

PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL EMPREGANDO OS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS HADGEM2-ES E MIROC5 ASSOCIADOS AO MODELO REGIONAL ETA.

PAULA ROSE DE ARAUJO SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

LOUISE PEREIRA DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

SUSANE ETERNA LEITE MEDEIROS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Introdução

As mudanças no clima e o aumento dos eventos climáticos extremos evidenciam a necessidade de compreender as condições climáticas futuras. Sendo assim, foram desenvolvidos os modelos climáticos, os quais consideram uma série de parâmetros e com isso são capazes de projetar dados climáticos futuros (QUEIROZ et al., 2016). O primeiro modelo de circulação geral foi desenvolvido no final da década de 1960 em Princeton, Estados Unidos, no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos da NOAA (NOAA, 2017).

Problema de Pesquisa e Objetivo

O presente trabalho teve por objetivo projetar as condições de precipitação para a região Nordeste do Brasil empregando dois modelos climáticos globais associados ao modelo climático regional Eta. Junto aos modelos utilizou-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparando-os com o período de 1961-1990.

Fundamentação Teórica

Entre alguns estudos realizados, foram previstos aumentos das chuvas na costa norte do Peru e Equador e no sudeste da América do Sul em geral. No entanto, o mesmo estudo estima que o leste da Amazônia e a região Nordeste sofrerão com a redução nos índices pluviométricos (MARENGO et al., 2012). Além disso, Marengo et al. (2009) projetaram tendência negativa para a precipitação e aumento de dias secos e consecutivos para o leste da Amazônia e Nordeste do Brasil. Dessa forma, o aumento da temperatura e a redução das chuvas podem gerar condições mais quentes e secas.

Metodologia

Os dados dos elementos foram derivados de projeções provenientes de dois modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional obtidos através 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). Para realizar as projeções climáticas foi considerado o período de referência (1961-1990), por ser uma normal climatológica de referência, e os períodos futuros (2041-2069 e 2070-2099) em 3237 pontos.

Análise dos Resultados

As projeções evidenciaram a possível redução da precipitação na maior parte do Nordeste do Brasil. Todavia, é possível observar que pode haver um aumento da precipitação em algumas localidades, sendo mais expressivo sob o RCP4.5 sobretudo em 2041-2069 no modelo Eta-HadGEM2-ES e em 2070-2099 no modelo Eta-MIROC5. Percebe-se que apesar dos modelos aplicados projetarem aumento da precipitação para algumas áreas do Nordeste há algumas diferenças a serem observadas.

Conclusão

A região Nordeste do Brasil é conhecida por ser uma área que enfrenta enormes problemas de escassez de água, principalmente na parte do semiárido. Os resultados predominantes a respeito da redução da precipitação poderão gerar um cenário mais crítico. A mudança no comportamento da precipitação diante das alterações no clima evidenciará a vulnerabilidade na produção agrícola, abastecimento e setor energético. Esses fatores deixam claro a necessidade de um planejamento gerencial e reflexões de toda a comunidade científica, gestores e população com foco nas adaptações às mudanças climáticas.

Referências Bibliográficas

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. BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. Advances in Meteorology, v. 2018, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6204382>.

Palavras Chave

Mudanças climáticas, IPCC, Ciclo hidrológico

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (projeto 308753/2021-6 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00), à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) (projeto do edital nº 09/2021 Demanda Universal) e à Universidade Federal da Paraíba (projeto PVK13163-2020).

PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL EMPREGANDO OS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS HADGEM2-ES E MIROC5 ASSOCIADOS AO MODELO REGIONAL ETA.

Resumo

A variabilidade na precipitação, o aumento da frequência de secas em várias regiões pelo mundo e os eventos extremos ocorrendo de forma mais intensa e frequentes aumentam a preocupação em se entender como os parâmetros climáticos se comportarão diante de um novo cenário no clima. Desta forma, no presente trabalho foram aplicados dois quatro modelos climáticos globais (HadGEM2-ES e MIROC5) associados ao modelo climático regional Eta. Foram levados em consideração os cenários do IPCC RCP4.5 e RCP8.5 a fim de projetar dados de precipitação para a região Nordeste do Brasil para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de referência de 1961-1990. Os resultados mostraram que, apesar de apresentarem uma variabilidade na precipitação, no geral, as projeções apontaram que a região Nordeste do Brasil poderá sofrer com a redução das chuvas e com isso tornar mais crítico o cenário de seca em algumas regiões e impactar de forma negativa a produção agrícola, o abastecimento hídrico e a produção energética.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, IPCC, RCP4.5, RCP8.5, ciclo hidrológico.

Abstract

The variability in precipitation, the increase in the frequency of droughts in various regions around the world and the extreme events occurring in a more intense and frequent way increase the concern to understand how the climatic parameters will behave in the face of anew scenario in the climate. Thus, in the present work, four global climate models were applied (HadGEM2-ES and MIROC5) associated with the Eta regional climate model taking into account the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 in order to project precipitation data for the Northeast region of Brazil for the future periods of 2041-2069 and 2070-2099 compared to the reference period of 1961-1990. The results showed that, although some a variability in precipitation, in general, the projections pointed out that the Northeast region of Brazil may suffer from the reduction of rainfall and thus make the drought scenario more critical in some regions and impact on negatively affect agricultural production, water supply and energy production.

Keyword: Climate change, IPCC, RCP4.5, RCP8.5, hydrological cycle.

1. Introdução

O Nordeste do Brasil corresponde a aproximadamente 18% do território nacional (LIMA *et al.*, 2019). A região caracteriza-se por apresentar o clima tropical, todavia, o clima semiárido também alcança todos os estados, com exceção do Maranhão (ALVARES *et al.*, 2013).

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2019 relatou o aumento da frequência de secas em muitas regiões pelo mundo incluindo a Amazônia e o Nordeste do Brasil (JIA *et al.*, 2019).

As mudanças no clima e o aumento dos eventos climáticos extremos evidenciam a necessidade de compreender as condições climáticas futuras. Sendo assim, foram

desenvolvidos os modelos climáticos, os quais consideram uma série de parâmetros e com isso são capazes de projetar dados climáticos futuros (QUEIROZ *et al.*, 2016). O primeiro modelo de circulação geral foi desenvolvido no final da década de 1960 em Princeton, Estados Unidos, no Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísicos da NOAA (NOAA, 2017). Com o passar do tempo a evolução computacional permitiu que os modelos fossem melhorados com aumento na resolução e acréscimo de componentes e de processos (MARENGO *et al.*, 2009).

Associados aos modelos climáticos são utilizados os cenários RCP (Caminhos Representativos de Concentração), os mesmos aplicados nos relatórios do IPCC. Os cenários levam em consideração as emissões e a concentração de gases de efeito estufa, se medidas para mitigação serão aplicadas, o forçamento radioativo, entre outros aspectos (THOMSON *et al.*, 2011; RIAHI *et al.*, 2011).

Entre alguns estudos realizados, foram previstos aumentos das chuvas na costa norte do Peru e Equador e no sudeste da América do Sul em geral. No entanto, o mesmo estudo estima que o leste da Amazônia e a região Nordeste sofrerão com a redução nos índices pluviométricos (MARENGO *et al.*, 2012). Além disso, Marengo *et al.* (2009) projetaram tendência negativa para a precipitação e aumento de dias secos e consecutivos para o leste da Amazônia e Nordeste do Brasil. Dessa forma, o aumento da temperatura e a redução das chuvas podem gerar condições mais quentes e secas e, com isto, aumentar o cenário de aridez na região Nordeste (MARENGO;BERNASCONI, 2015).

O presente trabalho teve por objetivo projetar as condições de precipitação para a região Nordeste do Brasil empregando dois modelos climáticos globais associados ao modelo climático regional Eta. Junto aos modelos utilizou-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparando-os com o período de 1961-1990.

2. Metodologia

2.1. Caracterização da área

A região Nordeste do Brasil está localizada no extremo leste da América do Sul e é banhada pelo Oceano Atlântico (COSTA *et al.*, 2020). A região possui área de 1.552.167,01 km² e população estimada em 57.374.243 pessoas em 2020 (IBGE, 2019; IBGE, 2020) (Figura 1).

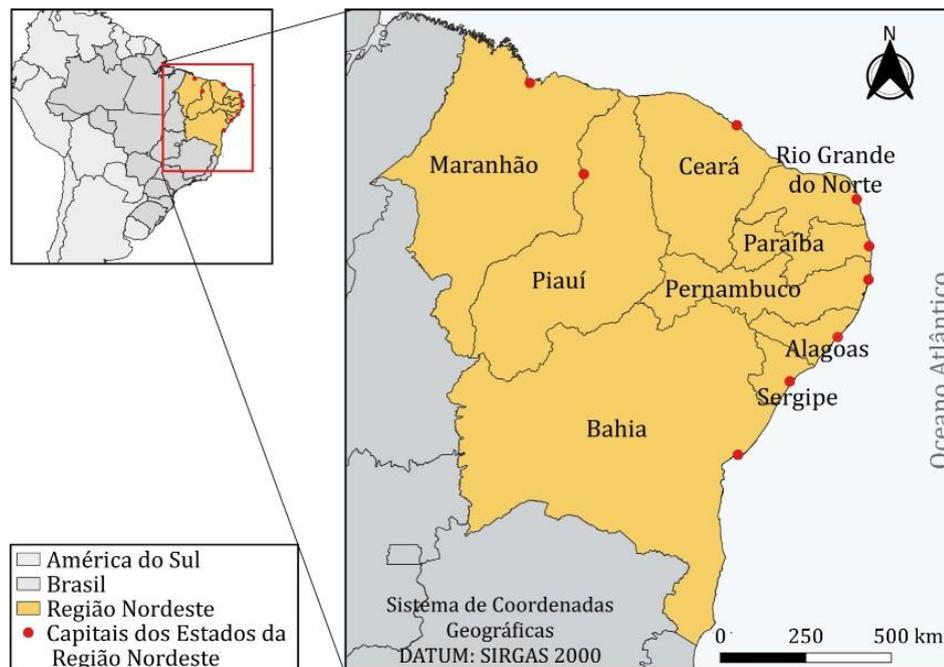


Figura 1: Mapa de localização da Região Nordeste do Brasil. Fonte: IBGE (2017).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima semiárido pode ser encontrado em todos os estados do Nordeste, com exceção do Maranhão (ALVARES *et al.*, 2013). Além disso, caracteriza-se por ser uma região com acentuada variabilidade na precipitação anual e temperaturas elevadas com valores médios que variam entre 20°C e 28°C (LIMA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020).

2.2. Dados das projeções climáticas

Os dados dos elementos foram derivados de projeções provenientes de dois modelos climáticos globais associados a um modelo climático regional obtidos através 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 britânico *Hadley Centre Global Environment Model* versão 2 - *Earth System* - HadGEM2-ES e o japonês *Model for Interdisciplinary Research On Climate* - MIROC5 (MOHAN; BHASKARAN, 2019).

O HadGEM2-ES traz melhorias do modelo HadGEM1. A família HadGEM inclui componentes atmosféricos, oceânicos e de gelo marinho. Além disso, o componente do sistema terrestre engloba o ciclo do carbono terrestre e oceânico e a química atmosférica. Entre outros aspectos, o modelo HadGEM2-ES simula a cobertura vegetal, a respiração do solo e o armazenamento de carbono (MARTIN *et al.*, 2011).

O modelo MIROC5 foi desenvolvido pela Universidade de Tóquio em conjunto com o Centro de Pesquisa do Sistema Climático (CCSR), o Instituto Nacional de Estudos Ambientais (NIES) e a Agência Japonesa para Ciência e Tecnologia Marinho-Terrestre. Possui um modelo oceânico e também um componente de gelo marinho, além dos componentes atmosféricos e terrestres (WATANABE *et al.*, 2010).

Por fim, o modelo regional Eta foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado junto ao Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e operacionalizado no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (RUFFATO-FERREIRA *et al.*, 2017). Os processos da

superfície terrestre são retratados pelo modelo de superfície da terra Noah (EK *et al.*, 2003), e a radiação de ondas curtas e ondas longas é representada por Lacis e Hansen (1974) e Fels e Schwarzkopf (1975), respectivamente. Por sua vez, a microfísica das nuvens é baseada no esquema de Zhao *et al.* (1997).

Foram considerados dois cenários climáticos futuros do IPCC, o RCP4.5 e o RCP8.5. Neste estudo empregou-se o RCP4.5 como um cenário mais otimista, esse cenário considera a estabilização da forçante radioativa em $4,5 \text{ W/m}^2$ resultante de ações políticas para limitar a emissão dos gases de efeito estufa, entre outras escolhas futuras (THOMSON *et al.*, 2011). O RCP8.5, considerado o cenário mais pessimista, caracteriza-se por altas emissões, concentração crescente dos gases de efeito estufa e poucas iniciativas para mitigar os impactos climáticos. Sendo assim, a forçante radioativa chegaria a $8,5 \text{ W/m}^2$ até o final do século XXI (RIAHI *et al.*, 2011).

Para realizar as projeções climáticas foi considerado o período de referência (1961-1990), por ser uma normal climatológica de referência, e os períodos futuros (2041-2069 e 2070-2099) em 3237 pontos, os quais estão a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro, ao longo de toda a região Nordeste do Brasil.

3. Resultados e discussão

3.1. Precipitação

Na Figura 2 é possível observar o comportamento da precipitação para toda a região Nordeste a partir das projeções realizadas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 associados ao modelo regional Eta.

As projeções evidenciaram a possível redução da precipitação na maior parte do Nordeste do Brasil. Todavia, é possível observar que pode haver um aumento da precipitação em algumas localidades, sendo mais expressivo sob o RCP4.5 sobretudo em 2041-2069 no modelo Eta-HadGEM2-ES e em 2070-2099 no modelo Eta-MIROC5 (Figura 2).

Percebe-se que apesar dos modelos aplicados projetarem aumento da precipitação para algumas áreas do Nordeste há algumas diferenças a serem observadas. No caso do modelo Eta-HadGEM2-ES sob o RCP4.5 esse aumento ocorre em parte da região Nordeste predominantemente em 2041-2069. Por sua vez, no modelo Eta-MIROC5 em 2041-2069, sob o RCP4.5, o aumento da precipitação atinge parte da costa que se estende do estado do Maranhão ao Rio Grande do Norte adentrando ao continente. Sob o RCP8.5, no Eta-MIROC5, também se percebe que poderá haver aumento da precipitação em uma pequena área nos estados localizados ao Norte da região Nordeste (Figura 2).

Apesar das projeções pontuais de aumento em alguns cenários, no geral, a região Nordeste do Brasil sofrerá com a redução na precipitação. Essas reduções são bastante acentuadas sob o RCP8.5 sobretudo para o final do século XXI (Figura 2). A partir de um conjunto de modelos climáticos, Marengo *et al.* (2017) indicaram que a maioria dos modelos aplicados projetaram aumento da precipitação no verão, mas diminuição no outono, inverno e primavera na região Nordeste.

Projeções para a precipitação em áreas no Nordeste do Brasil também foram realizadas por Bronstert *et al.* (2005), Marengo *et al.* (2009), Gondim *et al.* (2012), Marengo *et al.* (2012), Chou *et al.* (2014b), Marengo e Bernasconi (2015), Carvalho *et al.* (2015), Silva e Haas (2016), Marengo, Torres e Alves (2017) e Bender e Sentelhas (2018).

Para a Bacia do rio Jaguaribe, localizada em uma região semiárida do estado do Ceará, Gondim *et al.* (2012) identificaram uma redução de 10,7% e 18,2% das chuvas nos cenários A2 e B2 respectivamente, para o período 2025-2050. Neste trabalho as reduções mais acentuadas da precipitação para o estado do Ceará ocorreram no cenário mais pessimista para o final do

século XXI, sendo de 32,1% no modelo Eta-HadGEM2-ES e de 16,7% no modelo Eta-MIROC5. Por sua vez, para uma área do semiárido nordestino que compreende os estados do Ceará e do Piauí, a redução de 50% da precipitação foi projetada pelo modelo ECHAM-4 (BRONSTERT *et al.*, 2005). No entanto, um resultado bastante divergente foi observado ao se utilizar o modelo HADCM-2, no qual o resultado encontrado é de um aumento de 21% na precipitação, ambos para 2070-2099 (BRONSTERT *et al.*, 2005).

No caso de Bender e Sentelhas (2018) as projeções da precipitação em áreas dos estados do Maranhão, Piauí e Bahia sugeriram uma redução ocorrendo de forma mais intensa de agosto a outubro. Para o Eta-HadGEM2-ES as médias de redução são de 35,3%, 36,4% e 48,8% e no Eta-MIROC5 são de 18,8%, 20,3% e 30,1% para os estados do Maranhão, Piauí e Bahia respectivamente. Apesar de que alguns estudos, como o do Bronstert *et al.* (2005) evidenciaram o aumento da precipitação em 21% no modelo HadCM-2, todavia, os autores projetaram a redução das chuvas em 50% a partir do modelo ECHAM-4 no Nordeste em 2070-2099.

A partir do modelo HadCM3, Marengo *et al.* (2012) indicaram uma diminuição de 40% das chuvas na Amazônia e no Nordeste intensificando-se após 2040. Por sua vez, também utilizando o HadCM3, neste caso associado ao Eta, Marengo e Bernasconi (2015) sugeriram que a redução da precipitação poderá ser de cerca de 22% no Nordeste. Já Marengo *et al.* (2009) observaram uma tendência negativa para as chuvas ao leste da Amazônia e no Nordeste do Brasil. Por fim, as análises realizadas por Silva e Haas (2016) apontaram uma queda na precipitação para o Nordeste do Brasil.

No presente trabalho a média da redução da precipitação considerando todo o Nordeste do Brasil é maior no cenário mais pessimista em 2070-2099 para os modelos Eta-MIROC5 (-23,3%) e Eta-HadGEM2-ES (-40,8%).

Os resultados projetados por Chou *et al.* (2014b) indicaram que no norte do Nordeste do Brasil as mudanças futuras na precipitação serão positivas, isso apenas não foi observado no cenário RCP8.5 no modelo Eta-HadGEM. No presente estudo, observou-se aumento da precipitação para a parte norte da região Nordeste do Brasil no modelo Eta-MIROC5 em ambos os cenários aplicados e no modelo Eta-HadGEM2 sob o RCP4.5 sobretudo em 2041-2069.

As projeções para os municípios de Itambé e Goiana, no estado de Pernambuco, evidenciaram redução acima de 20% em ambas as cidades sob o cenário RCP4.5, no modelo Eta-HadGEM2-ES e sob o RCP8.5, no Eta-MIROC5 em 2070-2099. Os estudos de Carvalho *et al.* (2015), a partir do modelo Eta, indicaram redução entre 40% e 44% (cenário de baixas emissões) e entre 38% e 48% (cenário de altas emissões) até o final do século XXI nos dois municípios. Nos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 as projeções de redução em Itambé e Goiana, em Pernambuco, foram acima de -20% nos dois municípios no cenário RCP4.5 para o modelo Eta-HadGEM2-ES e no RCP8.5 no Eta-MIROC5 para 2070-2099. Por fim, os resultados do modelo Eta-BESM indicaram aumento extremo de chuva em Itambé e Goiana.

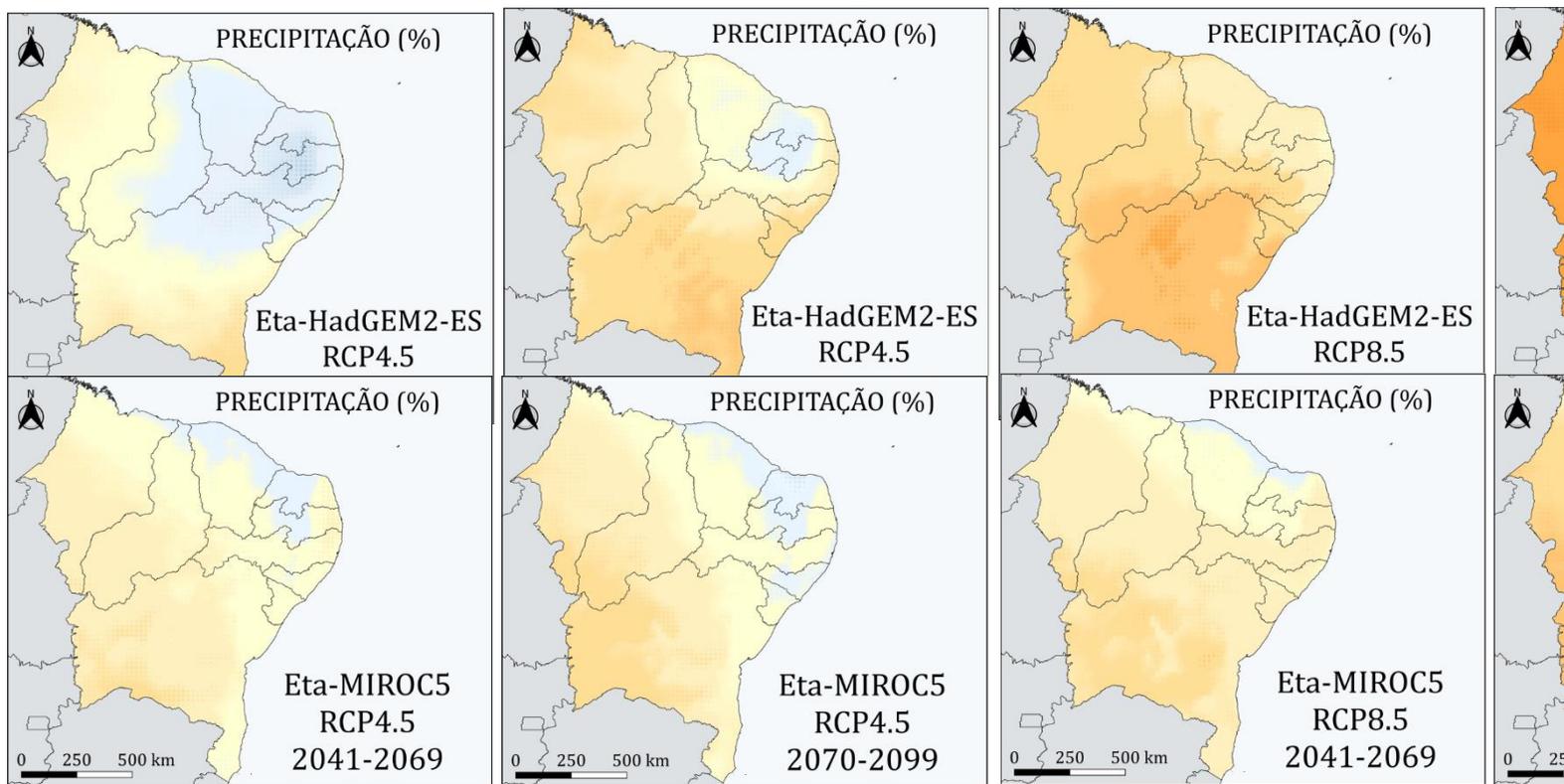


Figura 2: Alterações percentuais projetadas para precipitação anual nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos 2041-2069 e 2070-2099 para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 na região Nordeste do Brasil.

3.2. Possíveis consequências das mudanças projetadas pelos modelos

O Nordeste do Brasil há séculos enfrenta o problema da disponibilidade de água e as mudanças climáticas poderão agravar essa situação. As mudanças na precipitação projetadas neste trabalho evidenciaram predominantemente a redução das chuvas em praticamente toda a região Nordeste.

Caso as projeções de redução se concretizem, a diminuição da precipitação poderá gerar impactos enormes no abastecimento hídrico, na produção energética e tornar o clima de algumas áreas mais árido. Segundo Marengo e Bernasconi (2015) a diminuição das chuvas associada ao aumento na evaporação e temperatura do ar contribuirá para a aridez na região Nordeste. Além disso, Marengo *et al.* (2017) afirmaram que, apesar da diminuição na tendência de precipitação, existe a disposição de episódios de chuvas pontuais e mais intensas que acontecerão entre os períodos secos. No entanto, a falta de chuva por um tempo mais longo poderá causar secas sazonais.

Segundo Bronstert *et al.* (2005), a partir do modelo ECHAM, as mudanças na precipitação poderão causar a redução do escoamento para a foz do rio Jaguaribe (Ceará) de 2025 até 2050. Para o estado do Ceará como um todo, os autores evidenciaram que após 2025 poderá ocorrer uma diminuição no volume de água armazenado nos reservatórios.

Em seu estudo realizado para os municípios do estado da Paraíba para o período de 1990 a 2015, Silva *et al.* (2019) explicaram que a precipitação é um fator que age de forma significativamente positiva na produção de cana-de-açúcar. Observa-se que no presente trabalho os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 projetaram redução da precipitação para o estado da Paraíba, ou seja, isso poderá afetar a produção de cana-de-açúcar no estado. O mesmo poderá acontecer nos outros estados do Nordeste onde a cana-de-açúcar é produzida.

Em um polígono de seca que alcança os estados do Ceará e Piauí, Krol e Bronstert (2007) destacaram que o semiárido nordestino sofrerá impactos devido às mudanças climáticas, onde o armazenamento de água e a produção agrícola irrigada serão afetadas. Resultado semelhante foi observado por Bronstert *et al.* (2005), que afirmaram que a redução nas chuvas poderá impactar na agricultura. Quando os autores utilizaram o modelo ECHAM-4 observou-se tendência de redução de 24% na precipitação com diminuição de 12-55% nos rendimentos agrícolas.

Tendo em vista os resultados observados no presente trabalho e nos citados anteriormente, a queda na precipitação poderá gerar impactos futuros na agricultura para a maior parte do Nordeste do Brasil e de forma mais acentuada no cenário RCP8.5, sobretudo em 2070-2099, quando a redução das chuvas ocorrerá de forma mais intensa.

De acordo com Lucena *et al.* (2009), a geração de energia hidrelétrica sofrerá impactos devido à diminuição da vazão dos rios. Segundo os autores, das bacias estudadas no Brasil, a Bacia do Rio São Francisco, tão importante para o Nordeste brasileiro, será a mais afetada com uma queda superior a 7% na produção de eletricidade. Esse resultado é consistente com o observado por Ruffato-Ferreira *et al.* (2017), os quais preveem uma tendência futura crescente na escassez de água em quase todo o território brasileiro, sendo a Bacia do Rio São Francisco a mais vulnerável.

A disponibilidade de água na região Nordeste poderá diminuir consideravelmente, e com isso, afetar a produção da energia hidrelétrica de forma negativa. Lucena *et al.* (2010) indicaram que este cenário é mais desfavorável para as bacias do Paraíba, do Atlântico Leste e do São Francisco. Nos estados nordestinos que são alcançados pela bacia do Paraíba (Piauí, Maranhão e Ceará), bacia do Atlântico Leste (Sergipe e Bahia) e bacia do Rio São Francisco (Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia), as projeções evidenciaram redução da precipitação.

4. Conclusão

O presente estudo teve por objetivo projetar as condições de precipitação para 2041-2069 e 2070-2099 a partir de quatro modelos climáticos globais associados a um modelo regional utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Apesar da diferença na precipitação apresentada entre os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, as projeções demonstraram uma redução para a maior parte do Nordeste do Brasil. Ainda assim, houve projeções de aumento da precipitação para algumas áreas pontuais na região.

A região Nordeste do Brasil é conhecida por ser uma área que enfrenta enormes problemas de escassez de água, principalmente na parte do semiárido. Assim, os resultados predominantes a respeito da redução da precipitação poderão gerar um cenário mais crítico. A mudança no comportamento da precipitação diante das alterações no clima evidenciará a vulnerabilidade na produção agrícola, abastecimento e setor energético. Esses fatores deixam claro a necessidade de um planejamento gerencial e reflexões de toda a comunidade científica, gestores e população com foco nas adaptações às mudanças climáticas para que a região Nordeste seja capaz de ser resiliente diante das mudanças.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (projeto 308753/2021-6 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00), à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) (projeto do edital nº 09/2021 Demanda Universal) e à Universidade Federal da Paraíba (projeto PVK13163-2020).

Referências

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.

BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Solar radiation models and gridded databases to fill gaps in weather series and to project climate change in Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2018, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6204382>.

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.

BRONSTERT, A.; GUNTNER, A.; ARAUJO, J. C. DE.; JAEGER, A. Possible climate change impacts on water resources availability in a large semiarid catchment in Northeast Brazil. **IAHS-AISH Publication**, n. 295, p. 221–230, 2005.

CARVALHO, A. L. DE.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A. DE. S.; OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. V.; GIAROLLA, A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26–34, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.023>.

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#>. Acesso em: 27/08/2020.

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#>. Acesso em: 27/08/2020.

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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>.

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.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H DE.; MAIA, A DE. H. N.; EVANGELISTA, S. R.M.; FUCK, S DE. F. Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 355–365, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00620.x>.

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?view=municipio>. Acesso em: 22/06/2020.

JIA, G., SHEVLIAKOVA, E.; ARTAXO, P.; NOBLET-DUCOUDRÉ, N De.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP A.; SIRIN, A.; SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. 2019: Land-climate interactions. In: *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.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

KROL, M. S.; BRONSTERT, A. Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 2, p. 259–268, 2007.

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.

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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.08.006>.

LUCENA, A. F. P DE.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R DE. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 879–889, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.029>.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, p. 342–350, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.004>.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, 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.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. March 2008, p. 2241–2255, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1002/joc.1863>.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, L. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9–10, p. 1829–1848, 2012. Doi:10.1007/s00382-011-1155-5.

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. Doi:10.1007/s10584-014-1310-1.

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. Doi: 10.1007/s00704-016-1840-8.

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.

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. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04874-2>.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 22/06/2020.

RIAHI, 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. Doi: [10.1007/s10584-011-0149-y](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y).

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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.020>.

SILVA, R. R. DA; HAAS, R. Ocean global warming impacts on the South America climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 4, n. March, p. 1–8, 2016. Doi: <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00030>.

SILVA, W. K. DE M.; FREITAS, G. P DE.; COELHO JUNIOR, L. M.; PINTO, P. A. L DE. A.; ABRAHÃO, R. Effects of climate change on sugarcane production in the state of Paraíba (Brazil): a panel data approach (1990–2015). **Climatic Change**, v. 154, n. 1–2, p. 195–209, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02424-7>.

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. Doi: [10.1007/s10584-011-0151-4](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4).

WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; EMORI, S.; TAKEMURA, T.; CHIKIRA, M.; OGURA, T.; SEKIGUCHI, M.; TAKATA, K.; YAMAZAKI, D.; YOKOHATA, T.; NOZAWA, T.; HASUMI, H.; TATEBE, H.; KIMOTO, M. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>.

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. Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0697:IOTCPS>2.0.CO;2).