

PROJEÇÕES DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE À SUPERFÍCIE E NEBULOSIDADE PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL APLICANDO UM CONJUNTO DE MODELOS CLIMÁTICOS

Resumo

As mudanças climáticas influenciam diretamente nas características do clima, no aumento dos eventos extremos e pode gerar impactos na produção energética, na saúde e na produção alimentar. Variáveis como a radiação solar e a nebulosidade também podem ser influenciadas. Sabe-se que a radiação solar incidente à superfície atua sobre o ciclo hidrológico e o balanço radioativo, o qual também é influenciado pela nebulosidade. Os modelos climáticos globais (GCM) e os modelos climáticos regionais (RCM) projetam dados climáticos futuros baseados em parâmetros de temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, radiação, nebulosidade, entre outros, vinculados a cenários RCP. Neste estudo, foram utilizados os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 a fim de projetar as condições futuras para a radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil no período de 2041-2069 e 2070-2099. Os resultados evidenciaram o aumento predominante da radiação solar incidente e a redução da nebulosidade para a maior parte dos modelos climáticos podendo gerar impactos na produção de energia solar fotovoltaica.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, parques fotovoltaicos, energia fotovoltaica.

Abstract

Climate change directly influences the characteristics of the climate, the increase in extreme events and can generate impacts on energy production, health and food production. Variables such as solar radiation and cloudiness can also be influenced. It is known that solar radiation on the surface acts on the hydrological cycle and the radioactive balance, which is also influenced by cloud cover. Global climate models (GCM) and regional climate models (RCM) project future climate data based on parameters of temperature, precipitation, wind speed, radiation, cloud cover, among others, linked to CPR scenarios. In this study, the Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES and Eta-CanESM2 models associated with the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were used in order to project the future conditions for solar radiation on the surface and cloudiness for the Northeast region of Brazil in the period 2041-2069 and 2070-2099. The results showed a predominant increase in incident solar radiation and a reduction in cloud cover for most climate models, which may have an impact on the production of photovoltaic solar energy.

Keywords: Climate change, photovoltaic parks, photovoltaic energy.

1. INTRODUÇÃO

Baseados nos oito objetivos de Desenvolvimento do Milênio, foram criados os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), os quais buscam atingir o equilíbrio entre o social, o econômico e o ambiental até 2030 (NYASIMI, 2015; LEAL FILHO *et al.*, 2018). Os ODS 13 tratam diretamente das ações contra a mudança global do clima. Essas mudanças climáticas geram uma série de transtornos para a vida em sociedade, desde o aumento dos

eventos extremos aos impactos nos ecossistemas, na produtividade alimentar, na saúde e no crescimento econômico causando maiores transtornos aos mais pobres (NYASIMI, 2015).

Um dos fatores que ajudam na mitigação das questões climáticas é a utilização das energias renováveis em detrimento das provenientes dos combustíveis fósseis, como por exemplo as energias energia solar e eólica (RAVESTEIN *et al.*, 2018; MOHAJERI *et al.*, 2019, DE JONG *et al.*, 2019). Todavia, deve-se levar em consideração que as fontes renováveis também sofrem com as alterações climáticas, as quais poderão causar modificações no regime de chuvas, aumento das secas (PRUDHOMME *et al.*, 2013; MARENGO; BERNASCONI 2015; MARENGO; TORRES; ALVES 2017), mudanças na velocidade e na intensidade dos ventos, na radiação solar e em outras características ambientais (WACHSMUTH *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2015; OHUNAKIN *et al.* 2015; BARTÓK *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2018; DE JONG *et al.*, 2019).

Ao final da década de 60, foi desenvolvido o primeiro modelo de circulação geral no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos da NOAA em Princeton – Estados Unidos. O modelo era capaz de relacionar os processos atmosféricos e oceânicos que influenciam no clima e também sua relação com os elementos naturais (NOAA, 2017).

Os modelos climáticos globais e regionais projetam as condições climáticas futuras de uma região (PAŠIČKO; BRANKOVIĆ; ŠIMIĆ, 2012; QUEIROZ *et al.*, 2016). Junto a estes são utilizados os cenários RCP (Caminhos Representativos de Concentração) que consideram tanto cenários futuros ambientalmente mais otimistas até cenários mais pessimistas, levando em consideração a emissão e a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, e questões econômicas, políticas e sociais (THOMSON *et al.*, 2011; RIAHI *et al.*, 2011).

2. PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Diante das mudanças climáticas surgiu a necessidade e a crescente preocupação de entender como os elementos climáticos se comportarão face a nova perspectiva do clima. Sendo assim, é imprescindível estudos que visem projetar cenários de mudanças climáticas afim de simular como os diferentes elementos do clima serão impactos e como esses impactos afetarão a produção energética renovável.

Desta forma, o presente artigo teve por finalidade projetar resultados futuros para a radiação solar de onda curta incidente à superfície e a nebulosidade para o período futuro de 2041-2069 e 2070-2099 na região Nordeste do Brasil.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A radiação solar é de extrema importância para assegurar a vida na Terra, esse parâmetro é responsável pelos movimentos atmosféricos, sendo o principal componente na troca de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera. O ciclo hidrológico e o sistema climático são amplamente impulsionados pela incidência da radiação, além de influenciar na circulação atmosférica, na produção agrícola e na geração da energia solar (WILD; GRIESER; SHÄR *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2016; TAO *et al.*, 2021). Sendo a radiação de onda curta incidente aquela que atinge a superfície terrestre na faixa espectral contida entre 300 nm e 4000 nm (Liang *et al.*, 2010).

Para a produção de energia solar, além da radiação, a cobertura das nuvens é uma propriedade de grande importância a ser considerada. Está será influenciada pelas partículas atmosféricas em suspensão as quais poderão aumentar a cobertura das nuvens (BURNETT; BARBOUR; HARRISON, 2014).

As nuvens são responsáveis por cobrir 60% da superfície terrestre e influenciam no balanço radioativo e também na distribuição da temperatura, modulação do albedo global e na

circulação geral atmosférica (OHUNAKIN *et al.*, 2015; PYRINA *et al.*, 2015). Além disso, o aumento da nebulosidade provoca a redução da irradiância UV (FOYO-MORENO *et al.*, 2013) e junto a elevação solar são os dois fatores que mais influenciam na irradiação solar total (SANTOS; VILLÁN; CASTRILLO, 2011).

Levando em consideração as mudanças climáticas e os impactos que poderão causar no Nordeste do Brasil, o presente artigo teve por finalidade projetar resultados futuros para a radiação solar de onda curta incidente à superfície e a nebulosidade para o período futuro de 2041-2069 e 2070-2099 na região Nordeste do Brasil.

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterização da área de estudo

A região Nordeste está localizada no extremo leste da América do Sul e é banhada pelo Oceano Atlântico (COSTA *et al.*, 2020), sendo a segunda maior região do país com aproximadamente 1.552.167,01 km², que corresponde a cerca de 18% do território nacional. O Nordeste está dividido em nove estados e possui população estimada de 57.374.243 pessoas em 2020 (IBGE, 2019; IBGE, 2020; LIMA *et al.*, 2019) (Figura 1).

A região Nordeste apresenta altas temperatura médias, as quais variam entre 20°C e 28°C e precipitação anual com grande variabilidade espacial e temporal (LIMA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020). A partir da classificação de Köppen-Geiger, a região apresenta o clima predominantemente tropical, com presença do clima semiárido que se estende por todos os estados, com exceção do estado do Maranhão (ALVARES *et al.*, 2013).

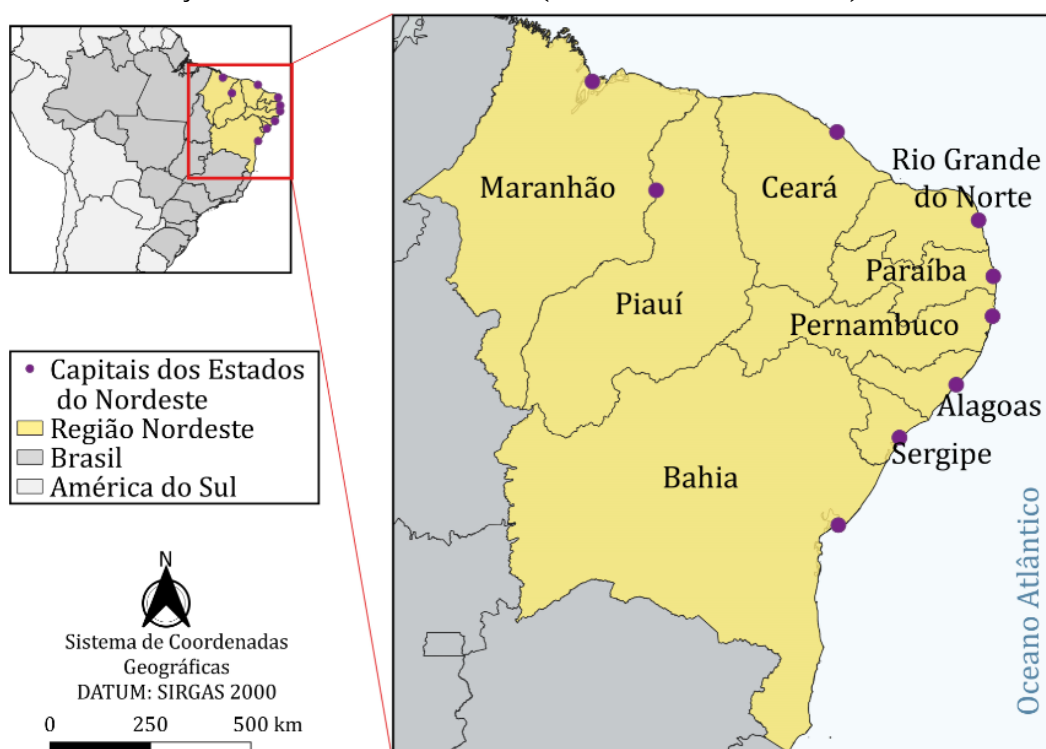


Figura 1: Mapa de localização da Região Nordeste do Brasil. Fonte: IBGE (2017).

De acordo com a ANEEL (2010) a insolação solar diária na região Nordeste tem as maiores taxas do Brasil. A região encontra-se próxima à linha do Equador, o que contribui para que não haja grandes variações na duração solar do dia e o nível da radiação solar seja alto

(FERREIRA *et al.*, 2018; OSCAR JUNIOR *et al.*, 2015). Com o alto potencial solar do Nordeste, já há 93 empreendimentos fotovoltaicos em operação em sete estados (exceção para Sergipe e Alagoas), com uma potência outorgada de 2.333,93 MW (ANEEL, 2021).

4.2. Projeções climáticas

As projeções foram realizadas a partir de um conjunto com três modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional obtidos a partir do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) na plataforma do Projeta (CHOU *et al.*, 2014a; CHOU *et al.*, 2014b; BRAZIL, 2016; LYRA *et al.*, 2017). Os modelos globais utilizados foram o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) (BESM, 2021), o *Hadley Centre Global Environment Model versão 2 - Earth System* (HadGEM2-ES), o *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CanESM2) (MOHAN; BHASKARAN, 2019) e o modelo regional foi o Eta (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017).

O modelo BESM é aninhado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*) e seus processos da superfície terrestre são representados a partir do modelo SSIB (Modelo Simples da Biosfera) (CHOU *et al.*, 2014a). O BESM foi desenvolvido pelo INPE e está baseado na estrutura do modelo acoplado oceano-atmosfera do CPTEC (VEIGA *et al.*, 2019).

A segunda geração da família do HadGEM, o HadGEM2-ES, inclui componentes atmosféricos, de gelo marinho e oceano (MARTIN *et al.*, 2011). Este modelo compreende a atmosfera física e os componentes do oceano com esquemas para caracterizar os aspectos do sistema terrestre (COLLINS *et al.*, 2011).

A segunda geração do modelo canadense do sistema terrestre, CanESM2, é aninhado pelo modelo físico-oceânico-atmosfera (CanCM4), acoplado a um modelo de carbono terrestre (CTEM) e um modelo de carbono oceânico (CMOC) (SOSPEDRA-ALFONSO; MERRYFIELD, 2017).

Os processos de superfície terrestre do modelo regional Eta são representados pelo modelo de superfície da terra Noah (EK *et al.*, 2003), a microfísica das nuvens é baseada no esquema de Zhao *et al.* (1997), a radiação de ondas longas é representada por Fels e Schwarzkopf (1975) e a radiação de ondas curtas por Lacis e Hansen (1974).

Associados aos modelos climáticos utilizaram-se dois cenários dos Caminhos Representativos de Concentração, o RCP4.5, cenários de emissões moderadas, e o RCP8.5, cenário de altas emissões, mais pessimista. No cenário RCP4.5 a forçante radioativa seria de 4,5 W/m² e a concentração de CO₂ em 650 ppm se estabilizaria após 2100 (THOMSON *et al.*, 2011). No caso do RCP8.5, cenários de altas emissões, além de um alto crescimento populacional, a forçante radioativa alcançaria 8,5 W/m², e a concentração de CO₂ seria superior a 1370 ppm e continuariam subindo após 2100 (RIAHI *et al.*, 2011).

As projeções foram realizadas para os parâmetros de radiação de onda curta incidente à superfície e nebulosidade para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de referência de 1961-1990, por ser considerada uma normal climatológica de referência, em 3237 pontos da região Nordeste do Brasil, os quais encontram-se a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Radiação de onda curta incidente à superfície

As mudanças na radiação de onda curta incidente à superfície anual projetadas por meio dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 estão apresentadas na Figura 2.

As projeções derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram o provável aumento da radiação sobretudo no RCP8.5. De acordo com as projeções de ambos os modelos, o aumento será mais intenso para as cidades localizadas no estado do Maranhão. Resultados de aumento da radiação para o Nordeste do Brasil sob o RCP8.5 em 2070-2099 também foram observados por De Jong *et al.* (2019).

Apesar dos resultados predominantes de aumento da radiação nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 observou-se uma possível redução no cenário de emissões moderadas, em 2041-2069, no modelo Eta-HadGEM2-ES. No caso do estudo realizado por Oscar Junior *et al.* (2015) reduções na radiação solar foram projetados pelo modelo Eta-MIROC5 sob o RCP8.5. Os autores projetaram diminuição da radiação de cerca 6% para algumas regiões. No presente trabalho, a diminuição da radiação é observada de forma predominante no modelo Eta-BESM, com uma média superior a 4% sob o RCP4.5 e acima de 2% sob o RCP8.5 para todo o Nordeste. No caso dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 as projeções de aumento são predominantes.

Resultados para outras regiões pelo mundo evidenciaram aumento da radiação até 2049, no entanto, reduções para o Noroeste da China e da Índia foram projetados por um conjunto de modelos do CMIP5 (WILD *et al.*, 2015).

Ao contrário do que ocorre com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, onde o aumento da radiação é predominante no Nordeste do Brasil, no modelo Eta-BESM os resultados de diminuição da radiação prevalecem, principalmente no cenário de emissões moderadas. Ainda assim, um pequeno aumento da radiação foi observado com o Eta-BESM para os estados do Maranhão, Bahia e uma pequena porção do estado do Piauí sob o cenário de altas emissões.

Resultados para uma mesma área que se contrapõem também foram observados na Europa onde a média de cinco GCM's apontaram o aumento da radiação solar na superfície e os RCM's projetaram uma diminuição observada em três dos quatro modelos regionais empregados (CCLM, RCA4 e WRF) até o final do século XXI sob o RCP8.5 (BARTÓK *et al.*, 2017).

Tal como as projeções geradas pelo modelo Eta-BESM, resultados de redução predominante da radiação solar foram observados por Ohunakin *et al.* (2015), na Nigéria, até o final do século XXI a partir do RegCM3 junto ao ECHAM5.

Com a finalidade de observar a dispersão dos dados a partir dos modelos empregados, calculou-se o desvio padrão. Os valores médios de desvio padrão para os cenários evidenciaram que os resultados ficaram próximos à média o que demonstra que os dados da amostra são homogêneos, ou seja, há uma menor dispersão entre eles (Tabela 1).

Tabela 1: Média e desvio padrão (DP) das anomalias detectadas pelos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para a radiação solar incidente à superfície.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	-4,7	1,9	-0,3	1,3	1,1	1,2
RCP4.5 (70-99)	-4,5	1,8	0,3	1,5	1,2	1,5
RCP8.5 (41-69)	-2,2	1,5	3,2	1,5	2,1	2,0
RCP8.5 (70-99)	-2,4	1,9	3,4	2,7	5,7	3,7
Valores médios	-3,4	1,8	1,6	1,8	2,5	2,1

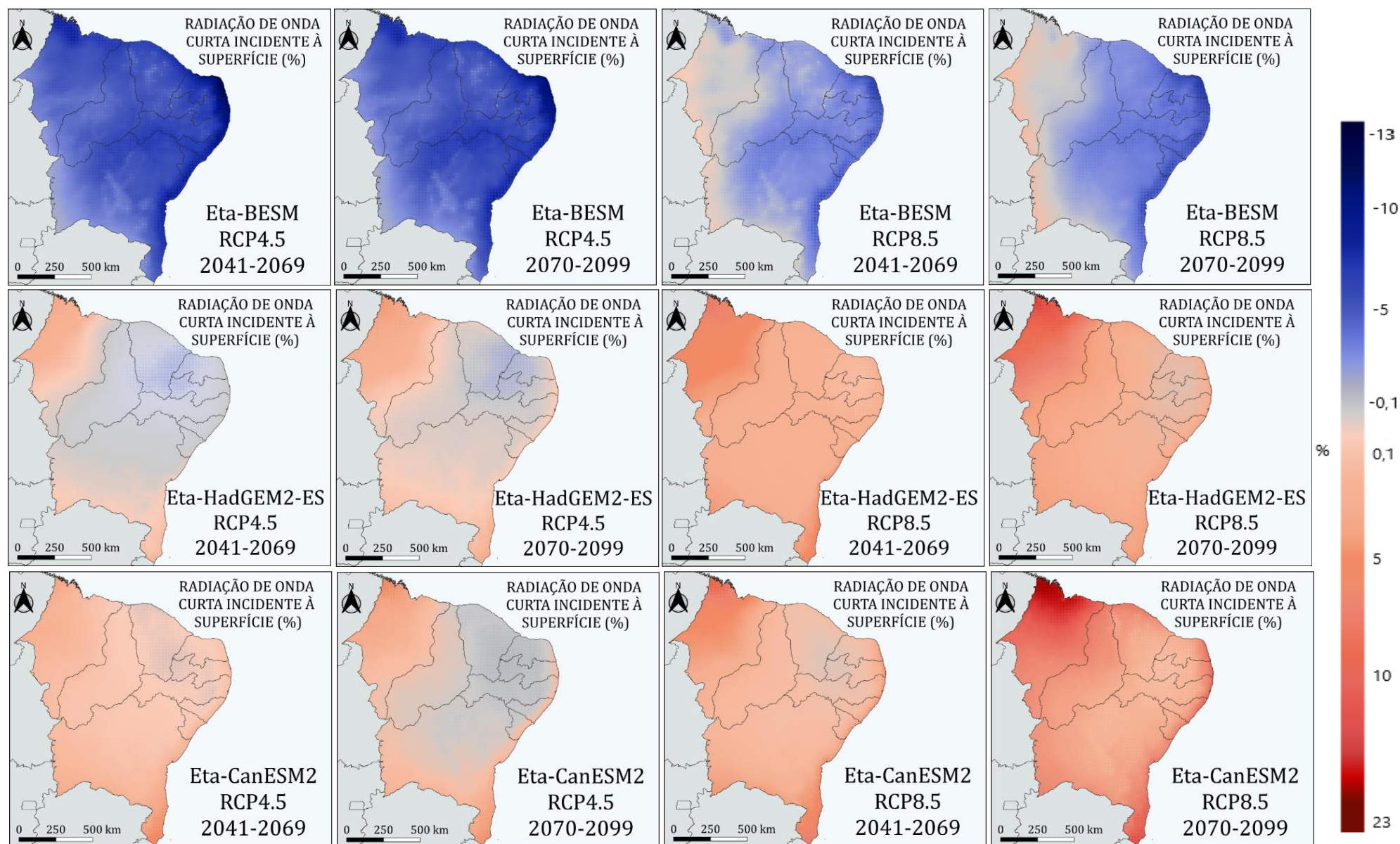


Figura 2: Anomalias projetadas para radiação de onda curta incidente à superfície nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

5.2. Nebulosidade

As projeções derivadas dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para nebulosidade podem ser vistas na Figura 3. Assim como ocorre nos resultados para radiação, os dados apresentados pelo modelo Eta-BESM contrastaram com os dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. No Eta-HadGEM2-ES e no Eta-CanESM2 a nebulosidade apresentou redução em toda a região Nordeste. Por outro lado, no Eta-BESM as projeções indicaram aumento nos dois cenários estudados, ocorrendo de forma mais intensa sob o RCP4.5.

Resultados para outras áreas no mundo também mostraram a diminuição da nebulosidade, como por exemplo na Europa, onde a média dos cinco GCM's utilizados apontaram redução no RCP8.5 até o final do século XXI (BARTÓK *et al.*, 2017). Os resultados do presente estudo sugeriram que a redução da nebulosidade é mais acentuada sob o RCP8.5, sobretudo para o final do século XXI no Eta-HadGEM2-ES e no Eta-CanESM2. De acordo com Ohunakin *et al.* (2015) a nebulosidade está prevista para aumentar futuramente na Nigéria e acredita-se que o aumento na radiação seja o principal responsável pela diminuição da irradiação solar global.

As projeções no presente trabalho demonstraram que enquanto a radiação aumentará a nebulosidade diminuirá para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. No caso do modelo Eta-BESM acontecerá o inverso. Esses resultados são coerentes dentro de cada modelo, já que uma redução na nebulosidade facilitará a chegada de radiação de onda curta à superfície. Foyo-Moreno *et al.* (2003) afirmaram que o aumento da nebulosidade leva a significativas reduções na irradiância UV que alcança a superfície.

Os resultados para o cálculo do desvio padrão evidenciaram que o modelo Eta-BESM apresentou o maior desvio padrão quando comparados aos observados para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2. Em consequência, esse resultado elevado indica uma maior variabilidade dos dados no modelo Eta-BESM, enquanto para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 os dados são mais homogêneos (Tabela 2.).

Tabela 2: Média e desvio padrão (DP) das anomalias detectadas pelos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para a nebulosidade.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	15,5	24,9	-29,0	8,4	-39,6	7,6
RCP4.5 (70-99)	8,9	22,5	-41,7	7,6	-45,8	6,8
RCP8.5 (41-69)	-3,8	17,2	-45,7	6,0	-51,1	9,1
RCP8.5 (70-99)	-25,0	17,4	-60,8	7,7	-77,0	5,1
Valores médios	-1,1	20,5	-44,3	7,4	-53,4	7,2

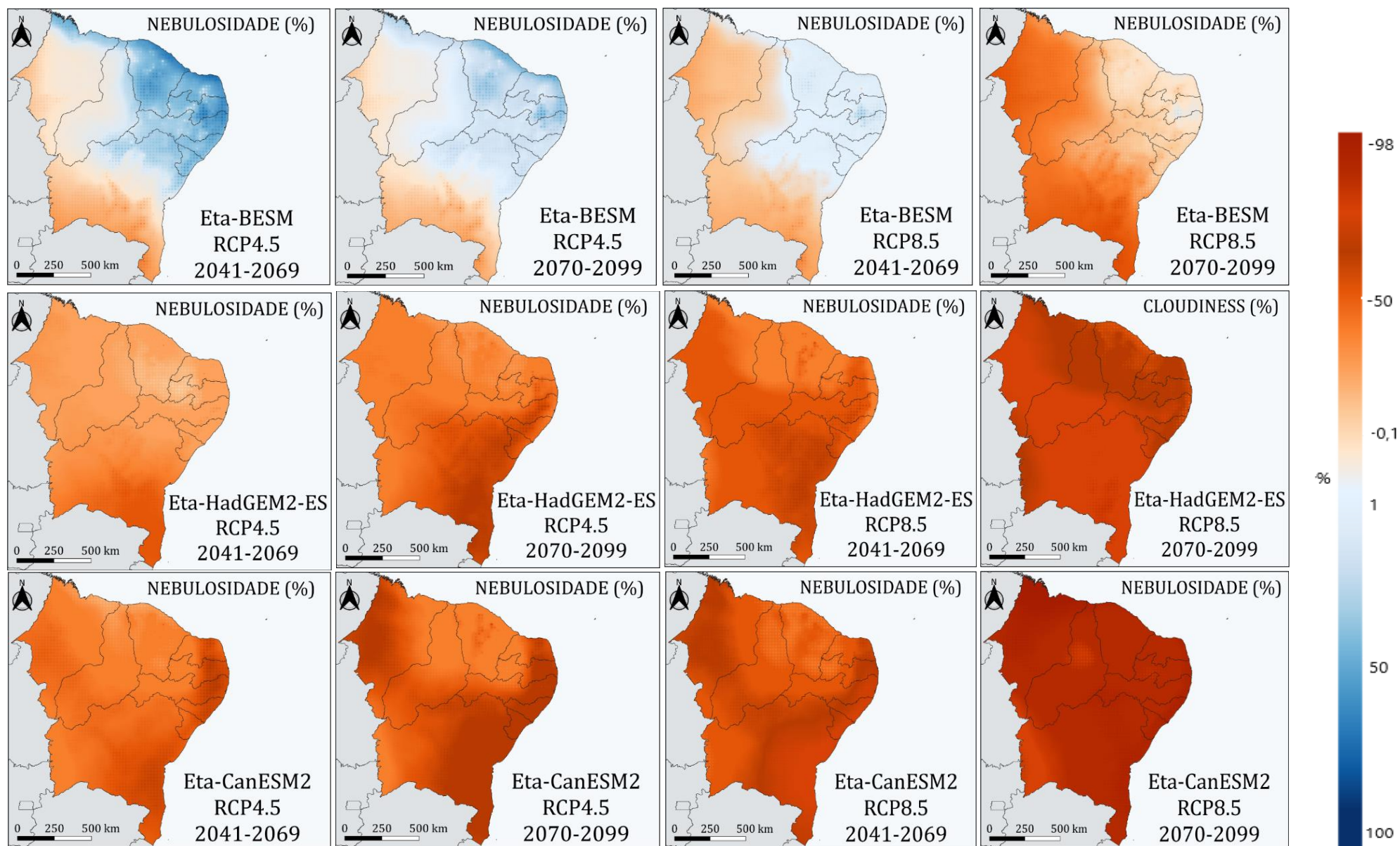


Figura 3: Anomalias projetadas para nebulosidade nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

Como pode ser visto na Figura 4, a região Nordeste do Brasil concentra um número expressivo de usinas fotovoltaicas em operação e algumas em construção, as quais poderão ser afetadas pelas mudanças climáticas.

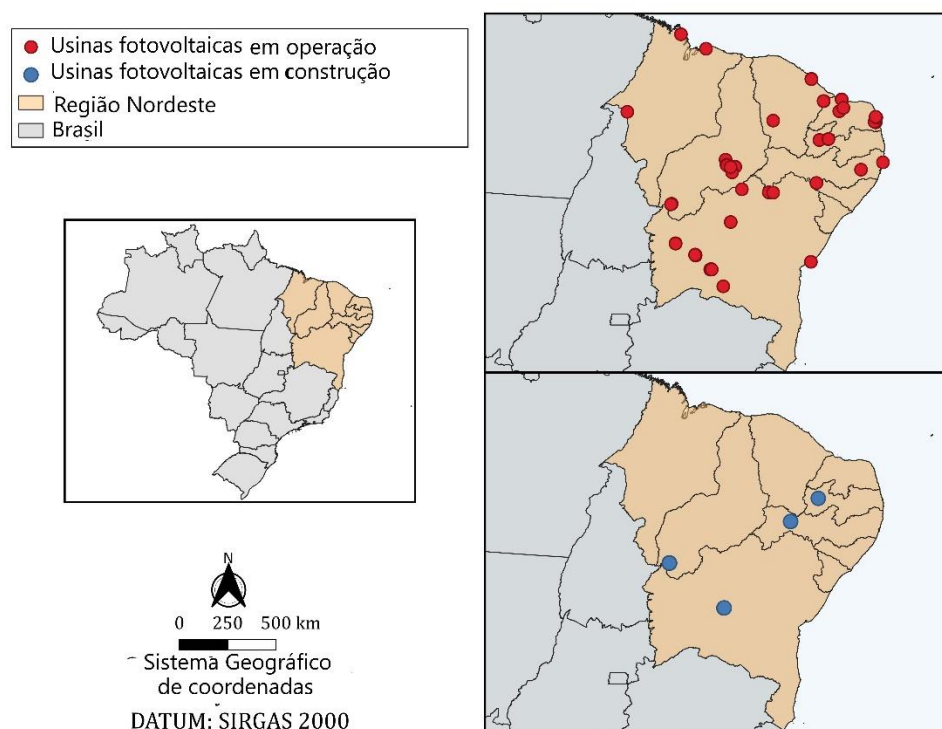


Figura 4: Usinas fotovoltaicas localizadas na Região Nordeste do Brasil. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2020).

Seguindo as projeções do modelo Eta-BESM, algumas das áreas onde estão localizadas as usinas fotovoltaicas sofrerão com a redução da radiação solar incidente à superfície e incremento da nebulosidade, principalmente sob o RCP4.5. Acontece o mesmo no modelo Eta-HadGEM2-ES, também para o cenário de emissões moderadas sobretudo em 2041-2069. De acordo com Zhang *et al.* (2018) os recursos solares globais aumentarão durante o século XXI sob os cenários RCP2.6 e RCP8.5.

No estado do Maranhão há três usinas fotovoltaicas em operação, a que se encontra no município de Imperatriz (a oeste do estado do Maranhão) está localizada em uma área onde as projeções sugeriram o aumento da radiação e redução da nebulosidade em todos os cenários e modelos empregados, com exceção do RCP4.5 no modelo Eta-BESM (Figura 2, Figura 3 e Figura 4). Em Ontário-Canadá, Wang *et al.* (2020) sugeriram que a geração solar poderá aumentar em 41% em 2050 e 52% em 2080 ambos sob o RCP4.5. No cenário RCP8.5, esse incremento será de 67% em 2050 e de 70% em 2080.

De acordo com Wang *et al.* (2020) afirmaram o desenvolvimento da energia solar em Ontário possivelmente se beneficiará das mudanças climáticas devido ao número reduzido de dias chuvosos e nublados. No presente estudo, as projeções a partir dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 indicaram a possível redução da nebulosidade nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 e no cenário de altas emissões no modelo Eta-BESM para a região Nordeste (Figura 3).

No geral, as usinas fotovoltaicas no Maranhão encontram-se em áreas onde as projeções são favoráveis para a elevação da radiação solar e redução da nebulosidade nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 (Figura 2, Figura 3 e Figura 4).

De acordo com De Jong *et al.* (2019) os aumentos projetados na radiação solar são estatisticamente insignificantes para os parques solares de Aquiraz (Ceará), Coremas/Malta (Paraíba) e Areia Branca (Rio Grande do Norte). Por sua vez, nos parques de Bom Jesus Lapa, Tabocas Brejo Velho, Salvador e Juazeiro (Bahia); Agrestina (Pernambuco); Ribeira do Piauí/João Costa (Piauí); Arei Branca (Rio Grande do Norte) e outros parques no Brasil os aumentos projetados da radiação foram estatisticamente significativos.

A partir do estudo das tendências históricas Medeiros *et al.* (2021) as localidades de Água Branca, Aguiar, Coremas, Patos, Princesa Isabel, São Gonçalo e Teixeira, no estado da Paraíba, apresentaram um bom potencial para geração de energia solar anual e mensal. De acordo com as projeções no presente trabalho, estas localidades apresentarão o aumento da radiação sob o RCP8.5 e redução da nebulosidade nos dois cenários aplicados sob os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

Por fim, os resultados para radiação solar incidente à superfície e a nebulosidade se apresentaram de forma inversamente proporcional. Os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 projetaram resultados próximos, todavia, o modelo Eta-BESM vai de encontro com os dados dos outros modelos.

6. CONCLUSÃO

No presente estudo foram realizadas projeções para radiação solar incidente à superfície e nebulosidade para a região Nordeste do Brasil a partir dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 associados aos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para 2041-2069 e 2070-2099.

Enquanto os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 projetaram predominantemente o aumento na radiação solar incidente à superfície, o modelo Eta-BESM vai de encontro a estes e mostra uma redução futura para a maior parte do Nordeste do Brasil. Assim como ocorre para a radiação solar incidente à superfície, na nebulosidade o modelo Eta-BESM vai de encontro ao que foi projetado nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

Observou-se que nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, nos quais são projetados aumentos na radiação, percebe-se a redução da nebulosidade. Enquanto o aumento da nebulosidade no Eta-BESM combina com a redução da radiação.

As projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram pequenas reduções na radiação para algumas áreas do Nordeste do Brasil. Em algumas dessas localidades encontram-se usinas fotovoltaicas em operação e em construção. Como as projeções indicaram pequenas diminuições é possível que as usinas fotovoltaicas não sejam amplamente afetadas.

De acordo com os resultados dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, o aumento da radiação é mais intenso sob o RCP8.5 o que poderia gerar um cenário mais favorável para produção de energia solar. Percebe-se que no estado do Maranhão há poucas usinas fotovoltaicas, todavia, as projeções de aumento na radiação solar incidente à superfície ocorreram em todos os cenários nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto 306783/2018-5 e as bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ed; 2010. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia%20Solar(3).pdf). Acesso em: 08/10/2020.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 02/10/2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LUTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHAR, C.; VAUTARD, R.; JEREZ, S.; IMECS, Z. Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 7–8, p. 2665–2683, 2017.
- BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 02/03/2021.
- BRAZIL. **Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary**. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.
- BURNETT, D.; BARBOUR, E.; HARRISON, G. P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. **Renewable Energy**, v. 71, p. 333–343, 2014.
- CANADA. CA. Environment and Climate Change Canada. Disponível em: <https://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?lang=En&n=1A3B7DF1-1&wbdisable=true>. Acesso em: 27/02/2021.
- COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051–1075, 2011.
- COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L. DA.; SALVADOR, M. DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_lViko. Acesso em: 07/08/2020.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 3, 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_lVikp. Acesso em: 07/08/2020.

- DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOU, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390–401, 2019.
- EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J.D. Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 8851, 2003.
- FELS, S.B.; SCHWARZKOPF, M.D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, p. 1475-1488, 1975.
- FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A DE., TONEZER, C.; SANTOS, G. R DOS.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. April 2016, p. 181–191, 2018.
- FOYO-MORENO, I. ALADOS, I.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. The Influence of Cloudiness on UV Global Irradiance (295–385 nm). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 120, p. 101-111, 2003.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 31/08/2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?>. Acesso em: 16/09/2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 16/09/2020.
- LACIS A.A.; HANSEN, J. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.
- LEAL FILHO, W.; AZEITEIRO, U.; ALVES, F.; PACE, P.; MIFSUD, M.; BRANDLI, L.; CAEIRO, S. S.; DISTERHEFT, A. Reinvigorating the sustainable development research agenda: the role of the sustainable development goals (SDG). **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 25, n. 2, p. 131–142, 2018.
- LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.
- LIANG, S.; WANG, K.; ZHANG, X.; WILD, M. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, V. 3, p. 225-240, 2010.
- LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution Theor Appl Climatol. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.
- MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, n. 1–2, p. 103–115, 2015.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past,

- present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2017.
- MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E; MCLAREN, A. J.; O’CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.
- MEDEIROS, S. E. L.; NILO, P. F.; SILVA, L. P.; SANTOS, C. A. C.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, 184, 104331, 2021
- MOHAJERI, N.; PERERA, A. T. D.; COCCOLO, S.; MOSCA, L.; LE GUEN, M.; SCARTEZZINI, J. Integrating urban form and distributed energy systems: Assessment of sustainable development scenarios for a Swiss village to 2050. **Renewable Energy**, v. 143, p. 810–826, 2019.
- MOHAN, S.; BHASKARAN, P. K. Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 9–10, p. 5415–5435, 2019.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 14/07/2021.
- NYASIMI, M. Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v. 9, n. 2, p. 237–237, 2015.
- OHUNAKIN, O. S.; ADARAMOLA, M. S.; OYEWOLA, O. M.; MATTHEW, O. J.; FAGBENLE, R. O. The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. **Solar Energy**, v. 116, p. 272–286, 2015.
- OSCAR JUNIOR, A.; SILVA, W. L.; RUFFATO, V.; BARRETO, R.; FEEITAS, M. Evaluation of Renewable Energy Vulnerability to Climate Change in Brazil: A Case Study of Biofuels and Solar Energy. **Smart Grid and Renewable Energy**, v. 06, n. 08, p. 221–232, 2015.
- PRUDHOMME, C.; GIUNTOLI, I.; ROBINSON, E. L.; CLARK, D. B.; ARNELL, N. W.; DANKERS, R.; FEKETE, B. M.; FRANSSEN, W.; GERTEN, D.; GOSLING, S. N.; HAGEMANN, S.; HANNAH, D. M.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3262–3267, 2014.
- PYRINA, M.; HATZIANASTASSIOU, N.; MATSOUKAS, C.; FOTIADI, A. Cloud effects on the solar and thermal radiation budgets of the Mediterranean basin.

- Atmospheric Research**, v. 152, p. 14–28, 2015.
- PASIČKO, R.; BRANKOVIĆ, C.; ŠIMIĆ, Z. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia. **Renewable Energy**, v. 46, p. 224–231, 2012.
- QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; SCIANNI, L. A. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v. 99, p. 379–389, 2016.
- RAVESTEIN, P.; SCHRIER, V. D.; HAARSMA, R.; SCHEELE, R.; BROEK, V. D. Vulnerability of European intermittent renewable energy supply to climate change and climate variability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, n. October 2017, p. 497–508, 2018.
- RIAH, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.
- RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; FREITAS, M. A. V DE. A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: Hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.
- SANTOS, J. B.; VILLÁN, D. M.; CASTRILLO, A DE. M. Analysis and Cloudiness Influence on UV Total Irradiation. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 451–460, 2011.
- SANTOS, J. A.; ROCHINHA, C.; LIBERATO, M. L. R.; REYERS, M.; PINTO J. G. Projected changes in wind energy potentials over Iberia. **Renewable Energy**, v. 75, n. 2015, p. 68–80, 2015.
- SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M DE.; AÑEL, J. A.; CARVALHO, D.; COSTOYA, X.; DIAS, J.M. On the accuracy of CORDEX RCMs to project future winds over the Iberian Peninsula and surrounding ocean. **Applied Energy**, v. 228, p. 289–300, 2018.
- SOSPEDRA-ALFONSO, R.; MERRYFIELD, W. Influences of Temperature and Precipitation on Historical and Future Snowpack Variability over the Northern Hemisphere in the Second Generation Canadian Earth System Model. **Journal of Climate**, v. 30, p. 4633–4656, 2017.
- TAO, H.; EWES, A. A. E.; AL-SULTTANI, A. O.; BEYAZTAS, U.; HAMEED, M. M.; SALIH, S.; ARMANUOS, A. M.; AL-ANSARI, N.; VOYANT, C.; SHARID, S.; YASSEN, Z. M. Global solar radiation prediction over North Dakota using air temperature: Development of novel hybrid intelligence model. **Energy Reports**, v. 7, p. 136–157, 2021.
- THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.
- VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. The Brazilian Earth System Model ocean-atmosphere (BESM-OA) version 2.5: Evaluation of its CMIP5 historical simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1613–1642, 2019.
- WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖßLING-REISEMANN, s.; EICKEMEIER, T.;

- GASPER, R.; STÜHRMANN, S. How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a metropolitan region in Northwest Germany. **Energy**, v. 58, p. 192–201, 2013.
- WANG, K. C.; DICKINSON, R. E.; WILD, M.; LIANG, S. Atmospheric impacts on climatic variability of surface incident solar radiation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 20, p. 9581–9592, 2012.
- WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123026, 2020.
- WILD, M.; GRIESER, J.; SHÄR, C. Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, p. 1–5, 2008.
- WILD, M. *et al.* Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 116, p. 12–24, 2015.
- ZHANG, X.; LIANG, S.; WILD, M.; JIANG, B. Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p. 186–202, 2015.
- ZHANG, X.; LIANG, S.; WANG, G.; YAO, Y.; JIANG, B.; CHENG, J. Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, 2016.
- ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, G.; KONG, W.; JIN, S.; HU, J.; CHEN, X. Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v. 1, n. 4, p. 443–451, 2018.
- ZHAO, Q. BLACK, T.L.; BALDWIN, M.E. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. **Weather and Forecasting**, v. 12, p. 697–712, 1997.