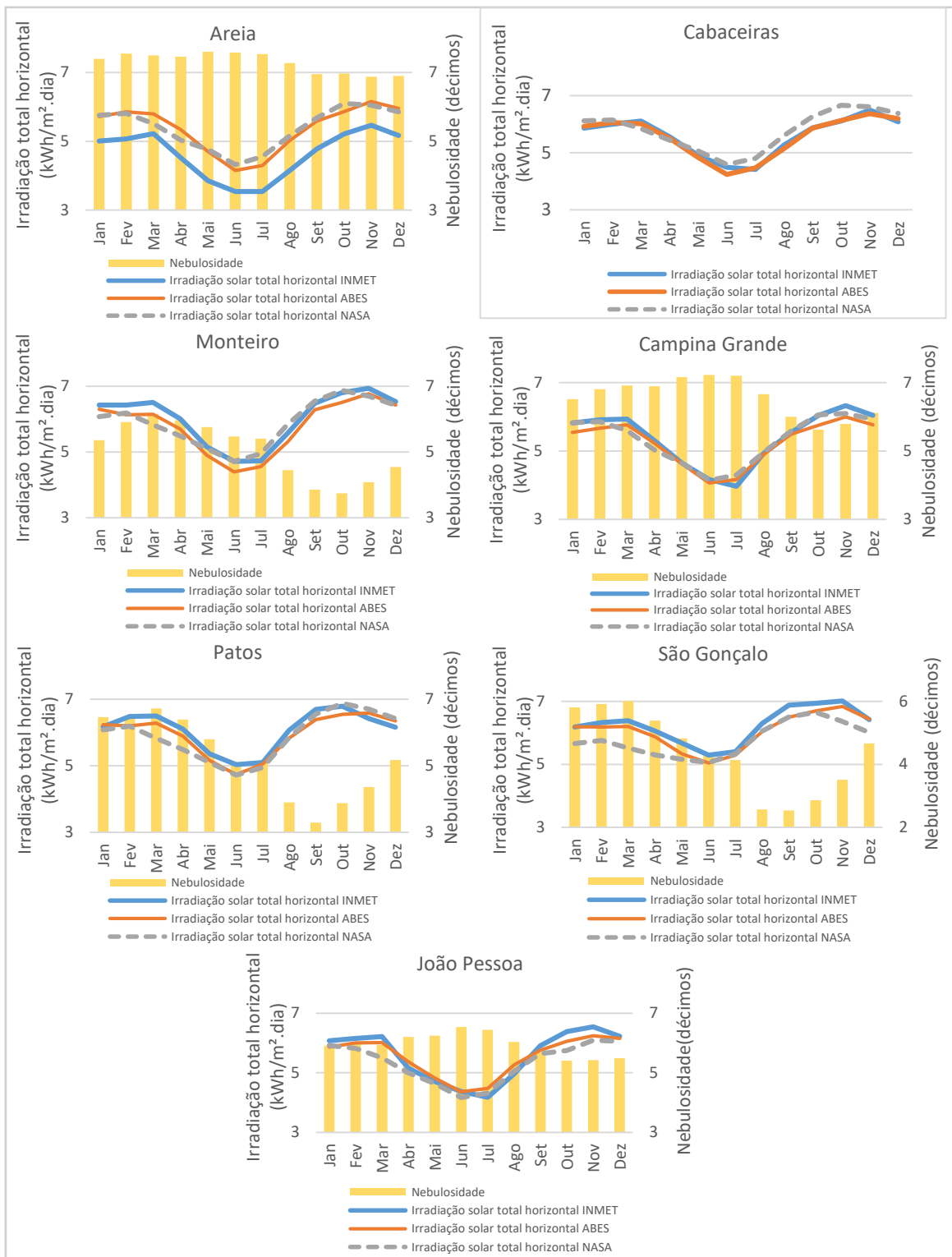


Figura 3.2 - Análise da nebulosidade (INMET) e da irradiação solar total horizontal mensal do INMET, ABES e NASA para a estação de Areia, Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande, Patos, São Gonçalo e João Pessoa na Paraíba.

Fonte: Autor.

3.3.2. 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 3.2). 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 3.2). 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 3.2). 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 3.2).

Tabela 3.2 - 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 3.3). 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 3.3). A irradiação solar total horizontal no mês de agosto aumentou 0,07 Wh/m²ano e em novembro reduziu 0,15 Wh/m²ano.

Tabela 3.3 - 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/m²ano)	Patos (kWh/m²ano)	São Gonçalo (kWh/m²ano)
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 foi observado nas Tabela 3.2 e Tabela 3.3. 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.

3.3.3. 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 3.4 Tabela 3.5 e Tabela 3.6. Em Areia (Tabela 3.4) 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 3.4). 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 3.4).

Tabela 3.4 – 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 3.5). 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 3.5). 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 3.5 - 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	Período	MBE	rMBE	MAE	rMAE	RMSE	rRMSE
		(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)	(Wh/m ² .dia)	(%)
	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 3.6) 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 3.6). 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 3.6). Os erros encontrados no MAE e no RMSE não foram tão discrepantes comparados com os encontrados nas outras estações.

Tabela 3.6 - 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.

	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	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	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
	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).

3.3.4. Irradiação solar difusa horizontal

Os dados de irradiação solar difusa horizontal pertencentes ao ABES, à NASA e os obtidos através das equações (3.6) e (3.7) mediante os dados do INMET, estão apresentados na Figura 3.3 e na Figura 3.4. Foi observado que a irradiação solar difusa não apresentou grandes oscilações durante o ano. A irradiação solar difusa horizontal calculada do INMET ficou próxima dos valores disponibilizados pelo ABES e pela NASA, as diferenças foram pequenas.

As estações localizadas na região geográfica intermediária de Campina Grande, Areia, Campina Grande, Cabaceiras e Monteiro, os dados do INMET apresentaram características semelhantes. A média anual da irradiação solar difusa horizontal foi em torno de 2,1 kWh/m².dia (Figura 3.3). Na maior parte dos meses a irradiação solar difusa horizontal do ABES esteve acima dos valores do INMET. Fato contrário foi observado em relação aos dados da NASA, quase todos os meses estavam abaixo dos dados obtidos através do INMET.

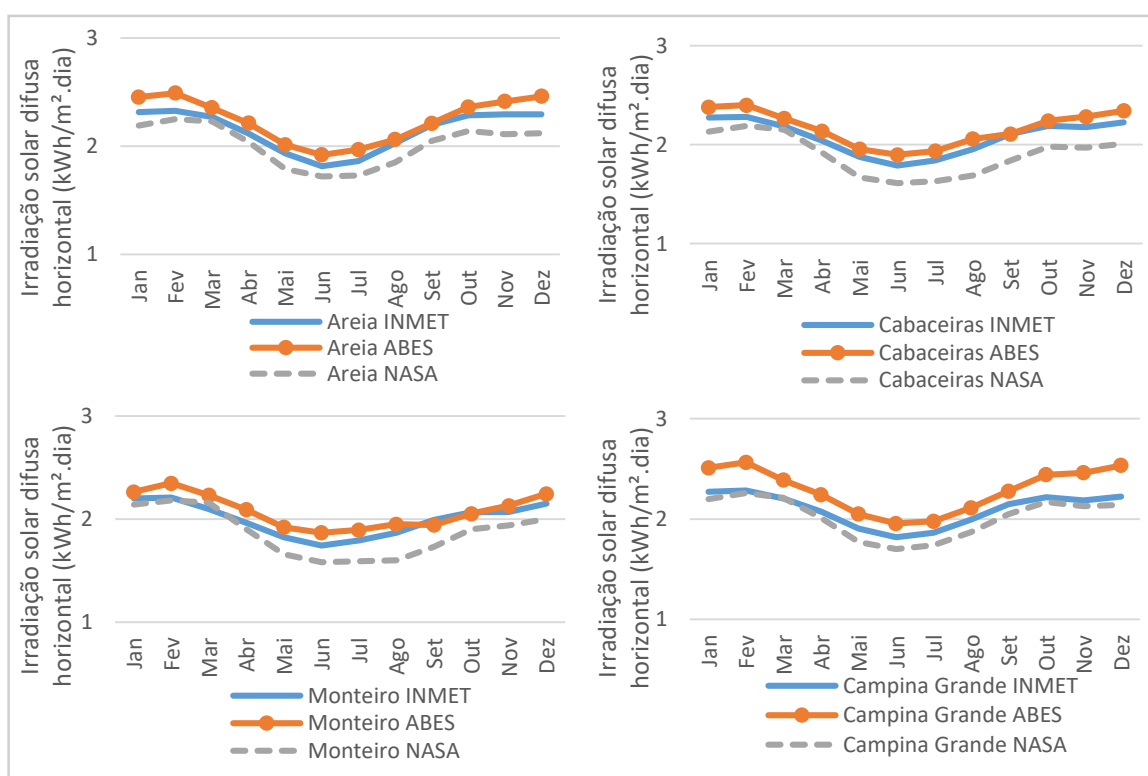


Figura 3.3 – Análise da média diária mensal da irradiação solar difusa horizontal do INMET, ABES e NASA para a estações de Areia, Cabaceiras, Monteiro, Campina Grande.

Fonte: Autor.

As diferenças entre os dados de irradiação solar difusa horizontal do INMET e ABES para Patos, São Gonçalo e João Pessoa foram menores do que as diferenças observadas na região intermediria de Campina Grande. Os valores de irradiação solar difusa horizontal do INMET para Patos apresentaram média anual de 2,0 kWh/m².dia, semelhante à média do ABES (Figura 3.4). Os dados de irradiação solar difusa da NASA em Patos oscilaram mais ao longo do ano, máxima de 2,2 kWh/m².dia nos meses de fevereiro e março, e mínima entre os meses de junho a agosto. Na estação de São Gonçalo foi observado um comportamento semelhante para os dados derivados da NASA. Os valores máximos e mínimos do INMET e do ABES para São Gonçalo foram iguais, 2,2 kWh/m².dia e 1,7 kWh/m².dia respectivamente, com os dados variando pouco em torno da média. Em João Pessoa a irradiação solar difusa horizontal do INMET foi máxima nos meses de janeiro e fevereiro 2,2 kWh/m².dia (Figura 3.4).

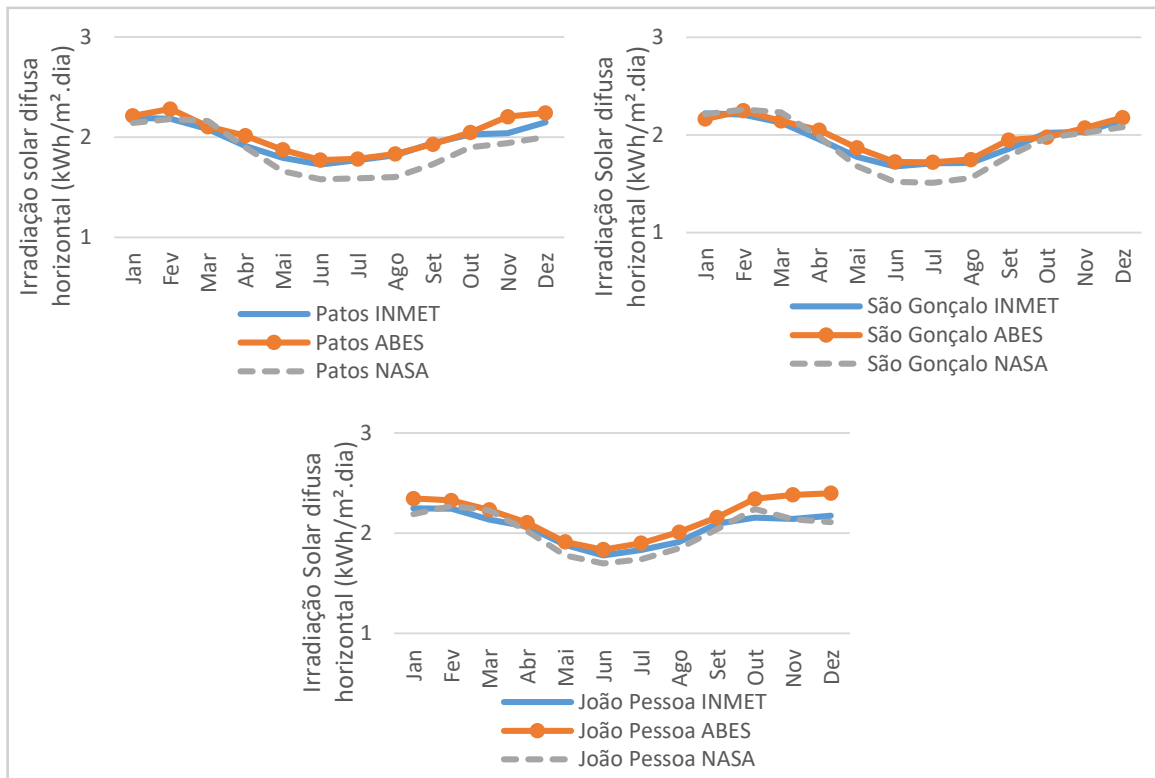


Figura 3.4 – Análise da média diária mensal da irradiação solar difusa horizontal do INMET, ABES e NASA para as estações de Patos, São Gonçalo e João Pessoa na Paraíba.

Fonte: Autor.

Existem diversas metodologias para se obter a irradiação solar difusa mensal (INEICHEN, 2008; KOUSSA; MORADI; KAMALI, 2008; MALEK; HADDADI, 2009; NOORIAN; TORRES *et al.*, 2010; VANDERVEKEN; JOURNÉE, 2015; COPPER; SPROUL, 2012; ABAL *et al.*, 2017; BERTRAND; EVERY; LI; DORRELL, 2020). Os

autores Koussa, Malek e Haddadi (2009) recomendaram as relações de Liu's e Jordan (1960) e as de Erbs, Klein e Duffie (1982), após a validação utilizando dados observados de irradiação difusa mensal para as cidades de Bouzarèah, Adrar e Ghardaia na Argélia. Os valores obtidos através da métrica de dispersão MBE foram baixos.

3.4. 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. Em Patos, a irradiação solar total horizontal apresentou tendências significativas aumento de 73,3 Wh/m²ano em agosto e redução de 150,6 Wh/m²ano em novembro.

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.

Através dos dados de irradiação solar total horizontal fornecidos pelo INMET, foi possível calcular a irradiação solar difusa horizontal para as sete localidades no estado da Paraíba, não foi observado grandes oscilações. Na maior parte dos meses a irradiação solar difusa horizontal do INMET esteve entre os dados do ABES e NASA. As diferenças entre os dados de irradiação solar difusa horizontal do INMET e ABES para Patos, São Gonçalo e João Pessoa foram menores do que as diferenças observadas em Areia, Cabaceiras, Monteiro e Campina 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.

3.5. 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 semiarid? - 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.

BERTRAND, C.; VANDERVEKEN, G.; JOURNÉE, M. Evaluation of decomposition models of various complexity to estimate the direct solar irradiance over Belgium. **Renewable Energy**, v. 74, p. 618–626, 2015.

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

COPPER, J. K.; SPROUL, A. B. Comparative study of mathematical models in estimating solar irradiance for Australia. **Renewable Energy**, v. 43, p. 130–139, 2012.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Wiley: Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition - John A. Duffie, William A. Beckman. 2013.

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.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1982.

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.

INEICHEN, P. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. **Solar Energy**, v. 82, n. 8, p. 758–762, 2008.

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.

KOUSSA, M.; MALEK, A.; HADDADI, M. Statistical comparison of monthly mean hourly and daily diffuse and global solar irradiation models and a Simulink program development for various Algerian climates. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 5, p. 1227–1235, 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.

NOORIAN, A. M.; MORADI, I.; KAMALI, G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, v. 33, n. 6, p. 1406–1412, 2008.

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.

Capítulo 4

4. ARTIGO: Avaliação da produtividade de painéis fotovoltaicos devido a mudança da temperatura do ar ao longo dos anos na Paraíba (Brasil)

Resumo: Os sistemas fotovoltaicos convertem a radiação solar em eletricidade, porém a eficiência das células fotovoltaicas sofrem alterações quando essas diferem das condições padrões de testes. No processo de conversão fotovoltaica os fatores de perdas podem ser relativos a radiação solar e a temperatura do ar. Seis estações meteorológicas situadas no estado da Paraíba, região Nordeste do Brasil, foram selecionadas para análises de tendências de temperatura média do ar através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen. Foi calculado o potencial fotovoltaico de seis painéis fotovoltaicos de silício, sendo três monocristalino e três policristalino, e analisado o comportamento dessas tecnologias diante da variação da temperatura média do ar local. Foi observado que a temperatura média do ar apresentou tendências significativas de aumento na comparação anual em todas as estações. Na comparação mensal, os municípios de Monteiro, João Pessoa e São Gonçalo tiveram mais meses com tendências significativas de crescimento. As menores temperaturas de operação das células fotovoltaicas foram os modelos Pv 1 e Pv 3 (monocristalino) e Pv 6 (policristalino). A produção fotovoltaica dos painéis Pv 1 e Pv 2 foram semelhantes ao longo do ano, correspondendo aos maiores valores entre todos os modelos estudados. Em razão das mudanças na temperatura média do ar no período analisado, a produção fotovoltaica nos painéis de silício monocristalino e policristalino apresentaram a mesma variação percentual relativa. A variação na produção fotovoltaica devido a temperatura média do ar foi menor que 1%. Os modelos de painéis fotovoltaicos estudados neste trabalho tiveram um comportamento semelhante diante da variação de temperatura média do ar.

Palavras-chave: Temperatura média do ar; Tendências; Irradiação solar; Energias renováveis; Energia fotovoltaica.

Abstract: Photovoltaic systems convert solar radiation into electricity, but the efficiency of photovoltaic cells provides changes when they differ from standard test conditions. In

the photovoltaic conversion process, the loss factors can be related to solar radiation and air temperature. Six weather stations located in the state of Paraíba, in the Northeast region of Brazil, were selected for analysis of mean air temperature trends using the Mann-Kendall test, quantified by Sen's decline. The photovoltaic potential of six silicon photovoltaic panels, being three monocrystalline and three polycrystalline, and analyzing the behavior of the technologies depending on the average temperature of the place. It was observed that the average air temperature presented trends of increase in annual comparison in all seasons. In the monthly comparison, the municipalities of Monteiro, João Pessoa and São Gonçalo had more months with growth trends. The lowest operating capacities of the photovoltaic cells were the Pv 1 and Pv 3 (monocrystalline) and Pv 6 (polycrystalline) models. The photovoltaic production of the Pv 1 and Pv 2 panels were similar throughout the year, corresponding to the highest values among all the models studied. Due to the changes in the average air temperature in the analyzed period, the photovoltaic production in monocrystalline and polycrystalline silicon panels is similar to the same relative percentage variation. The variation in photovoltaic production due to the average air temperature was less than 1%. The models of photovoltaic panels studied in this work have a behavior similar to the variation of the average air temperature.

Keywords: Average air temperature; Trends; Solar irradiation; Renewable energies; Photovoltaic energy.

4.1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis são alternativas para driblar a dependência de energias não renováveis e assegurar a crescente demanda energética. Questões importantes são abordadas sobre o tipo de geração para obtenção de energia elétrica, como o meio ambiente, a economia e a política. No Brasil os recursos energéticos têm favorecido o crescimento, a aplicação e o uso de tecnologias renováveis, como a energia solar fotovoltaica e a eólica.

O Sol é a primeira fonte de energia renovável, podendo ser utilizada na energia solar concentrada, térmica e fotovoltaica (EL ACHOUBY *et al.*, 2018). Os sistemas fotovoltaicos em particular têm conquistado seu espaço, contribuindo para a produção distribuída de energia elétrica, onde usuários de baixo consumo energético estão adotando essa tecnologia (CORREA-BETANZO; CALLEJA; DE LEÓN-ALDACO, 2018).

A energia elétrica obtida nos painéis fotovoltaicos provém das células fotovoltaicas, que são constituídas de materiais que possuem características semicondutoras. A conversão ocorre por meio da radiação solar incidente em sua superfície alterando as propriedades do material. A geração de energia inicia quando o fóton liberado através da radiação solar atinge a superfície do painel fotovoltaico, essa energia é superior a banda proibida do material, fazendo com que ocorra a movimentação dos elétrons (SOUZA; SOUSA, 2019). O silício puro é o material mais comum utilizado na fabricação das células fotovoltaicas e pode ser do tipo cristalino ou amorfo (YILMAZ *et al.*, 2015). As células de silício cristalino são classificadas de acordo com sua estrutura: monocristalino, policristalino, heterojunção com camada fina intrínseca e microcristalino (SHUBBAK, 2019). A produção de células de silício policristalino demanda menos energia do que as de silício monocristalino (RAUGEI; FRANKL, 2009). Os módulos de silício amorfo são constituídos de uma fina cama de silício hidrogenado, possuem menor eficiência e baixo custo (EL-SHAER; TADROS; KHALIFA, 2014).

A eficiência dos módulos fotovoltaicos desenvolvidos em laboratórios, em razão das condições padrões de testes, diferem das circunstâncias das áreas de implementação desses sistemas (BAYRAK; OZTOP; SELIMEFENDIGIL, 2019). Sendo assim, em situação real de uso há variáveis que podem interferir na eficiência padrão dos módulos fotovoltaicos. Os fatores de perda no processo de conversão fotovoltaica podem ser, por radiação, por convecção, reflexo, sombreamento, poeira e perdas nos cabos (CA/CC) (BAYRAK; OZTOP; SELIMEFENDIGIL, 2019; COSKUN *et al.*, 2017).

O cenário climático de um local afeta diretamente a temperatura de operação de um módulo fotovoltaico. Além disso, em regiões mais úmidas a eficiência do painel fotovoltaico é inversamente proporcional a umidade relativa do ar local (COSKUN *et al.*, 2017). Sendo assim, os circuitos eletrônicos equivalentes dos painéis fotovoltaicos devem levar em consideração os efeitos de possíveis mudanças nas condições climáticas e ambientais (ZAIMI *et al.*, 2019). A tensão de um painel fotovoltaico é altamente dependente da temperatura e um aumento na temperatura diminuirá a tensão reduzindo dessa forma a produção de eletricidade (SARHAN *et al.*, 2006).

O objetivo deste estudo foi analisar as tendências climáticas do parâmetro de temperatura média do ar no estado da Paraíba, assim como o impacto das mudanças climáticas na produção de energia fotovoltaica em painéis de silício monocristalino e policristalino.

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. Local de estudo

A Paraíba está inserida na região Nordeste do Brasil. A norte faz divisa com o estado do Rio Grande do Norte, a sul com o estado do Pernambuco, a leste com o oceano Atlântico e a oeste com o estado do Ceará (Figura 4.1). O estado possui uma área territorial de 56.467,239 km² e uma população estimada no ano de 2019 de 4.018.127 pessoas (IBGE, 2017a). Apesar da pequena extensão banhada pelo oceano Atlântico, muitos municípios são influenciados pela maritimidade. Por isso, parte do clima dessa região é denominado de tropical litorâneo do Nordeste oriental, pela interferência de massas de ar úmidas trazidas pelo oceano (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). As cidades mais a oeste possuem um clima semiárido, caracterizado por chuvas irregulares e pouco frequentes (MONTENEGRO; RAGAB, 2012).

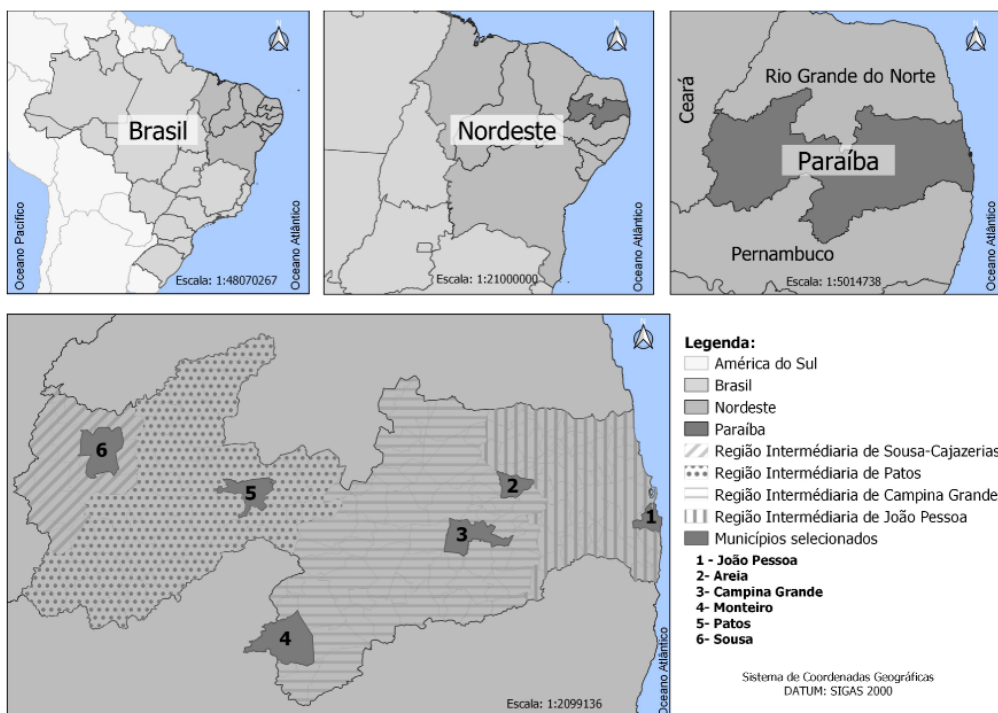


Figura 4.1 - Localização das estações meteorológicas selecionados no estado da Paraíba (Brasil) para o estudo.

Fonte: Adaptado do IBGE (2017b)

4.2.2. Seleção dos dados climáticos

Na Tabela 4.1 estão descritas todas as estações meteorológicas convencionais disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o estado da

Paraíba. Através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET foram coletadas as informações do parâmetro climático de temperatura média do ar.

Tabela 4.1– Descrição das estações meteorológicas selecionadas pertencentes ao estado da Paraíba, período de coleta dos dados, coordenadas geográficas e altitude das estações.

Município	Período de coleta	Coordenadas geográficas	Altitude (m)
João Pessoa	1961-2019	Lat. - 7.1 Long. - 34.86	7,4
Areia	1996-2019	Lat. - 6.97 Long. - 35.68	574,6
Campina Grande	1974-2019	Lat. - 7.22 Long. - 35.88	547,6
Monteiro	1963-2019	Lat. - 7.88 Long. - 37.06	603,6
Patos	1984-2019	Lat. - 7.01 Long. - 37.26	249,1
São Gonçalo (distrito de Sousa)	1962-2019	Lat. - 6.75 Long. - 38.21	2331

Fonte: INMET (2019).

A temperatura média do ar diária obtida pelo INMET é resultado de uma fórmula matemática que envolve a temperatura máxima e a temperatura mínima do dia (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007) (Eq. (4.1)).

$$T_{MC} = \frac{T_{\max} + T_{\min} + T_{12UC} + 2T_{24UC}}{5} \quad (4.1)$$

Onde, T_{MC} = Temperatura média do ar diária, T_{\max} = Temperatura máxima registrada no dia, T_{\min} = Temperatura mínima registrada no dia, T_{12UC} = Temperatura registrada às 12 UTC (Tempo Universal Coordenado) e T_{24UC} = Temperatura registrada às 24 UTC (Tempo Universal Coordenado).

Os dados obtidos de temperatura média do ar foram separados em planilhas. Em seguida, foi realizada uma triagem dos dados e os valores ausentes ou destoantes foram descartados. Então as médias mensais de cada ano foram organizadas. O objetivo foi que cada ano tivesse 12 medidas mensais completas para que a análise das tendências fosse realizada de forma coerente.

Os dados de irradiação solar total horizontal (kJ/m^2) foram obtidos pelo INMET através de estações automáticas no período de novembro de 2004 a junho de 2019 em Areia, de dezembro de 2006 a junho de 2019 em Campina Grande, de maio de 2008 a junho de 2019 em Monteiro, de julho de 2007 a junho de 2019 em João Pessoa e Patos, e de novembro de 2007 a junho de 2019 em São Gonçalo.

4.2.3. Análise das tendências climáticas

O teste de Mann-Kendall e o método de Sen são testes de tendência de regressão linear utilizados para identificar tendências no estudo de elementos do clima (GÜÇLÜ, 2018). Esses testes foram aplicados para avaliar se houve tendências na temperatura média do ar nas estações selecionadas. Esses testes são utilizados em casos em que os dados coletados ao longo do tempo tem um comportamento de uma função monótona. A estatística de Mann-Kendall é calculada através do somatório dos dados (GOCIC; TRAJKOVIC, 2013; GÜÇLÜ, 2018). Para estimar a inclinação real de uma tendência existente, o método não paramétrico de Sen é utilizado (SALMI *et al.*, 2002).

4.2.4. Seleção de painéis fotovoltaicos

Foi realizada uma pesquisa nos painéis fotovoltaicos comercializados no Brasil. Foram selecionados cinco fabricantes de painéis fotovoltaicos (GREENER, 2019). As informações fornecidas pelos fabricantes estão de acordo com as condições de teste padrão do equipamento: Irradiância de 1000 W/m², temperatura da célula de 25 °C e 1,5 de massa de ar (Tabela 4.2) (CANADIAN SOLAR, 2020; RISEN SOLAR, 2020; TRINA, 2020; BYD, 2020; SICES SOLAR, 2020). Na Tabela 4.2 estão descritas as marcas/modelos, a potência nominal, a área, a eficiência de conversão, temperatura nominal de operação da célula (NOCT) e o tipo de material utilizado em cada painel fotovoltaico.

Tabela 4.2 – Descrição dos painéis fotovoltaicos monofaciais de silício monocristalino e policristalino selecionados para o estudo.

Código – Marca / Modelo	Potência nominal (W)	Área (m²)	Eficiência de conversão (%)	NOCT (°C)	Material
Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS	320	1,69	19,0	43	Silício Monocristalino
Pv 2 - Risen RSM60- 6-295M-315M/5BB	315	1,64	19,2	45	
Pv 3 - Trina / TSM- DD05A.08(II)	305	1,64	18,6	44	
Pv 4 – Canadian / CS6K-275P	295	1,64	16,8	45	Silício Policristalino
Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P	280	1,63	17,2	45	
Pv 6 - Trina / TSM- PD05.08	280	1,64	17,1	44	

Fonte: Canadian solar (2020), Risen solar (2020) e Yngli solar (2020) Canadian solar, (2020), Risen solar (2020), Trina, (2020), BYD (2020) e Sices solar (2020).

4.2.5. Método de cálculo da produção para painéis fotovoltaicos.

Foram consideradas plantas fotovoltaicas, de mini geração distribuída, com 100 painéis cada. A produção fotovoltaica (P , em kWh) gerada pelo sistema foi calculada pela equação (4.2).

$$P = NPI \cdot A \cdot eff \cdot \left(\frac{G(t)}{1000} \right) \cdot f_{temp} \quad (4.2)$$

Em que o NPI é o número de painéis instalados, A corresponde à área do painel (m^2), foi feita uma equivalência de área. eff é a eficiência do painel fotovoltaico (%), $G(t)$ é a irradiação solar (Wh/m^2) nos painéis fotovoltaicos, e f_{temp} é o fator de perda operacional dos painéis fotovoltaicos causada pela temperatura. A variável f_{temp} pode ser definida pela equação (4.3) (NOTTON *et al.*, 2005; SKOPLAKI; PALYVOS, 2009), que representa a expressão linear tradicional para a eficiência elétrica do painel fotovoltaico.

$$f_{temp} = [1 - \beta'(\theta_{cell} - \theta_{cell,ref})] \quad (4.3)$$

Sendo θ_{cell} a temperatura operacional da célula ($^{\circ}C$), $\theta_{cell,ref}$ é a temperatura de operação da célula em condições padrão de teste ($^{\circ}C$), $\theta_{cell,ref} = 25^{\circ}C$, β' o coeficiente térmico de potência máxima de temperatura ($^{\circ}C^{-1}$), que foi definido por Evans (1981) como sendo $\beta' = 0,0042^{\circ}C^{-1}$ para um painel fotovoltaico de silício. θ_{cell} pode ser definido através da equação (4.4) (NOLAY, 1987).

$$\theta_{cell} = \theta_a + (\theta - 20) \quad (4.4)$$

Em que θ_a corresponde à temperatura ambiente ($^{\circ}C$) e θ é a temperatura nominal de operação da célula ($^{\circ}C$), estabelecido pelo fabricante Tabela 4.2.

Para avaliar se houve algum impacto na produção fotovoltaica, em razão da possível variação da temperatura média do ar, foi realizado um comparativo entre os 10 primeiros e os 10 últimos anos da série de dados histórico da temperatura média do ar. Esse comparativo se refere a variação percentual relativa. O comparativo 1 corresponde aos painéis de silício monocristalino e o comparativo 2 corresponde aos painéis de silício policristalino.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Tendências da temperatura média do ar

As tendências detectadas nos dados de temperatura média do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen para a estação meteorológica de Areia, Monteiro e Campina Grande estão descritas na Tabela 4.3. A comparação anual apresentou tendências significativas de aumento da temperatura média do ar nas três estações. Em Monteiro a tendência de aumento anual foi maior do que Areia e Campina Grande, 0,052 °C/ano ($p < 0,001$). Na comparação mensal em Areia, junho e agosto tiveram aumentos significativos de temperatura média do ar, 0,037 °C/ano ($p < 0,05$) e 0,015°C/ano ($p < 0,10$), respectivamente. Na estação de Monteiro, todos os meses apresentaram tendência crescente na temperatura média do ar. Em maio o aumento chegou a 0,078 °C/ano. Em Campina Grande as tendências mensais foram significativas e positivas para a temperatura média do ar entre março e agosto. No mês de junho a elevação foi de 0,037 °C/ano.

Tabela 4.3 – Tendências detectadas nos dados de temperatura média do ar do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, para as estações meteorológicas de Areia (1996-2019), Campina Grande (1974-2019) e Monteiro (1963-2019).

Período	Areia (°C/ano)	Monteiro (°C/ano)	Campina Grande (°C/ano)
Jan	-0,009 ns	0,040 **	0,009 ns
Fev	-0,003 ns	0,038 *	0,021 ns
Mar	0,018 ns	0,063 ***	0,026 +
Abr	0,022 ns	0,077 ***	0,035 *
Mai	0,014 ns	0,078 ***	0,037 +
Jun	0,037 *	0,062 ***	0,037 **
Jul	0,020 ns	0,052 ***	0,024 *
Ago	0,015 +	0,047 ***	0,033 *
Set	0,000 ns	0,053 **	0,017 ns
Out	0,004 ns	0,023 **	0,023 ns
Nov	0,022 ns	0,040 **	0,027 ns
Dez	0,017 ns	0,045 **	0,013 ns
Anual	0,019 +	0,052 ***	0,018 *

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

Na comparação anual, os dados de temperatura média do ar apresentaram tendências significativas de aumento para as estações meteorológicas de João Pessoa, Patos e São Gonçalo (Tabela 4.4). Em São Gonçalo, na comparação anual, o valor de aumento associado ao conjunto de dados foi de 0,063 °C/ano e em João Pessoa foi de

0,032 °C/ano, ambos com baixo erro associado ($p < 0,001$). No período mensal na estação de João Pessoa, todos os meses apresentaram tendências significativas de aumento, e alto grau de confiabilidade. Em Patos os meses de maio, junho e outubro as tendências foram de aumento, 0,106 °C/ano, 0,068 °C/ano e 0,032 °C/ano, respectivamente. Nos meses de julho e agosto as tendências da temperatura média do ar também foram de aumento. Os valores obtidos foram semelhantes e o erro associado foi o menor do período mensal ($p < 0,05$). Em São Gonçalo todos os meses apresentaram tendências significativas de crescimento, exceto os meses de janeiro e fevereiro. Em agosto, setembro e outubro o aumento foi de 0,067 °C/ano, 0,062 °C/ano e 0,086 °C/ano ($p < 0,001$), respectivamente.

Tabela 4.4 – Tendências detectadas nos dados de temperatura média do ar do INMET através do teste de Mann-Kendall, quantificadas pelo declive de Sen, para as estações meteorológicas de João Pessoa (1961-2019), Patos (1984-2019) e São Gonçalo (1962-2019).

Período	João Pessoa (°C/ano)	Patos (°C/ano)	São Gonçalo (°C/ano)
Jan	0,026 ***	0,002 ns	0,042 ns
Fev	0,033 ***	-0,018 ns	0,042 ns
Mar	0,042 ***	0,076 ns	0,036 +
Abr	0,039 ***	0,075 ns	0,044 *
Mai	0,027 *	0,106 +	0,047 +
Jun	0,016 *	0,068 +	0,063 **
Jul	0,033 ***	0,064 *	0,061 **
Ago	0,040 ***	0,062 *	0,067 ***
Set	0,034 ***	0,038 ns	0,062 ***
Out	0,039 ***	0,032 +	0,086 ***
Nov	0,039 ***	0,047 ns	0,084 **
Dez	0,034 ***	0,011 ns	0,085 **
Anual	0,032 ***	0,042 *	0,063 ***

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

Um pesquisa realizada no Sertão Paraibano estimou através do software Estima_T dados de temperatura média do ar entre 1950 e 2016, e esses dados foram avaliados através do teste de Mann-Kendall e declive de Sen (MEDEIROS *et al.*, 2019). De acordo com Medeiros *et al.* (2019) todas as localidades tiveram tendências de aumento na temperatura média do ar estimada, tanto na comparação mensal quanto na anual a declinação de Sen variou de 0,008 a 0,011 °C/ano. Em São Gonçalo e Patos os autores Medeiros *et al.* (2019) mostraram que na comparação mensal os dados de temperatura média do ar apresentaram tendências significativas em mais meses do que as tendências observadas pelo INMET no presente trabalho. Além disso, os aumentos das tendências

obtidas através dos dados do INMET foram maiores do que os valores das tendências obtidas através do software Estima_T.

Os autores Silva *et al.* (2020) utilizaram os dados de temperatura média do ar do INMET para avaliar as tendências através do teste de Mann Kendall para o estado da Paraíba. O período estudado foi do início de funcionamento das estações de Areia, Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos e São Gonçalo (Sousa) até o ano de 2016. No presente trabalho, na comparação anual a temperatura média do ar apresentou indicativos de aumento nas estações de Areia, Campina Grande, Monteiro, Patos e São Gonçalo, enquanto na pesquisa de Silva *et al.* (2020) nestas mesmas estações não foram observadas tendências significativas.

4.3.2. Temperatura de operação da célula fotovoltaica

A temperatura de operação da célula fotovoltaica influencia na eficiência da conversão da energia solar em energia elétrica, que por sua vez depende da temperatura média do ar local. Na Figura 4.2 é possível observar as médias anuais obtidas para a temperatura de operação da célula fotovoltaica, para os seis tipos de módulos fotovoltaicos nas seis localidades selecionadas no estado da Paraíba-Brasil. As maiores temperaturas de operação são as dos municípios de João Pessoa, Patos e São Gonçalo. Esse resultado era esperado pelo fato dessas localidades apresentarem as maiores temperaturas médias do ar. Em Monteiro a temperatura operacional das células dos modelos selecionados foi ligeiramente maior do que em Campina Grande e Areia, porque a irradiação solar total horizontal em Monteiro foi mais elevada.

Analisando individualmente o comportamento da temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos em cada localidade, os modelos Pv 2, Pv 4 e Pv 5 tiveram temperaturas iguais, sendo sempre as mais elevadas. Os modelos Pv 3 e Pv 6 apresentaram a mesma temperatura operacional. A menor temperatura de operação foi obtida no modelo Pv 1. O comportamento das temperaturas iguais entre o Pv 2, Pv 4 e Pv 5 e o Pv 3 e Pv 6, pode ser explicado em razão da temperatura nominal da célula ser a mesma. Quanto maior o valor da temperatura nominal da célula maior será a temperatura de operação da célula na realidade. Do tipo monocristalino, o Pv 2 possui a maior temperatura de operação, seguido do Pv 3 e do Pv 1. Do tipo policristalino, o Pv 4 e o Pv 5 possuem a temperatura maior do que o Pv 6.

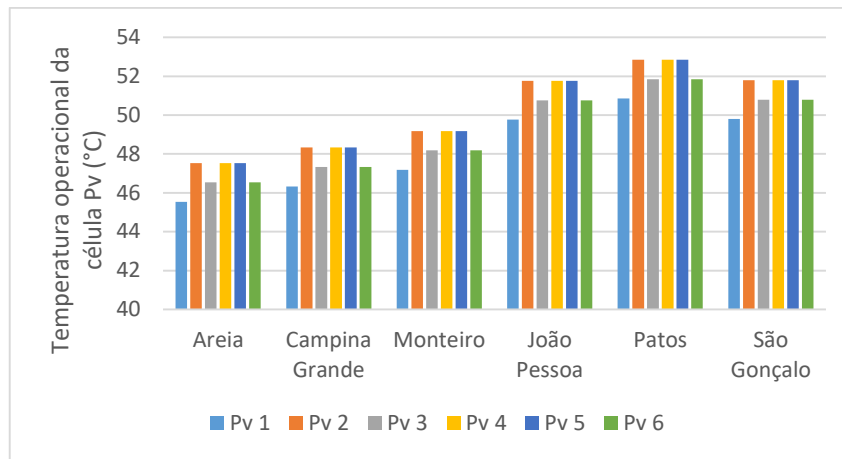


Figura 4.2 – Média anual da temperatura de operação das células dos módulos fotovoltaicos Pv 1, Pv 2, Pv 3, Pv 4 e Pv 5 para as localidades de Areia (1996-2019), Campina Grande (1974-2019), Monteiro (1963-2019), João Pessoa (1961-2019), Patos (1984-2019) e São Gonçalo (1962-2019) na Paraíba-Brasil.

Fonte: Autor.

4.3.3. Potencial fotovoltaico

A produção fotovoltaica dos painéis monocristalino foi maior do que a produção fotovoltaica dos painéis policristalino em razão da eficiência de conversão dos módulos (Figura 4.3 e Figura 4.4). Os modelos Pv 1 e Pv 2 foram semelhantes ao longo do ano, mas a produção do Pv 2 devido sua eficiência foi ligeiramente maior do que o Pv 1, seguido do Pv 3 logo abaixo. Os últimos são os modelos policristalino Pv 5, Pv 6 e o Pv 4, por ordem crescente de produção (Figura 4.3 e Figura 4.4). Analisando a temperatura média do ar e a produção fotovoltaica em Areia, Monteiro, Campina Grande, João Pessoa, Patos e São Gonçalo a produção fotovoltaica reduz no mês de fevereiro, isso ocorreu porque ao calcular a produção desse mês o número de dias foi menor.

A estação de Areia possui os menores índices de irradiação total horizontal em comparação com as demais estações, que pode ser justificado pela presença de nebulosidade. Por isso, a produção fotovoltaica em Areia, foi a menor das seis estações analisadas, ficando abaixo de 5.000 kWh/mês. A menor produção foi a do modelo Pv 4 em junho, 2.664,59 kWh/mês e a maior foi a do modelo Pv 2 no mês de novembro, 4.664,55 kWh/mês (Figura 4.3). A menor produção em Areia corresponde ao mês de junho com a irradiação em torno de 3,5 kWh/m² e a temperatura média do ar está em torno de 21,4 °C. No mês de julho a temperatura média do ar foi menor, em torno de 20,7 °C e a produção fotovoltaica voltou a crescer mesmo com a irradiação solar sendo a mesma do mês de junho.

Em Monteiro nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, a produção fotovoltaica foi a maior dentre as seis estações analisadas. Nesses meses a irradiação solar total horizontal estava alta e a temperatura média do ar estava mais baixa do que em João Pessoa, Patos e São Gonçalo. A temperatura média do ar em Monteiro variou de 22 °C a 26 °C. A menor produção foi no mês de junho, 4.035,88 kWh/mês para o Pv 1, 4.040,92 kWh/mês para o Pv 2, 3.932,78 kWh/mês para o Pv 3, 3.535,81 kWh/mês para o Pv 4, 3.619,99 kWh/mês para o Pv 5 e 3.615,62 kWh/mês para o Pv 6. O pico da produção fotovoltaica em Monteiro foi no mês de outubro e o pico da irradiação foi em novembro, porém a temperatura média do ar em outubro foi 0,7 °C a menos que o mês de novembro. Em Campina Grande, entre os meses de outubro e dezembro a produção fotovoltaica foi quase constante, sendo que em novembro teve o pico da irradiação solar. A produção em novembro foi um pouco maior, 5.367,58 kWh/mês para o Pv 1, 5.373,88 kWh/mês para o Pv 2, 5.230,26 kWh/mês para o Pv 3, 4.702,15 kWh/mês para o Pv 4, 4.814,10 kWh/mês para o Pv 5 e 4.808,47 kWh/mês para o Pv 6 (Figura 4.3).

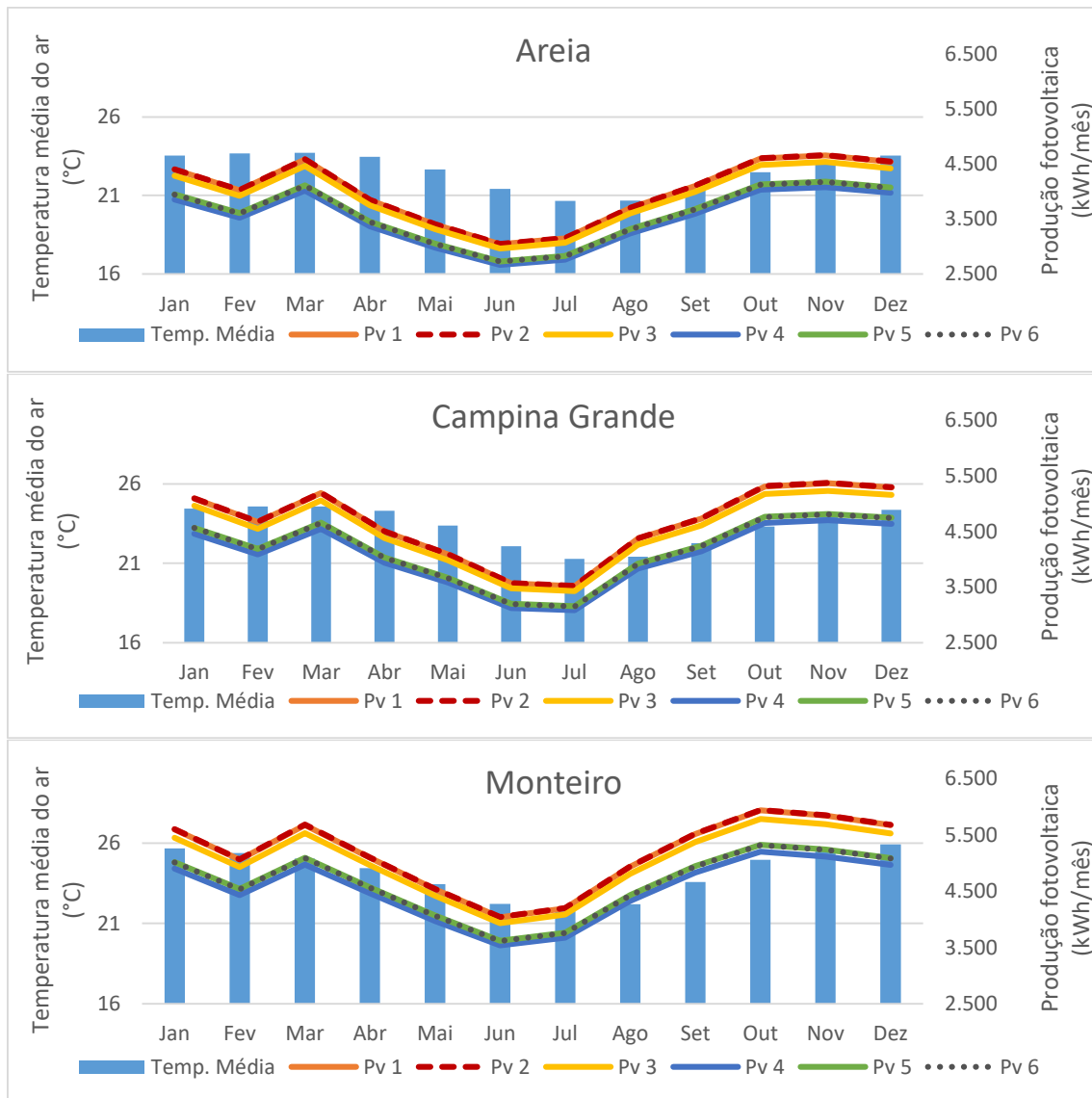


Figura 4.3 – Comportamento da série completa dos dados da temperatura média do ar e da produção fotovoltaica com áreas equivalentes, para as localidades de Areia (1996-2019), Campina Grande (1974-2019) e Monteiro (1963-2019) na Paraíba-Brasil.

Fonte: Autor.

Em João Pessoa, a temperatura do ar média anual foi de 26,8 °C. A menor temperatura média foi no mês de julho, 24,9 °C, assim como a menor produção fotovoltaica, 3.646,84 kWh/mês para o Pv 1, 3.650,97 kWh/mês para o Pv 2, 3.553,47 kWh/mês para o Pv 3, 3.194,60 kWh/mês para o Pv 4, 3.270,66 kWh/mês para o Pv 5 e 3.266,90 kWh/mês para o Pv 6 (Figura 4.4). A irradiação de João Pessoa é menor do que Monteiro, São Gonçalo e Patos (exceto nos meses de novembro e dezembro). Apesar do pico da irradiação solar total horizontal ser em novembro, 6,5 kWh/m², outubro foi o mês onde a produção fotovoltaica foi maior, a irradiação foi de 6,4 kWh/m² e a temperatura

foi 0,6 °C menor do que o mês de novembro. Em Patos os dois picos de produção foram no mês de março e outubro, coincidindo com os picos de irradiação solar total horizontal, 6,5 kWh/m² em março e 6,8 kWh/m² em outubro. A produção no mês de outubro foi maior, 5.824,63 kWh/mês para o Pv 1, 5.830,26 kWh/mês para o Pv 2, 5.675,04 kWh/mês para o Pv 3, 5.101,48 kWh/mês para o Pv 4, 5.222,94 kWh/mês para o Pv 5 e 5.217,37 kWh/mês para o Pv 6 (Figura 4.4). A produção fotovoltaica em São Gonçalo foi maior do que em Patos, com exceção dos meses de fevereiro e março. Em São Gonçalo os picos de produção fotovoltaica foram março e outubro, e os picos de irradiação solar total horizontal foram março e novembro, 6,3 kWh/m² e 7,0 kWh/m² respectivamente. A temperatura média anual do ar foi 26,8 °C. A temperatura média do ar mais baixa associada a alta irradiação solar colaborou para o aumento da produção fotovoltaica em São Gonçalo (Figura 4.4).

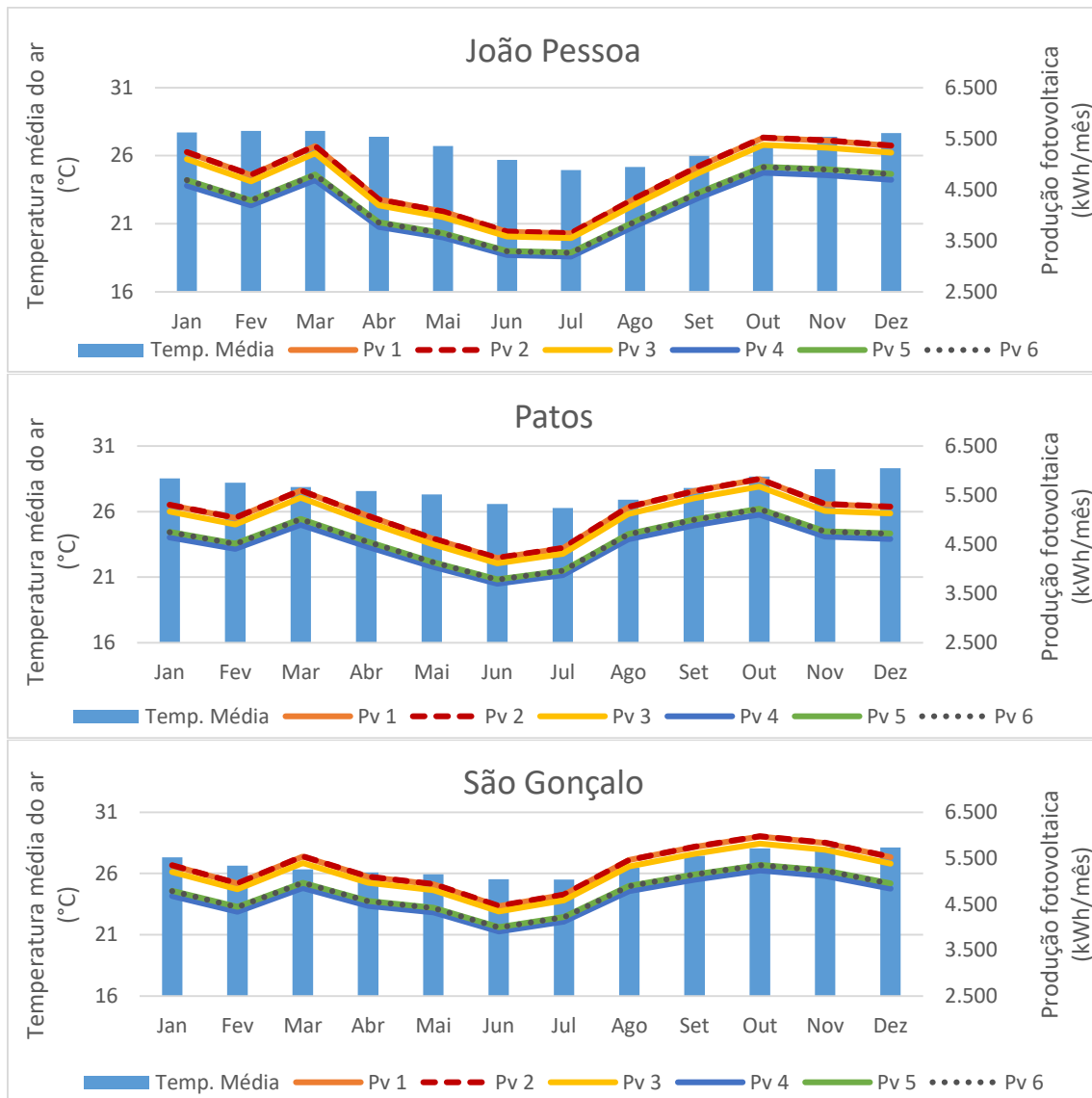


Figura 4.4 – Comportamento da série completa dos dados da temperatura média do ar e da produção fotovoltaica com áreas equivalentes, para as localidades de João Pessoa (1961-2019), Patos (1984-2019) e São Gonçalo (1962-2019) na Paraíba-Brasil.

Fonte: Autor.

Os autores Mirzaei e Mohiabadi (2017) monitoraram durante um ano dois módulos fotovoltaicos (silício monocristalino e policristalino) em uma região semiárida do Irã. Fixando a irradiação solar, foi observado que a eficiência dos módulos fotovoltaicos diminuía quando a temperatura do ambiente aumentava. No mês de julho em Areia a irradiação solar foi a mesma do mês de junho, mas a redução da temperatura do ar fez com que a produção fotovoltaica aumentasse. Foi observado de modo bem evidente nos municípios de Monteiro, João Pessoa e São Gonçalo, em que o pico de irradiação solar não coincidiu com o pico de produção fotovoltaica, por influência da temperatura do ar.

4.3.4. Comparativo da produção fotovoltaica de painéis de silício monocristalino e policristalino.

Os comparativos da produção fotovoltaica de painéis de silício monocristalino e policristalino para as localidades de Areia, Monteiro, Campina Grande, João Pessoa, Patos e São Gonçalo no estado da Paraíba, estão apresentados na Tabela 4.5 e Tabela 4.6. A variação percentual relativa do comparativo 1 foi semelhante ao resultado obtido no comparativo 2 em todas as cidades, ou seja, devido aos aumentos na temperatura média do ar na produção fotovoltaica de painéis de silício monocristalino foram as mesmas dos painéis de silício policristalino. É importante observar que essas perdas foram baixas para todos os modelos de painéis e em todas as localidades estudadas.

Em Areia apenas os meses de janeiro e fevereiro apresentaram variações percentuais positivas. A produção fotovoltaica nos últimos 10 anos foi maior, isso se deve à leve redução na temperatura média do ar nesses meses no período entre os 10 primeiros e os 10 últimos anos de coleta de dados, -0,8% (Tabela 4.5). No geral em Areia a produção fotovoltaica nos demais meses reduziram pouco, exceto o mês de julho -0,22%.

Na estação de Monteiro as reduções foram um pouco mais expressivas. Nos meses de abril e maio a redução da produção foi maior, -0,75% e -0,77% (Tabela 4.5). Em Campina Grande a variação ficou entre -0,01% e -0,27%, sendo que a menor e a maior redução ocorreram nos meses de janeiro e maio.

Tabela 4.5– Comparativo da produção fotovoltaica em variação percentual relativa com a área equivalente para as localidades de Areia, Monteiro, Campina Grande. Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS, Pv 2 - Risen RSM60-6-295M-315M/5BB, Pv 3 - Trina / TSM-DD05A.08(II), Pv 4 - Canadian / CS6K-275P, Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P, Pv 6 - Trina / TSM-PD05.08.

(Continua)

Período	Areia					
	Comparativo 1 Si Monocristalino			Comparativo 2 Si Policristalino		
Jan	0,09%	0,09%	0,09%	0,09%	0,09%	0,09%
Fev	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%	0,07%
Mar	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%
Abr	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%
Mai	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%
Jun	-0,22%	-0,22%	-0,22%	-0,22%	-0,22%	-0,22%
Jul	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%
Ago	-0,11%	-0,11%	-0,11%	-0,11%	-0,11%	-0,11%

Tabela 4.5 – Comparativo da produção fotovoltaica em variação percentual relativa com a área equivalente para as localidades de Areia, Monteiro, Campina Grande. Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS, Pv 2 - Risen RSM60-6-295M-315M/5BB, Pv 3 - Trina / TSM-DD05A.08(II), Pv 4 - Canadian / CS6K-275P, Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P, Pv 6 - Trina / TSM-PD05.08.

(Conclusão)

Período	Comparativo 1 Si Monocristalino			Comparativo 2 Si Policristalino		
	Set	-0,03%	-0,03%	-0,03%	-0,03%	-0,03%
Out	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%
Nov	-0,11%	-0,11%	-0,11%	-0,11%	-0,11%	-0,11%
Dez	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%
Anual	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%
Marca/Modelo	Pv 1	Pv 2	Pv 3	Pv 4	Pv 5	Pv 6
Monteiro						
Jan	-0,44%	-0,45%	-0,45%	-0,45%	-0,45%	-0,45%
Fev	-0,37%	-0,38%	-0,37%	-0,38%	-0,38%	-0,37%
Mar	-0,69%	-0,69%	-0,69%	-0,69%	-0,69%	-0,69%
Abr	-0,75%	-0,76%	-0,76%	-0,76%	-0,76%	-0,76%
Mai	-0,77%	-0,78%	-0,78%	-0,78%	-0,78%	-0,78%
Jun	-0,55%	-0,56%	-0,55%	-0,56%	-0,56%	-0,55%
Jul	-0,51%	-0,51%	-0,51%	-0,51%	-0,51%	-0,51%
Ago	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%
Set	-0,54%	-0,54%	-0,54%	-0,54%	-0,54%	-0,54%
Out	-0,20%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%
Nov	-0,33%	-0,34%	-0,33%	-0,34%	-0,34%	-0,33%
Dez	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%
Anual	-0,50%	-0,51%	-0,50%	-0,51%	-0,51%	-0,50%
Marca/Modelo	Pv 1	Pv 2	Pv 3	Pv 4	Pv 5	Pv 6
Campina Grande						
Jan	-0,01%	-0,01%	-0,01%	-0,01%	-0,01%	-0,01%
Fev	-0,09%	-0,09%	-0,09%	-0,09%	-0,09%	-0,09%
Mar	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%
Abr	-0,20%	-0,20%	-0,20%	-0,20%	-0,20%	-0,20%
Mai	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%
Jun	-0,23%	-0,24%	-0,24%	-0,24%	-0,24%	-0,24%
Jul	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%
Ago	-0,24%	-0,24%	-0,24%	-0,24%	-0,24%	-0,24%
Set	-0,15%	-0,15%	-0,15%	-0,15%	-0,15%	-0,15%
Out	-0,15%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%
Nov	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%
Dez	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%
Anual	-0,17%	-0,17%	-0,17%	-0,17%	-0,17%	-0,17%
Marca/Modelo	Pv 1	Pv 2	Pv 3	Pv 4	Pv 5	Pv 6

Fonte: Autor.

Nas estações de João Pessoa, Patos e São Gonçalo, em todos os meses, a produção fotovoltaica dos painéis de silício monocristalino e policristalino reduziram (Tabela 4.6), com ressalva do mês de dezembro em Patos (0,11%). Isso porque a temperatura média do ar diminuiu cerca de 0,8% entre os 10 primeiros e os 10 últimos anos de coleta de dados no mês de dezembro em Patos. A variação da produção fotovoltaica anual em João Pessoa foi de -0,49% e a mensal foi de -0,21% em junho a -0,64% em março para o Pv 2, Pv 4 e Pv 5 (Tabela 4.6). Em Patos os destaques são os meses de março e maio, onde o percentual de redução na produção foi de -0,43% em março e -0,53% em maio, exceto para o Pv 1, respectivamente. Em São Gonçalo as maiores perdas na produção fotovoltaica ocorreram no segundo semestre, com a variação em outubro sendo de -0,51% (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Comparativo da produção fotovoltaica em variação percentual relativa com a área equivalente para as localidades de João Pessoa, Patos e São Gonçalo. Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS, Pv 2 - Risen RSM60-6-295M-315M/5BB, Pv 3 - Trina / TSM-DD05A.08(II), Pv 4 - Canadian / CS6K-275P, Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P, Pv 6 - Trina / TSM-PD05.08.

(Continua)

João Pessoa						
Período	Comparativo 1			Comparativo 2		
	Si Monocristalino			Si Policristalino		
Jan	-0,37%	-0,37%	-0,37%	-0,37%	-0,37%	-0,37%
Fev	-0,46%	-0,47%	-0,47%	-0,47%	-0,47%	-0,47%
Mar	-0,63%	-0,64%	-0,63%	-0,64%	-0,64%	-0,63%
Abr	-0,56%	-0,57%	-0,57%	-0,57%	-0,57%	-0,57%
Mai	-0,42%	-0,42%	-0,42%	-0,42%	-0,42%	-0,42%
Jun	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%
Jul	-0,44%	-0,44%	-0,44%	-0,44%	-0,44%	-0,44%
Ago	-0,52%	-0,53%	-0,52%	-0,53%	-0,53%	-0,52%
Set	-0,49%	-0,49%	-0,49%	-0,49%	-0,49%	-0,49%
Out	-0,55%	-0,55%	-0,55%	-0,55%	-0,55%	-0,55%
Nov	-0,52%	-0,52%	-0,52%	-0,52%	-0,52%	-0,52%
Dez	-0,55%	-0,56%	-0,55%	-0,56%	-0,56%	-0,55%
Anual	-0,49%	-0,49%	-0,49%	-0,49%	-0,49%	-0,49%
Marca/Modelo	Pv 1	Pv 2	Pv 3	Pv 4	Pv 5	Pv 6
Patos						
Jan	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%	-0,16%
Fev	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%
Mar	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%
Abr	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%
Mai	-0,52%	-0,53%	-0,53%	-0,53%	-0,53%	-0,53%
Jun	-0,31%	-0,32%	-0,32%	-0,32%	-0,32%	-0,32%

Tabela 4.6 - Comparativo da produção fotovoltaica em variação percentual relativa com a área equivalente para as localidades de João Pessoa, Patos e São Gonçalo. Pv 1 - Canadian / CS1H-320MS, Pv 2 - Risen RSM60-6-295M-315M/5BB, Pv 3 - Trina / TSM-DD05A.08(II), Pv 4 – Canadian / CS6K-275P, Pv 5 - BYD P6C-30 Série-4BB-156.75P, Pv 6 - Trina / TSM-PD05.08.

(Conclusão)

Período	Comparativo 1 Si Monocristalino			Comparativo 2 Si Policristalino		
	Jul	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%	-0,21%
Ago	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%
Set	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%	-0,10%
Out	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%	-0,07%
Nov	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%	-0,08%
Dez	0,11%	0,11%	0,11%	0,11%	0,11%	0,11%
Anual	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%	-0,18%
Marca/Modelo	Pv 1	Pv 2	Pv 3	Pv 4	Pv 5	Pv 6
São Gonçalo						
Jan	-0,15%	-0,15%	-0,15%	-0,15%	-0,15%	-0,15%
Fev	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%	-0,12%
Mar	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%
Abr	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%	-0,27%
Mai	-0,28%	-0,28%	-0,28%	-0,28%	-0,28%	-0,28%
Jun	-0,36%	-0,37%	-0,37%	-0,37%	-0,37%	-0,37%
Jul	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%	-0,43%
Ago	-0,41%	-0,42%	-0,42%	-0,42%	-0,42%	-0,42%
Set	-0,38%	-0,38%	-0,38%	-0,38%	-0,38%	-0,38%
Out	-0,51%	-0,51%	-0,51%	-0,51%	-0,51%	-0,51%
Nov	-0,47%	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%	-0,48%
Dez	-0,46%	-0,46%	-0,46%	-0,46%	-0,46%	-0,46%
Anual	-0,35%	-0,35%	-0,35%	-0,35%	-0,35%	-0,35%
Marca/Modelo	Pv 1	Pv 2	Pv 3	Pv 4	Pv 5	Pv 6

Fonte: Autor.

Segundo os autores Do Nascimento *et al.* (2020), a partir de um estudo realizado em algumas usinas fotovoltaicas no Brasil, a temperatura média do ar foi a principal causa das perdas de energia em sistemas fotovoltaicos. Do Nascimento *et al.* (2020) verificaram que os módulos de silício monocristalino e policristalino foram os mais afetados pela alta na temperatura do ar, principalmente em áreas costeiras considerando uma inclinação fixa, e as tecnologias menos afetadas foram as de silício de filme fino. No presente trabalho, esse fato foi observado na estação de João Pessoa, que está situada em uma área costeira. Na comparação mensal em João Pessoa a redução na produção foi mais acentuada do que as demais estações localizadas no interior do estado, com exceção da estação de Monteiro, que também apresentou reduções elevadas em todos os meses.

Os autores Medeiros *et al.* (2021) estudaram a eficiência do painel fotovoltaico de silício policristalino em relação à temperatura média do ar para sete municípios

localizados no sertão do estado da Paraíba-Brasil. Na comparação entre os 10 primeiros e os 10 últimos anos da temperatura média do ar, a produção fotovoltaica apresentou uma redução mensal de até -0,5% (MEDEIROS *et al.*, 2021). Situação semelhante foi observada no presente estudo, em que a redução na produção fotovoltaica de painéis de silício monocristalino e policristalino foi inferior a 1%.

Os autores Mirzaei e Mohiabadi (2017) verificaram que a eficiência média mensal do módulo monocristalino reduz nos meses com maior irradiância solar e maior temperatura média do ar, enquanto o módulo policristalino é mais eficiente no clima quente com alta irradiação devido suas características térmicas (MIRZAEI; MOHIABADI, 2017). Portanto, conclui-se que nas condições de clima semiárido do Irã, o módulo solar policristalino é mais adequado para ser usado nos meses de verão, enquanto o módulo monocristalino é mais eficiente nos meses de inverno (MIRZAEI; MOHIABADI, 2017). No caso das estações analisadas na Paraíba-Brasil, os painéis de silício monocristalino e policristalino apresentaram a mesma variação percentual. Não houve distinção entre os meses de inverno e verão.

4.4. CONCLUSÕES

As análises de tendências indicaram a existência de tendência crescente da temperatura média do ar na comparação anual em todas as estações analisadas. Na comparação mensal, todos os meses das localidades de Monteiro, João Pessoa e São Gonçalo apresentaram tendências significativas de aumento.

A menor temperatura de operação da célula fotovoltaica foi o modelo Pv 1, seguido dos modelos Pv 3 e Pv 6, que foram iguais. Por fim, as temperaturas mais altas foram nos modelos Pv 2, Pv 4 e Pv 5, devido a temperatura nominal da célula ser a mesma.

Apesar do Pv 1 ter a menor temperatura operacional, a produção fotovoltaica obtida do modelo Pv 2 foi maior em todas as estações, em razão da sua eficiência. A produção fotovoltaica ao longo do ano em Areia foi menor que 5.000 kWh/mês. Em Monteiro, nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro a produção fotovoltaica foi a maior dentre as seis estações analisadas. Em alguns casos o pico da irradiação solar não correspondeu ao ponto máximo da produção fotovoltaica. Foi o caso de Monteiro, João Pessoa e São Gonçalo.

No comparativo da produção fotovoltaica entre os 10 primeiros e os 10 últimos anos de coleta de dados, os painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino

apresentaram a mesma variação percentual diante da variação de temperatura média do ar. Na maioria dos meses, em todas as estações, ocorreu redução da produção fotovoltaica devido ao aumento da temperatura média do ar. As exceções foram os meses de janeiro e fevereiro em Areia e o mês de dezembro em Patos. Em Areia, Campina Grande, Patos e São Gonçalo as variações percentuais relativas foram menores. Em contrapartida, em Monteiro e João Pessoa as variações percentuais foram maiores.

O aumento da irradiação solar não significa diretamente aumento na produção fotovoltaica. Como visto, a temperatura média do ar mais baixa associada a uma boa irradiação solar é mais importante do que simplesmente uma alta irradiação solar. Foi observado impacto na produção fotovoltaica devido ao aumento da temperatura média do ar, porém, a variação percentual foi menor que -1%. Ainda assim, se faz necessário o acompanhamento da variação da temperatura média do ar na produção fotovoltaica, durante os próximos anos e décadas, devido principalmente às tendências históricas observadas da temperatura média do ar terem sido significativas e crescentes.

4.5. REFERÊNCIAS

BAYRAK, F.; OZTOP, H. F.; SELIMEFENDIGIL, F. Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. **Solar Energy**, v. 188, n. November 2018, p. 484–494, 2019.

BYD. Poly-crystalline 60 cell, P6C-30-SERIES-4BB. Disponível em: <https://sg.byd.com/wp-content/uploads/2017/10/combine-4-1.pdf>. Acesso em: 30/11/2020.

CANADIAN SOLAR. High Density Shingle PERC Module (Mono). 2020. Disponível em: <https://www.csisolar.com/downloads?downid=612>. Acesso em: 11/11/2020.

CORREA-BETANZO, C.; CALLEJA, H.; DE LEÓN-ALDACO, S. Module temperature models assessment of photovoltaic seasonal energy yield. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 27, n. June 2017, p. 9–16, 2018.

COSKUN, C. *et al.* Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic module temperature: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1474–1485, 2017.

COSKUN, C. *et al.* Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic module temperature: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1474–1485, 2017.

DO NASCIMENTO, L. R. *et al.* Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1070–1082, 2020.

EL-SHAER, A.; TADROS, M. T. Y.; KHALIFA, M. A. Effect of Light intensity and

Temperature on Crystalline Silicon Solar Modules Parameters. **Ijetae**, v. 4, n. 8, p. 311–318, 2014.

EL ACHOUBY, H. *et al.* New analytical approach for modelling effects of temperature and irradiance on physical parameters of photovoltaic solar module. **Energy Conversion and Management**, v. 177, n. August, p. 258–271, 2018.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 172–182, 2013.

GÜÇLÜ, Y. S. Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. **Journal of Hydrology**, v. 566, n. September, p. 685–704, 2018.

GREENER. Distributed generation solar pv market Brazil. 2019. Disponível em: <https://www.greener.com.br/>. Acesso em: 20/03/2020

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama**. Rio de Janeiro, IBGE, 2017a. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/panorama>. Acesso em: 20/01/2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal de mapas**. Rio de Janeiro, IBGE, 2017b. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>. Acesso em: 20/01/2020.

MEDEIROS, S. E. L. *et al.* Comparison between observed and estimated data to assess air temperature variability and trends in the Sertão Paraibano mesoregion (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 2, 2019.

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.

MIRZAEI, M.; MOHIABADI, M. Z. A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. **Energy for Sustainable Development**, v. 38, p. 93–101, 2017.

MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 434–435, p. 55–68, 2012.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. 1a ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

NOTTON, G. *et al.* **Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences**. Applied Thermal Engineering. v. 25, n. 17, p. 2854–2877, 2005.

NOTTON, G. *et al.* Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 17–18, p. 2854–2877, 2005.

RAUGEI, M.; FRANKL, P. Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks. **Energy**, v. 34, n. 3, p. 392–399, 2009.

RISEN SOLAR. Monocrystalline PV Module. 2020. Disponível em: <https://www.risenenergy.com/uploadfile/201808/b9068e5c8e.pdf>. Acesso em: 30/11/2020.

SICES SOLAR. CanadianSolar Module 60 Cells. Standard Poly-Si. 2020. Disponível em: <https://sicesolar.com.br/module-60-cells/>. Acesso em: 11/11/2020.

SALMI, T. *et al.* Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS. **Finnish Meteorological Institute**, n. 31, p. 9, 2002.

SARHAN, W. M. *et al.* Effect of temperature on the efficiency of the thermal cell. **Asian Journal of Chemistry**, v. 18, n. 2, p. 982–990, 2006.

SHUBBAK, M. H. Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, n. July, p. 109383, 2019.

SILVA, W. K. DE M. *et al.* Sugarcane production and climate trends in Paraíba state (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 6, 2020.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar Energy**, v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009.

SOUZA, J. S. T.; SOUSA, N. C. A. DE. Temperature influence on mobility and charge density model of photovoltaic cells. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, p. 1–6, 2019.

TRINA SOLAR. Monocristalino Honey M plus. Policristalino Honey. Disponível em: <https://mgr.trinasolar.com/pt/resources/downloads#TSM-PD05>. Acesso em: 30/11/2020.

YILMAZ, S. *et al.* The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation - A case study in Kahramanmaraş, Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1015–1024, 2015.

ZAIMI, M. *et al.* Determining combined effects of solar radiation and panel junction temperature on all model-parameters to forecast peak power and photovoltaic yield of solar panel under non-standard conditions. **Solar Energy**, v. 191, n. September, p. 341–359, 2019.

Capítulo 5

5. CONCLUSÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO

Na realização da revisão sistemática, sobre as estatísticas de tendências aplicadas nos parâmetros climáticos, foram utilizados dois bancos de dados científicos, *Science Direct* e o *Web of Science*. Após a aplicação de uma metodologia específica e uma avaliação criteriosa, foram selecionados 24 artigos do *Science Direct* e 5 artigos do *Web of Science*. Nesta pesquisa a China foi a área de estudo da maioria dos artigos encontrados. Essas análises foram aplicadas para compreensão do clima, regimes hidrológicos e setores agrícolas. No Brasil, apenas um artigo relacionou tendências climáticas com o setor energético. No *Science Direct* o método estatístico mais utilizado para análise de tendências climáticas históricas foi a regressão linear e o teste de Mann-Kendall associado ao declive de Sen, enquanto que no *Web of Science* os cinco artigos utilizaram o teste de Mann-Kendall associado ao declive de Sen. Geralmente os artigos que quantificaram as tendências de dados climáticos recomendaram o teste de Mann-Kendall associado ao declive de Sen, por se tratar de séries não paramétricas. O que se deve levar em consideração é o tipo de dado que será analisado e qual resultado se quer apresentar.

Nas análises de irradiação solar total horizontal foi observado que os dados do INMET e do ABES ficaram mais próximos em Campina Grande, Cabaceiras, Monteiro, Patos, São Gonçalo e João Pessoa, exceto em Areia. Apesar do curto período de coleta de dados, algumas tendências significativas de redução da irradiação solar total horizontal foram observadas. Partindo da ideia de que os dados observados por instrumentos padronizados no solo são mais precisos, as análises de dispersão foram utilizadas através das métricas MBE, rMBE, MAE, rMAE, RMSE e rRMSE entre os dados de irradiação solar total horizontal do INMET e da NASA. Os menores erros associados entre essas fontes de dados foram nas localidades de Cabaceiras, Monteiro e São Gonçalo. Nas demais estações os dados estimados da NASA estão distantes dos valores obtidos pelas estações de solo, não sendo recomendados. A irradiação solar difusa horizontal obtida através de cálculos utilizando os dados observados do INMET tiveram um comportamento semelhante ao do ABES e da NASA.

No teste de Mann-Kendall, quantificado pelo declive de Sen, aplicado nos dados de temperatura média do ar, as localidades de Areia, Campina Grande, Monteiro, João Pessoa, Patos e São Gonçalo apresentaram tendências significativas de aumento na comparação anual. No período mensal, para todos os meses de Monteiro, João Pessoa e São Gonçalo as tendências significativas foram de crescimento. A produção dos painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino, dada a variação de temperatura média do ar, apresentaram variação percentual relativa semelhante. Por isso, não há uma indicação de que algum dos dois seja melhor para a área estudada, visto que os dois materiais tiveram comportamento similar, apesar que os painéis de silício monocristalino apresentaram maiores produções, devido à eficiência mais elevada. Foi observado que, durante o período de estudo, houve redução na produção fotovoltaica, em razão do aumento da temperatura média do ar. Essas reduções foram menores do que -1%, porém, é fato que as mudanças no clima afetam diretamente esse tipo de tecnologia e o monitoramento dessa interação deve continuar nos próximos anos.

Este trabalho demonstrou que o estudo do clima local é fundamental para diversos setores, principalmente o setor energético. Os dados de parâmetros climáticos como a irradiação solar e a temperatura média do ar são importantes para a avaliação da eficiência e produção dos painéis fotovoltaicos. A produtividade dos sistemas fotovoltaicos sofre alterações devido às variações na temperatura média do ar e o desempenho de painéis fotovoltaicos frente as mudanças climáticas deve ser estudado para se obter o melhor aproveitamento dessa tecnologia que está em ascensão.

Sugestões de trabalhos futuros:

- Pesquisas relacionadas aos dados de irradiação solar disponíveis, para que sua utilização seja confiável e aumente a acurácia de projetos do setor energético, principalmente o fotovoltaico.
- Estudos relacionados à variação da temperatura média do ar em painéis de silício monocristalino e policristalino para regiões diferentes, assim como o uso de outros materiais para conversão fotovoltaica, além do comportamento do parâmetro de velocidade do vento na produção fotovoltaica.

REFERÊNCIAS DE TODA A DISSERTAÇÃO

ABAL, G. *et al.* Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay. **Solar Energy**, v. 141, p. 166–181, 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.

ABRAHÃO, R.; PEIXOTO, I. M. B. M.; CARVALHO, M. Solar or wind energy for the Brazilian semiarid? - 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.

AMIN, A. *et al.* Evaluation and analysis of temperature for historical (1996–2015) and projected (2030–2060) climates in Pakistan using SimCLIM climate model: Ensemble application. **Atmospheric Research**, v. 213, n. January, p. 422–436, 2018.

ANTARAMIAN, E.; MÚZQUIZ-IRIBE, E. Recent climate trends in Michoacán. **Quaternary International**, v. 43–44, n. 97, p. 33–42, 1997.

ARNONE, E. *et al.* Rainfall statistics changes in Sicily. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 7, p. 2449–2458, 2013.

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.

BAUSTIAN, M. M. *et al.* A one hundred year review of the socioeconomic and ecological systems of Lake St. Clair, North America. **Journal of Great Lakes Research**, v. 40, n. 1, p. 15–26, 2014.

BAYRAK, F.; OZTOP, H. F.; SELIMEFENDIGIL, F. Effects of different fin parameters on temperature and efficiency for cooling of photovoltaic panels under natural convection. **Solar Energy**, v. 188, n. November 2018, p. 484–494, 2019.

BERTRAND, C.; VANDERVEKEN, G.; JOURNÉE, M. Evaluation of decomposition models of various complexity to estimate the direct solar irradiance over Belgium. **Renewable Energy**, v. 74, p. 618–626, 2015.

BYD. Poly-cristalline 60 cell, P6C-30-SERIES-4BB. Disponível em: <https://sg.byd.com/wp-content/uploads/2017/10/combine-4-1.pdf>. Acesso em: 30/11/2020.

CANADIAN SOLAR. High Density Shingle PERC Module (Mono). 2020. Disponível em: <https://www.csisolar.com/downloads?downid=612>. Acesso em: 11/11/2020.

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

COPPER, J. K.; SPROUL, A. B. Comparative study of mathematical models in estimating solar irradiance for Australia. **Renewable Energy**, v. 43, p. 130–139, 2012.

CORREA-BETANZO, C.; CALLEJA, H.; DE LEÓN-ALDACO, S. Module temperature models assessment of photovoltaic seasonal energy yield. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 27, n. June 2017, p. 9–16, 2018.

COSKUN, C. *et al.* Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic module temperature: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1474–1485, 2017.

CUTFORTH, H. W.; JUDIESCH, D. Long-term changes to incoming solar energy on the Canadian Prairie. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, n. 3–4, p. 167–175, 2007.

DANG, Xin *et al.* Theil-sen estimators in a multiple linear regression model. **Olemiss Edu**, 2008.

DE JONG, Pieter *et al.* Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 1540-1553, 2018.

DE OLIVEIRA, J. V. *et al.* Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. **Urban Climate**, v. 31, n. December 2019, p. 100579, 2020.

DO NASCIMENTO, L. R. *et al.* Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1070–1082, 2020.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Wiley: Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition - John A. Duffie, William A. Beckman. 2013.

EL-SEBAIL, 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-SHAER, A.; TADROS, M. T. Y.; KHALIFA, M. A. Effect of Light intensity and Temperature on Crystalline Silicon Solar Modules Parameters. **Ijetae**, v. 4, n. 8, p. 311–318, 2014.

EL ACHOUBY, H. *et al.* New analytical approach for modelling effects of temperature and irradiance on physical parameters of photovoltaic solar module. **Energy Conversion and Management**, v. 177, n. August, p. 258–271, 2018.

EL MGHOUCI, 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.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1982.

EVERY, J. P.; LI, L.; DORRELL, D. G. Köppen-Geiger climate classification adjustment of the BRL diffuse irradiation model for Australian locations. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2453–2469, 2020.

FANG, W. *et al.* Copulas-based risk analysis for inter-seasonal combinations of wet and

dry conditions under a changing climate. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 4, p. 2005–2021, 2019.

FELTOVICH, N. Nonparametric tests of differences in medians: comparison of the Wilcoxon–Mann–Whitney and robust rank-order tests. **Experimental Economics**, v. 6, n. 3, p. 273–297, 2003.

FITCHETT, J. M. *et al.* Spatio-temporal variation in phenological response of citrus to climate change in Iran: 1960–2010. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198, p. 285–293, 2014.

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.

FUENTES, I.; VAN OGTROP, F.; VERVOORT, R. W. Long-term surface water trends and relationship with open water evaporation losses in the Namoi catchment, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 584, n. December 2019, p. 124714, 2020.

GREENER. Distributed generation solar pv market Brazil. 2019. Disponível em: <https://www.greener.com.br/>. Acesso em: 20/03/2020

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.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 172–182, 2013.

GOUGH, D.; OLIVER, S.; THOMAS, J. An Introduction to Systematic Reviews. p. 303, 2012.

GÜÇLÜ, Y. S. Multiple Şen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. **Journal of Hydrology**, v. 566, n. September, p. 685–704, 2018.

HARTMANN, H.; ANDRESKY, L. Flooding in the Indus River basin - A spatiotemporal analysis of precipitation records. **Global and Planetary Change**, v. 107, p. 25–35, 2013.

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.

INEICHEN, P. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. **Solar Energy**, v. 82, n. 8, p. 758–762, 2008.

JAISWAL, R. K.; LOHANI, A. K.; TIWARI, H. L. Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters. **Environmental Processes**, v. 2, n. 4, p. 729–749, 2015.

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.

JIA, G. *et al.* Chapter 2: Land–climate interactions. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**, p. 131–248, 2019.

JIAPAER, G. *et al.* Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator. **Ecological Indicators**, v. 58, p. 64–76, 2015.

KOUSSA, M.; MALEK, A.; HADDADI, M. Statistical comparison of monthly mean hourly and daily diffuse and global solar irradiation models and a Simulink program development for various Algerian climates. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 5, p. 1227–1235, 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.

LIN, H. *et al.* Drought trends and the extreme drought frequency and characteristics under climate change based on spi and hi in the upper and middle reaches of the Huai River Basin, China. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 4, 2020.

LOPES, J. C. D. J. Mudanças climáticas e suas conseqüências socioeconômicas. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. 127–146, 2008.

LÓPEZ-MORENO, J. I. *et al.* Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. **Global and Planetary Change**, v. 112, p. 1–11, 2014.

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.

MCBEAN, E.; MOTIEE, H. Assessment of impacts of climate change on water resources – a case study of the Great Lakes of North America. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 3, n. 5, p. 3183–3209, 2006.

MEDEIROS, S. E. L. *et al.* Comparison between observed and estimated data to assess air temperature variability and trends in the Sertão Paraibano mesoregion (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 2, 2019.

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.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. 1a ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

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.

MIRZAEI, M.; MOHIABADI, M. Z. A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. **Energy for Sustainable Development**, v. 38, p. 93–101, 2017.

MOLINA, M. J.; ALLEN, J. T. Regionally-stratified tornadoes: Moisture source physical reasoning and climate trends. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, n. October 2019, p. 100244, 2020.

MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 434–435, p. 55–68, 2012.

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

MOURATO, S.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J. Interannual variability of precipitation distribution patterns in Southern Portugal. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 12, p. 1784–1794, 2010.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do

NEPAL, S. Impacts of climate change on the hydrological regime of the Koshi river basin in the Himalayan region. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 10, p. 76–89,

2016.

NOORIAN, A. M.; MORADI, I.; KAMALI, G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, v. 33, n. 6, p. 1406–1412, 2008.

NOTTON, G. *et al.* Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 17–18, p. 2854–2877, 2005.

NOLAY, P. **Développement d'une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques**. Paris, ENMP, 1987.

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.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL–ABES, 2014.

PRABNAKORN, S. *et al.* Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand. **Science of the Total Environment**, v. 621, p. 108–119, 2018.

RAUGEI, M.; FRANKL, P. Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks. **Energy**, v. 34, n. 3, p. 392–399, 2009.

RAYNE, S.; FOREST, K. Rapidly changing climatic conditions for wine grape growing in the Okanagan Valley region of British Columbia, Canada. **Science of the Total Environment**, v. 556, p. 169–178, 2016.

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. *et al.* Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS. **Finnish Meteorological Institute**, n. 31, p. 9, 2002.

SICES SOLAR. CanadianSolar Module 60 Cells. Standard Poly-Si. 2020. Disponível em: <https://sicesolar.com.br/module-60-cells/>. Acesso em: 11/11/2020.

SARHAN, W. M. *et al.* Effect of temperature on the efficiency of the thermal cell. **Asian Journal of Chemistry**, v. 18, n. 2, p. 982–990, 2006.

SCHIERHORN, F. *et al.* Spatially varying impacts of climate change on wheat and barley yields in Kazakhstan. **Journal of Arid Environments**, v. 178, n. October 2019, p. 104164, 2020.

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.

SHIMODA, S.; KANNO, H.; HIROTA, T. Time series analysis of temperature and rainfall-based weather aggregation reveals significant correlations between climate turning points and potato (*Solanum tuberosum* L) yield trends in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263, n. February, p. 147–155, 2018.

SHUBBAK, M. H. Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, n. July, p. 109383, 2019.

SIQUEIRA, C. D. Regime internacional de mudanças climáticas e segurança energética. *Mediações-Revista de Ciências Sociais*, v. 16, n. 2, p. 210-227, 2012.

SIQUEIRA, C. D. Regime internacional de mudanças climáticas e segurança energética. *Mediações-Revista de Ciências Sociais*, v. 16, n. 2, p. 210-227, 2012.

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.

SILVA, W. K. DE M. *et al.* Sugarcane production and climate trends in Paraíba state (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 6, 2020.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar Energy**, v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009.

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

SOUZA, J. S. T.; SOUSA, N. C. A. DE. Temperature influence on mobility and charge density model of photovoltaic cells. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, p. 1–6, 2019.

STRECK, N. A. *et al.* Temperatura mínima de relva em Santa Maria, rs: Climatologia, variabilidade interanual e tendência histórica. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 696–706, 2011.

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

TAHIR, A. A. *et al.* Snow cover trend and hydrological characteristics of the Astore River basin (Western Himalayas) and its comparison to the Hunza basin (Karakoram region). **Science of the Total Environment**, v. 505, p. 748–761, 2015.

TAO, F. *et al.* Wheat yield benefited from increases in minimum temperature in the Huang-Huai-Hai Plain of China in the past three decades. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 1–14, 2017.

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.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence-informed approach. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207–222, 2003.

TZANIS, C. G. *et al.* Recent climate trends over Greece. **Atmospheric Research**, v. 230, n. June, p. 104623, 2019.

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.

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

UTETE, B. *et al.* Fish catches, and the influence of climatic and non-climatic factors in Lakes Chivero and Manyame, Zimbabwe. **Cogent Food & Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2018.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. Ed. re. E atual. – São Paulo: Érica, 2015

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.

XU, X. *et al.* Relative importance of climate and land surface changes on hydrologic changes in the US Midwest since the 1930s: Implications for biofuel production. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 110–120, 2013.

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.

YILMAZ, S. *et al.* The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation - A case study in Kahramanmaras, Turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1015–1024, 2015.

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.

ZAIMI, M. *et al.* Determining combined effects of solar radiation and panel junction temperature on all model-parameters to forecast peak power and photovoltaic yield of solar panel under non-standard conditions. **Solar Energy**, v. 191, n. September, p. 341–359, 2019.

ZEWDIE, W.; CSAPLOVICS, E.; INOSTROZA, L. Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. **Applied Geography**, v. 79, p. 167–178, 2017.

ZHANG, H. *et al.* Changes in multiple ecosystem services between 2000 and 2013 and their driving factors in the Grazing Withdrawal Program, China. **Ecological Engineering**, v. 116, n. November 2017, p. 67–79, 2018a.

ZHANG, Z. *et al.* The response of lake area and vegetation cover variations to climate change over the Qinghai-Tibetan Plateau during the past 30 years. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 443–451, 2018b.