

Global Climate Models: A Review

Luciana Mayla de Aquino França^{*}, Josicléda Domiciano Galvêncio^{**}, Eduardo Mario Mendiondo^{***}.

^{*}Geógrafa, Dra. Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, email: lucianamayla@gmail.com

^{**} Prof. Dra, Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, email: josicleda@ufpe.br

^{***}Prof. Dr. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP, email: e.mario.mendiondo@gmail.com

Received 10 November; accepted 04 December.

Abstract

Global Climate Models are excellent tools for studying the future. Through them we can analyze and interpret different scenarios and try to understand how the environment we live in will be until the end of the century. Because of this, the IPCC, over the last few decades, has planned and developed, in partnership with several research agencies around the world, several global climate models with the objective of studying our atmosphere and designing scenarios that help to identify the difficulties we will face in the future. Knowing the purpose and function of these models is of great importance for climate studies. With this objective, some global climate models were chosen to be carried out a review in this research. The study models were chosen because their data were available on the SUPER platform in the project for the São Francisco river basin in partnership with UFPE, APAC and several countries and research institutions. The analysis showed that all the models used have a distinct function and that the analysis together can help to better understand the socio-environmental dynamics of the watershed.

Keywords: Climate Changes, General Circulation of Atmosphere, Concentration of pollutants, Literature Review.

Modelos Climáticos Globais: Uma revisão

Resumo

Modelos Climáticos Globais são excelentes ferramentas para o estudo do futuro. Através deles podemos analisar e interpretar diversos cenários e tentar compreender como estará o ambiente em que vivemos até o final do Século. Devido a isso, o IPCC, ao longo das últimas décadas, planejou e desenvolveu em parceria com diversas agências de pesquisas pelo mundo, vários modelos climáticos globais com o objetivo de estudar nossa atmosfera e projetar cenários que ajudem a identificar as dificuldades que enfrentaremos no futuro. Saber para que serve e qual a função desses modelos é de grande importância para estudos climáticos. Com esse objetivo, foram escolhidos alguns modelos climáticos globais para ser realizada uma revisão nesta pesquisa. Os modelos do estudo foram escolhidos por terem seus dados disponibilizados na plataforma SUPER no projeto para a bacia hidrográfica do rio São Francisco em parceria com a UFPE, APAC e diversos países e instituições de pesquisas. A análise mostrou que todos os modelos utilizados têm uma função distinta e que a análise em conjunto pode auxiliar a compreender melhor a dinâmica socioambiental da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Circulação Geral da Atmosfera, Concentração de poluentes, Revisão Bibliográfica.

1. Introdução

Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) vem sendo cada vez mais utilizados em estudos científicos devido a sua capacidade de ser aplicado em pequenas e grandes escalas, a depender da sua adaptação. Dessa forma, se tornam uma ferramenta importante nas projeções das consequências que enfrentaremos devido às mudanças climáticas. Eles possuem diversas resoluções espaciais a depender da sua finalidade. Em escala mundial, os Modelos Globais de Circulação Climática representam de forma satisfatória o comportamento médio de

variáveis climáticas, no entanto, estudos têm demonstrado deficiências na representação dos processos ao considerar regiões menores, uma vez que a resolução espacial de avaliação é da ordem de 200 km (Watanabe et al., 2012).

Schliep et al. (2010) comentam sobre a abrangência de modelos climáticos existentes, que podem ser utilizados em propósitos diferentes. Por exemplo, modelos climáticos globais são de circulação global da atmosfera-oceano, geralmente uma combinação de um modelo atmosférico e um do oceano, e eles simulam o clima em todo o globo terrestre.

O IPCC é um órgão que se destaca internacionalmente na elaboração de MCGs. O IPCC foi consolidado em 1988 pelo United Nations Environment Programme (UNEP) e pela World Meteorological Organization (WMO), sendo considerado o principal órgão científico responsável pelas avaliações das mudanças climáticas e seus impactos ambientais e socioeconômicos (IPCC, 2007). Os últimos relatórios do IPCC abordam como a humanidade influencia na dinâmica das mudanças climáticas, principalmente condicionada pelo aumento da concentração do gás carbônico na atmosfera proveniente das diversas atividades antrópicas. Como resultado destes relatórios, temos por exemplos, os modelos CMIP5 e o CMIP6, que possuem quatro cenários de projeção que descrevem quatro diferentes trajetórias de emissões e concentrações de fases do efeito estufa, emissões de poluentes atmosféricos e uso da terra a depender de qual MCG está sendo utilizado. Os RCPs (Representative Concentration Pathways), como são chamados os cenários, incluem o RCP 2.6, projeção mais otimista, onde mitigações seriam mais rigorosas; o RCP 4.5 e 6.0, projeções intermediárias, e o RCP 8.5, projeção mais pessimista, um cenário onde houve pouco esforço para restringir as emissões dos GGE (IPCC, 2014).

No entanto, os MCGs possuem resolução espacial grosseira para avaliações de impacto e, para escalas regionais, as projeções dos MCGs são refinadas por Modelos Climáticos Regionais (RCMs) (Giorgi, 1990; Maraun et al., 2017). Segundo Ramos (2010), a academia científica já reconhece que os MCGs fornecem boas projeções em escala de tempo mensal e anual, especialmente para variáveis como a precipitação. Entretanto, esses dados se referem a contornos de clima global (baixa resolução) não considerando características de nível local como relevo, desmatamento, atividades agrícolas, uso indevido da terra, expansão da área urbana, entre outras. Para realizar adequações, podem ser utilizados dados do Regional Climate Models (RCMs) integrados pelo Projeto Cordex (Coordinated Regional Climate Downscaling Experimente). Trata-se de uma iniciativa do WCRP (World Climate Research Programme) que fornece informação climática de alta resolução obtida por downscaling dinâmico ou estatístico de modelos globais (Benestad, 2016; Silva et al., 2020).

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu produtos de downscaling com o RCM Eta, sob os cenários RCP 4.5 e 8.5 dos MCGs HadGEM2-ES e MIROC5, em apoio a estudos estratégicos de mudanças no clima e ao Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas. Com isso, o objetivo deste estudo é analisar a bibliografia já existente sobre modelos

climáticos globais para compreender qual a função de cada um deles e como podem ser utilizados em pesquisas científicas.

2. Material e métodos

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica em revistas indexadas em plataformas como o Google Scholar, Scielo, Web of Science e Scopus através da utilização de palavras-chave para encontrar pesquisas que utilizassem os modelos que são o foco de estudo. Foram escolhidos os modelos HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2, IPSL-CM5A-MR, CSIRO, EC-EARTH, GFDL-ESM2, NORESM1, SHMI-ESM devido a disponibilidade de dados na plataforma SUPER (Sistema de Unidade de Resposta Hidrológica para Pernambuco) referentes ao projeto BRICS para a bacia hidrográfica do rio São Francisco.

3. Resultados e discussão

O que são rcps?

Segundo Moura (2017), quatro diferentes cenários de projeções foram gerados a partir do 5º Relatório das Mudanças Climáticas (IPCC, 2013) para representar as consequências climáticas até o final do século XXI, denominados de Caminhos de Concentração Representante (RCPs), relacionados às concentrações equivalentes de CO₂ na atmosfera. Cada RCP fornece apenas um dos muitos cenários possíveis que levariam às características de forçamento radiativo específico. O conceito de caminho enfatiza que não só os níveis de concentração de longo prazo são de interesse, mas também a trajetória tomada ao longo do tempo para alcançar esse resultado (Moss et al., 2010).

Moura et al. (2017), ainda diz que os RCPs incluem um cenário de mitigação rigoroso (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário com emissões de GEE muito altas (RCP 8.5). Cenários sem esforços adicionais para ("Cenários de linha de base") conduzem a caminhos que variam entre RCP 6.0 e RCP 8.5. O RCP 2.6 é representativo de um cenário que visa manter o aquecimento global abaixo de 2° C acima das temperaturas pré-industriais (IPCC, 2013). De acordo com alguns cientistas, o cenário RCP2.6 já está obsoleto, visto que já ultrapassamos o limite de emissões que ele aborda. Observando a figura 1, vemos que cada cenário possui forçante radioativa, concentração de poluentes, caminho e modelos completamente diferentes.

Cenário	Forçante radiativa	Concentração (ppm)	Caminho	Modelo
RCP 8.5	> 8.5Wm ⁻² em 2100	> 1,370 CO ₂ -equiv. em 2100	Aumento	MESSAGE
RCP 6.0	~ 6Wm ⁻² com estabilização após 2100	~ 850 CO ₂ -equiv. (com estabilização após 2100)	Estabilização sem superação	AIM
RCP 4.5	~ 4.5Wm ⁻² com estabilização após 2100	~ 650 CO ₂ -equiv. (com estabilização após 2100)	Estabilização sem superação	GCAM
RCP 2.6	Pico de ~3Wm ⁻² antes de 2100 e depois declínio	Pico de ~ 490 CO ₂ -equiv. antes de 2100 e depois declínio	Pico e declínio	IMAGE

Fonte: MOSS et al., 2010.

Figura 1. Informações adicionais para os RCPs do IPCC. Fonte: Moura (2017).

Abaixo serão abordados nove modelos climáticos globais com o resumo de seu estado da arte.

3.1 HadGEM2-ES

O modelo HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model 2 – Earth System), faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5, que tem como base o quinto relatório de dados do IPCC. Foi desenvolvido pelo Hadley Centre for Climate Prediction and Research do Reino Unido e possui três cenários: RCP 2.6, 4.5 e 8.5. Neste modelo, a configuração básica de acoplamento atmosfera-oceano, equivale aos processos do ciclo de carbono e à química da troposfera (Martin et al., 2011).

Brito et al. (2021) diz que a componente atmosférica do modelo possui resolução espacial de aproximadamente 1,875° por 1,25°, em longitude e latitude, respectivamente, e apresenta 38 níveis na vertical. A componente oceânica utiliza grade horizontal de 0,33° × 0,33°, com espaçamento de 1°, entre os polos e 30°, a grade é refinada gradualmente para 1/3 e 1° × 1° em latitudes acima de 30° e possui 40 níveis na vertical (Collins et al., 2011). Sobre o continente, o ciclo do carbono é modelado pela dinâmica de vegetação TRIFFID (Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics), descrita em Cox (2001). No oceano, o ciclo do carbono é dado pela biologia do oceano diat-HadOCC (Palmer e Totterdell, 2001). A química da atmosfera é modelada pelo esquema de química troposférica de UKCA (O'Connor et al., 2013). O modelo inclui processos químicos da atmosfera como carbono orgânico de combustível fóssil, nitrato de amônia, poeira e aerossóis biogênicos orgânicos (Martin et al., 2011). O HadGEM2-ES também diferencia cinco tipos de plantas, sendo elas: árvores de folhas largas e finas, gramas do tipo C3 e C4 e arbustos. Descrições mais detalhadas sobre o modelo HadGEM2-ES podem ser obtidas em Martin et al. (2011).

Porém, devido a sua grade horizontal ser grande, alguns locais pensaram que seria mais proveitoso adaptar esses dados para que ele seja utilizado em escala regional. De acordo com Cruz et al. (2017), diversos autores apresentaram tentativas

de aplicação de modelos regionais de previsão climática sobre a América do Sul (Chou; Nunes; Cavalcanti, 2000; Nobre; Moura; Sun, 2001; Chou et al., 2012; Fernandez; Franchito; Rao, 2006), com resultados que apontaram para a importância da aplicação do downscaling dinâmico visando melhorar a qualidade da previsão de precipitação de modelos globais utilizados como forçante lateral.

Para a América do Sul, o HadGEM2-ES foi adaptado para o modelo ETA. De acordo com Brito et al. (2019), o ETA é um modelo atmosférico regional desenvolvido pela Universidade de Belgrado e aprimorado ao longo dos anos por pesquisadores do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) (Chou et al., 2005; 2012; Mesinger et al., 2012). A maior resolução espacial dos modelos de área limitada permite simular com maiores detalhes sistemas organizados em mesoescala. A grade do modelo é regular com 0,2° × 0,2° de latitude-longitude para a América do Sul, com 38 níveis na vertical. O ETA é um modelo em ponto de grade baseado na coordenada vertical (η) (Mesinger, 1984), sensível a áreas de montanha, o que torna a coordenada adequada para estudos em regiões de topografia íngreme como a Cordilheira dos Andes na América do Sul. As parametrizações incluídas no modelo são: esquema de difusão turbulenta na Camada Limite Planetária, descrito em Mellor e Yamada (1974); esquema de radiação de ondas curta e longa segundo Fels e Schwarzkopf (1975) e Lacis e Hansen (1974), respectivamente. A precipitação no modelo é produzida pelos esquemas de cúmulos, proposto por Betts-Miller (Betts e Miller, 1986) e microfísica de nuvem, descrito em Zhao et al. (1997). Os processos de superfície são parametrizados de acordo com o esquema NOAH (Ek et al., 2003), que contém 4 camadas de solo (da superfície à camada mais profunda, os níveis são: 10, 30, 60 e 100 cm) para a temperatura e umidade, distingue 12 tipos de vegetação e 7 tipos de textura de solo. O mapa de vegetação inclui as alterações decorrentes da acentuada ação antropogênica que vem ocorrendo no bioma amazônico nos últimos anos (Sestini et al. 2002). O modelo é adaptado para utilizar a temperatura da superfície do mar (TSM) derivada do modelo HadGEM2-ES. A integração no tempo utiliza a técnica split-explicit (Gadd, 1978), onde os termos devido ao ajuste pelas ondas de gravidade inerciais são integrados separadamente dos termos de advecção (Brito et al., 2019).

O Eta/HadGEM2-ES subestima a precipitação média mensal na estação chuvosa e superestima na estação seca. Por outro lado, o HadGEM2-ES superestima as médias para o período chuvoso e subestima as médias das estações secas. Para grandes áreas, como a Mata Atlântica, a

Amazônia, e o Cerrado, as médias das simulações do GCM estão mais próximas das observações do que as simulações do RCM. Nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, o Eta/HadGEM2-ES apresenta maior viés negativo durante a estação chuvosa, que chegam a quase -50%. Para os biomas Cerrado e Pantanal, com estações bem definidas, o Eta/HadGEM2-ES simulou a estação seca com dois meses a mais do que o observado, enquanto o MCG correspondente as simulou com precisão. Na Amazônia, com uma estação seca muito curta (três meses), ela não foi simulada por nenhum dos modelos. No bioma Pampa, onde não há estação seca definida, o modelo HadGEM2-ES foi capaz de simular essa característica, mas, ao mesmo tempo, produziu erros consideráveis em DJF (trimestre dezembro, janeiro e fevereiro) e SON (trimestre setembro, outubro e novembro). Na Caatinga, o modelo superestimou apenas um mês da estação chuvosa e subestimou o restante do regime de chuvas (Almagro; Oliveira, 2019).

Chou et al. (2014) desenvolveram e avaliaram os produtos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 na América do Sul, utilizando médias mensais e sazonais de precipitação contra um conjunto de dados com resolução grosseira do conjunto CRU TS 2.1. Em contrapartida, as simulações com o modelo Eta aninhado aos modelos do sistema terrestre MIROC5 e BESM, em geral, exibem tendências para condições mais secas sobre a maior parte da América do Sul, especialmente na parte norte do continente (Brito et al., 2019).

Cruz et al. (2017), utilizaram o modelo regional ETA/HadGEM2-ES para avaliar as precipitações do Estado de Sergipe e constataram uma baixa capacidade de representação das chuvas médias mensais pelo modelo regional, com subestimação dos volumes totais e baixos coeficientes de correlação. Eles reforçaram que tais resultados indicam uma possível propagação do erro proveniente do modelo global HadGEM2-ES para o ETA não apresentando nesta faixa do litoral brasileiro uma melhora significativa na representação dos sistemas climáticos atuantes.

3.2 MIROC5

O Modelo MIROC 5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate), faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5, que tem como base o quinto relatório de dados do IPCC. Foi desenvolvido através de uma parceria entre diversas instituições de pesquisas japonesas como o Atmosphere and Ocean Research Institute (Universidade de Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for marine -Earth Science and Technology e possui três cenários: RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

O MIROC é um modelo de circulação geral acoplado com resolução horizontal espectral T106, que é equivalente a aproximadamente à resolução de 1,125° de latitude/longitude, 56 níveis verticais em coordenadas, com grande resolução vertical na camada limite planetária e na tropopausa. Consiste de cinco modelos componentes: atmosfera, continente, rios, gelo do mar e oceano. A componente atmosférica interage com as componentes continente e gelo. As trocas entre o oceano e a atmosfera ocorrem exclusivamente entre a atmosfera e o gelo, e não entre a atmosfera e o oceano diretamente, sendo que a componente oceânica interage unicamente com o gelo, ou seja, o fluxo ar-mar em áreas sem cobertura de gelo passa para a componente oceânica sem modificação, mas passa primeiro pela componente de gelo marinho. Isto não implica que a componente oceano não force a atmosfera. A componente rio recebe o escoamento da água dos continentes e fornece água para a componente gelo do mar (Hasumi e Emori, 2004). As parametrizações da componente atmosférica compreendem convecção de cumulus (Arakawa e Schubert, 1974), condensação de grande escala (baseado no esquema de Le Treut e Li, 1991), transferência radiativa (Nakajima et al., 2000), fluxos de superfície, difusão vertical (Mellor e Yamada, 1982) e ondas de gravidade internas (McFarlane, 1987). Bombardi e Carvalho (2008), dizem que as saídas do modelo japonês acoplado MIROC3.2-hires (Model for Interdisciplinary Research On Climate; Hasumi e Emori, 2004) são examinadas para dois cenários distintos: o clima do século XX (1981-2000) e o clima numa condição com o dobro da concentração atual de CO₂ na atmosfera (2061-2080).

Assim como o modelo HadGEM2-ES, o MIROC5 foi adaptado para características regionais da América do Sul. De acordo com Almagro e Oliveira (2019), a precipitação média mensal simulada pelo Eta/MIROC5 é superestimada na estação chuvosa e subestimada na estação seca nos biomas Mata Atlântica e Caatinga, enquanto no Cerrado e no Pantanal, o padrão oposto é observado. Em relação ao MCG MIROC5, o downscaling melhorou as simulações de precipitação, mostrando um claro benefício na aplicação do modelo regional. As médias da Amazônia são subestimadas em todos os meses do ano, mas os valores estão mais próximos da média observacional do que os simulados pelo Eta/HadGEM2-ES. A pior simulação foi realizada para o bioma Pampa, onde os modelos não conseguiram representar a ausência de estação seca. Além disso, as simulações para este bioma têm o maior viés em relação as observações. Em geral, o Eta/MIROC5 pôde capturar as estações chuvosa e seca, exceto no bioma Pampa. Finalmente, o Eta/MIROC5 é geralmente “mais seco” do que o

MCG condutor na estação chuvosa e mais úmido na estação seca.

Bombardi e Carvalho (2008), aplicaram o MIROC para o cerrado brasileiro e mostraram que a variabilidade espacial do início da monção de verão sobre o cerrado na simulação do clima do século XX pelo MIROC corresponde bem aos dados observados. Além disso, há indicação de uma mudança das caudas da distribuição sazonal da precipitação no Cerrado para um cenário com 2xCO₂, comparativamente com o clima presente. Este resultado sugere uma mudança na probabilidade de ocorrência de eventos extremos (secos ou úmidos) em um cenário com 2xCO₂ sobre o cerrado, o que de acordo com o MIROC, indica uma maior exposição da região às consequências de possíveis mudanças climáticas resultantes do aumento de gases de efeito estufa. Eles ainda dizem que o MIROC foi examinado no trabalho porque é um dos modelos acoplados do IPCC que simula de modo realista a posição e intensidade da ZCAS (Vera et al., 2006). Além disso, a simulação do MIROC para o século XX apresenta precipitação média diária para o trimestre de dezembro a fevereiro de 9 mm sobre a região central do Brasil e sul da Amazônia. As características da variabilidade da precipitação simuladas pelo MIROC e indicadas pelo desvio padrão do trimestre Dezembro a fevereiro também são semelhantes ao observado com a climatologia do GPCP (Global Precipitation Climatology Project), com destaque sobre o máximo observado sobre o Atlântico em associação com a ZCAS (Carvalho; Jones; Liebmann, 2002).

Ferreira e Souza (2020) utilizaram o MIROC para avaliar os impactos das mudanças climáticas e demográficas sobre a disponibilidade hídrica per capita na bacia hidrográfica do rio Brígida e constataram que o MIROC sugere uma redução de até 17% no total pluviométrico da bacia.

Valverde e Marengo (2010), utilizaram diversos modelos climáticos globais para analisar as mudanças na circulação atmosférica da América do Sul e constataram que o MIROC tende a estender a chuva intensa para parte do Nordeste durante o verão, além disso, ele registrou mais anomalias do que os outros, em média +4mm/dia.

3.3 CanESM2

O Modelo CanESM2 (Canadian Earth System Model version 2), faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5, que tem como base o quinto relatório de dados do IPCC. Foi desenvolvido pelo Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis do Canadá e possui três cenários: RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

Esse modelo, em sua segunda versão, consiste no modelo físico atmosfera-oceano CanCM4, acoplado a um modelo de carbono terrestre

(CTEM) e um modelo de carbono oceânico (CMOC) (Governo do Canadá, 2018). Ainda segundo a página governamental, os componentes terrestres e oceânicos do ciclo do carbono no CanESM2 são operáveis para dois projetos experimentais: um modo baseado em emissões, onde a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) é um traçador 3D que evolui livremente no modelo e um modo baseado em concentrações, onde a concentração atmosférica de CO₂ é prescrita externamente. No modo baseado em emissões, as emissões antropogênicas de CO₂ são especificadas e, como os componentes interativos do ciclo do carbono terrestre e oceânico simulam os fluxos de CO₂ atmosfera-terra e atmosfera-oceano, respectivamente, o modelo é capaz de simular a evolução do CO atmosférico. Neste caso, o modelo simula o transporte de CO₂ na atmosfera produzindo estrutura 3D, ciclo anual e variabilidade interanual. No modo baseado em concentrações, os fluxos de CO₂ na atmosfera-terra e atmosfera-oceano permanecem determinados interativamente e, portanto, os resultados do modelo podem ser usados para diagnosticar as emissões antropogênicas de CO₂ que são compatíveis com um determinado CO atmosférico em escala global. Um único valor escalar da concentração atmosférica de CO₂, que pode evoluir no tempo, é imposto em todas as localizações geográficas e verticais do modelo no modo orientado à concentração (Governo do Canadá, 2018).

Silva et al. (2020) utilizaram vários modelos climáticos globais para e avaliaram seu desempenho. A condução pelo modelo global CanESM2, segundo o índice AVALs, se apresentou como melhor simulação para o período avaliado com um CORREL de 0,96 e RMSE_PC de 3,01%. Ficou evidenciado a relação direta da ordem de classificação com espaçamento das grades, ou seja, quanto maior a resolução do modelo mais bem posicionado na classificação.

Carvalho et al. (2022) utilizaram três MCG adaptados para a América do Sul e mostraram que o Eta-CanESM2 indicou maior aquecimento, principalmente para RCP8.5 no final do século, enquanto o Eta-HadGEM2-ES apresentou maior redução na precipitação para RCP4.5 no início do século e para RCP8.5 no final do século, impactando negativamente a evapotranspiração e descarga. Entre os Modelos Climáticos Regionais (MCR), o Eta-MIROC5 apresentou pequenas alterações nos componentes do ciclo hidrológico. Cardoso et al. (2022), também utilizou os três modelos anteriores e constatou que o CanESM2 foi o único que indicou redução da precipitação em todos os cenários.

Já Cou et al. (2017), utilizaram os mesmos modelos anteriores para analisar as possíveis

mudanças de precipitação na bacia hidrográfica do rio São Francisco e encontraram resultados que mostram que a precipitação média na bacia do Rio São Francisco apresentou redução em todos os cenários climáticos regionalizados, com maior evidência nas projeções do modelo Eta aninhado ao CanESM2, no cenário de emissão RCP8.5. Esta redução de precipitação das projeções é mais intensa na região do Alto e parte do médio São Francisco. As projeções também mostram redução no excedente hídrico no período futuro comparado com o período histórico.

3.4 IPSL-CM5A-MR

O modelo IPSL-CM5A-MR faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5, que tem como base o quinto relatório de dados do IPCC. Foi desenvolvido pelo Institut Pierre-Simon Laplace da França e possui três cenários: RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

De acordo com o site do modelo na página do Institut Pierre-Simon Laplace, o IPSL-CM5 é a quinta versão do modelo IPSL e é um modelo de sistema terrestre completo. Dufresne et al. (2013), diz que ele pode ser chamado assim por representar os principais processos dinâmicos, físicos e biogeoquímicos relevantes para o sistema climático. Além do modelo físico atmosfera-terra-oceano-gelo marinho, também inclui uma representação do ciclo do carbono, da química estratosférica e da química troposférica com aerossóis. Existiam inicialmente duas versões deste modelo, com dois conjuntos diferentes de modelos físicos: o IPSL-CM5A que é uma extensão do IPSL-CM4 e o IPSL-CM5B que possui um modelo atmosférico com parametrizações físicas muito diferentes. O IPSL-CM5A foi atualizado para formar o modelo IPSL-CM5A2 com o objetivo de ter uma versão rápida para simulações longas. Para as diferentes versões dos modelos IPSL-CM5 que participam do projeto CMIP5, o modelo atmosférico possui duas resoluções padrão: a resolução baixa é $1,9^{\circ} \times 3,75^{\circ}$ ($96 \times 96 \times L39$) e a resolução média é $1,25^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ ($144 \times 143 \times L39$). Para todos eles, a resolução do modelo oceânico é a mesma: cerca de 2° , com resolução meridional aumentada de $0,5^{\circ}$ próximo ao Equador ($149 \times 182 \times L31$) (IPSL, 2023).

O modelo é baseado em componentes de outros modelos como o modelo atmosférico LMDZ (em francês); o modelo oceânico NEMO, incluindo gelo marinho e biogeoquímica marinha; o modelo ORCHIDEE de superfícies continentais incluindo o ciclo do carbono; o modelo INCA de química e aerossóis e o modelo químico-clima acoplado LMDz-REPROBUS.

Dufresne et al. (2013), realizaram uma visão geral dos diferentes componentes do modelo e

explicaram como eles foram acoplados e usados para simular mudanças climáticas históricas ao longo dos últimos 150 anos e diferentes cenários de mudanças climáticas futuras. Eles utilizaram uma única versão do modelo IPSL-CM5 (IPSL-CM5A-LR) para fornecer projeções climáticas associadas a diferentes cenários socioeconômicos, incluindo as diferentes RCPs consideradas pelo CMIP5 e vários cenários do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões considerados pelo CMIP3. Os resultados sugeriram que a magnitude das projeções do aquecimento global depende principalmente do cenário socioeconômico considerado, que existe potencial para uma política de mitigação agressiva limitar o aquecimento global a cerca de dois graus, e que o comportamento de alguns componentes do sistema climático, como o gelo marinho do Ártico e a circulação meridional de inversão do Atlântico, poderá mudar drasticamente até ao final do século XXI, no caso de um cenário sem política climática. Embora a magnitude das alterações regionais na temperatura e na precipitação dependa de forma bastante linear da magnitude do aquecimento global projetado (e, portanto, do cenário considerado), o padrão geográfico destas alterações é surpreendentemente semelhante para os diferentes cenários. A representação dos processos físicos atmosféricos no modelo demonstra influenciar fortemente a variabilidade climática simulada e tanto a magnitude como o padrão das mudanças climáticas projetadas (Dufresne et al., 2013).

Yaghoobzadeh e Rahmani (2019) analisaram vários modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5 para uma estação no Irã e constataram que para o cenário RCP8.5, dois modelos (MIROC-ESM e IPSL-CM5A-MR) indicaram aumentos de temperatura superiores a 6 graus Celsius no ano 2100 em comparação com o ano 2010. Os modelos MIROC-ESM e IPSL-CM5A-MR e os modelos MIROC-ESM e GFDL-ESM2M estimaram o maior aumento de temperatura máxima e temperatura mínima no futuro em comparação com o período base. Na comparação dos períodos, o período de futuro distante (2070-2100) e de médio prazo (2040-2070) estimou um maior aumento na temperatura e na precipitação, respectivamente.

No Brasil, o modelo foi utilizado por Araújo-Junior et al. (2013) para analisar as projeções de precipitação e temperatura para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para a Amazônia e constatou que para o primeiro cenário, a projeção foi bastante otimista, com aumento de 22,5mm de chuva a cada década. Já Oliveira et al. (2020) utilizaram vários modelos para prever a produtividade da cana de açúcar até o final do século e constataram que o modelo do IPSL foi o que obteve maior projeção de aumento da produção. Assis et al. (2019) utilizaram alguns modelos com o

objetivo de investigar a sensibilidade de modelos acoplados oceano-atmosfera do CMIP3 e do CMIP5 para o período de 1979-1999 em simular a magnitude do gradiente meridional de anomalias de Temperaturas da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico Tropical. Eles constataram que os modelos FGOALS-g2, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM foram os únicos que subestimaram a quantidade de eventos classificados como neutro. Os modelos FGOALS-g2, HadCM3, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR simularam corretamente a quantidade de eventos negativos. Para o verão, para o CMIP3 o modelo com melhor simulação dos valores do gradiente meridional de anomalias de TSM foi o IPSL_CM4 com um ID de 0,67 classificado com índice de bom desempenho.

3.5 CSIRO

CSIRO (sigla para Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) é uma organização australiana que em conjunto com outros órgãos climáticos do país, elaborou um modelo climático global (ACCESS) com base nos relatórios do IPCC. Ele possui resolução de $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$ e cenários RCP2.6, 4.5, 6.0 e 8.5.

No site do CSIRO (2015), baseado em informações de uma matéria do The Conversation (2015), constam informações que o modelo possui várias versões, incluindo uma versão mais atualizada para o CMIP6 chamada ACCESS. Ainda lá constam as seguintes informações: o próprio modelo climático da Austrália, o Simulador do Sistema Climático e Terrestre da Comunidade Australiana, ou ACCESS, é consistentemente demonstrado por grupos nacionais e internacionais como estando entre os modelos de melhor desempenho em uma série de características climáticas importantes para a Austrália. O ACCESS foi desenvolvido em conjunto pelo Bureau of Meteorology e pelo CSIRO através de sua parceria de pesquisa, The Centre for Australian Weather and Climate Research. Foi desenvolvido em colaboração com universidades australianas e o UK Met Office com o apoio do Departamento de Meio Ambiente. O ACCESS foi projetado especificamente para ser usado tanto para previsão do tempo quanto para simulação climática. No “modo meteorológico”, o ACCESS é usado pelo Bureau of Meteorology para fornecer previsões meteorológicas da Austrália. Graças ao ACCESS, a previsão de quatro dias da Repartição é agora tão precisa quanto a previsão de três dias era há apenas dez anos. Comparações com previsões de centros operacionais no exterior mostram que o ACCESS está entre os modelos com melhor desempenho no mundo. A versão “climática” do ACCESS foi utilizada para gerar projeções climáticas que foram submetidas pela Austrália a recentes experiências internacionais coordenadas

sobre alterações climáticas e em apoio ao recente 5º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC) (CSIRO, 2015; The Conversation, 2015).

Eles também fizeram algumas modificações no próprio modelo de nome “CSIRO Mk3” que contém uma representação abrangente dos quatro principais componentes do sistema climático (atmosfera, superfície terrestre, oceanos e gelo marinho), e em sua forma atual é tão abrangente quanto qualquer um dos modelos globais acoplados disponíveis em todo o mundo. Maiores informações podem ser encontradas nos documentos técnicos do CSIRO elaborados por Gordon et al. (2002) e Gordon et al. (2010).

Talvez o CSIRO seja um dos modelos menos utilizados devido o seu foco ser analisar o clima australiano, porém devido a algumas características, ele foi aplicado com sucesso em locais brasileiros. Silva et al. (2022), utilizaram o modelo para projetar os impactos das mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe/CE e constataram que o modelo CSIRO-MK3-6-0 projetou os maiores impactos de aumento da temperatura e de redução da vazão e precipitação. Silveira; Souza-Filho; Lázaro (2013), analisaram o desempenho de alguns MCGs para a região do nordeste brasileiro (NEB), bacia amazônica e do prata e constataram que o modelo CSIRO respondeu melhor para o NEB.

Silveira; Souza-Filho; Lázaro (2012), utilizaram vários modelos para avaliar a sazonalidade da precipitação sobre o nordeste Setentrional brasileiro nas Simulações do IPCC-AR4 e mostraram que o modelo CSIRO-MK3.5 aponta chuvas bem inferiores ao observado, subestimando o total anual em mais de 50% com uma maior concentração das chuvas nos meses de fevereiro e março e complementam observando que apesar do modelo australiano apresentar correlação superior a 0,90, apresentou RMSE_PC superior a 4,9%, penalizando-o na avaliação de modo a classificá-lo na vigésima colocação entre os modelos analisados.

3.6 EC-EARTH

O Modelo EC-EARTH, faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados a partir do CMIP5, que tem como base o quinto relatório de dados do IPCC. Possui quatro versões (EC-EARTH – antes do CMIP, EC-EARTH-2 – CMIP5, EC-EARTH3 – CMIP6 e o EC-EARTH4 que está em desenvolvimento) e foi desenvolvido pelo EC-EARTH Consortium da União Europeia e possui quatro cenários: SSP 126, 245, 370 e 585.

O EC-Earth começou com o desenvolvimento de um modelo de circulação geral acoplado atmosfera-oceano baseado no sistema de previsão sazonal do Centro Europeu de Previsões

Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF). Consistia numa versão modificada do modelo da atmosfera e da superfície terrestre do sistema de previsão integrada (IFS) líder mundial do ECMWF, acoplado ao modelo oceânico e de gelo marinho do consórcio NEMO. Enquanto isso, o modelo evoluiu para um modelo de sistema terrestre, que inclui módulos para simular vegetação dinâmica, química atmosférica, aerossóis interativos, biogeoquímica oceânica, ciclo do carbono e manto de gelo da Groenlândia (EC-EARTH, 2023). O consórcio EC-Earth foi iniciado em 2006 e tem recebido muitos novos parceiros desde então. Até agora, o EC-Earth tornou-se um modelo proeminente e de última geração no cenário internacional dos modelos climáticos globais e do sistema terrestre. O consórcio EC-Earth contribuiu para o Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) e continuará a fazê-lo no futuro. O EC-Earth também é utilizado como ferramenta de investigação em vários projetos nacionais, europeus e internacionais. (EC-EARTH, 2023).

O modelo mais recente, o EC-EARTH 3 possui oito configurações que podem ser utilizadas para analisar a atmosfera, o oceano, a vegetação, a química atmosférica, a biogeoquímica marinha e o gelo terrestre. Maiores informações podem ser encontradas em Doscher et al. (2022).

Devido ao seu grande encarte de possibilidade, esse modelo é bastante utilizado ao redor do mundo com excelentes resultados. Doblas-Reyes et al. (2018) reforçam isso em uma publicação realizada unicamente para apontar as vantagens em se trabalhar com o EC-EARTH. Eles mencionam pontos positivos como a possibilidade de comparação de dados de versões diferentes e modelagem contínua, a inclusão de novos componentes e a portabilidade (visto que é realizado por um consórcio, seus dados são amplamente divulgados).

Wyser et al. (2017) e Wang et al. (2017), utilizaram o modelo para examinar as mudanças na variabilidade climática e encontraram ótimos resultados para todos os cenários. Nóbrega et al. (2022) analisaram o impacto das mudanças climáticas na aridez da bacia estendida do rio São Francisco e encontraram resultados bastante favoráveis, mesmo que o modelo tenha superestimou a aridez em algumas regiões e na sub-bacia do médio São Francisco. Já Cruz et al. (2016), apontaram o modelo EC-EARTH como o melhor para avaliar a estimativa de precipitação no nordeste brasileiro.

3.7 GFDL

O modelo GFDL faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5, que tem como base o quinto relatório de

dados do IPCC. Foi desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) e National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos da América e possui três cenários: RCP 2.6, 4.5 e 8.5. Ainda existe a versão 4.1 que foi disponibilizada através do CMIP6 (Dunne et al. 2020).

O GFDL (Geophysical FLuid Dynamics Laboratory) em seu website (GFDL, 2023), diz que construiu os primeiros modelos de sistemas terrestres (ESMs) da NOAA (Dunne et al., 2012; Dunne et al., 2013) para avançar na nossa compreensão de como os ciclos biogeoquímicos da Terra, incluindo as ações humanas, interagem com o sistema climático. Tal como os modelos climáticos físicos da GFDL, estas ferramentas de simulação baseiam-se num modelo de circulação atmosférica acoplado a um modelo de circulação oceânica, com representações da dinâmica da terra, do gelo marinho e dos icebergs. Os ESMs incorporam biogeoquímica interativa, incluindo o ciclo do carbono. A construção dos ESM tem sido um grande esforço colaborativo envolvendo cientistas da GFDL, da Universidade de Princeton, do Departamento do Interior e de outras instituições, para estudar as interações climáticas e ecossistêmicas e as suas potenciais alterações, tanto de causas naturais como antropogênicas (GFDL, 2023). O modelo GFDL possui duas variantes, o ESM2M e o ESM2G.

Segundo Dunne et al. (2012), esses modelos demonstram fidelidade climática semelhante ao modelo climático CM2, ao mesmo tempo que incorporam dinâmica de carbono explícita e consistente. Os dois modelos diferem exclusivamente na componente física do oceano. O ESM2M usa Modelo Modular do Oceano com camadas de pressão vertical, enquanto o ESM2G usa a Dinâmica Generalizada da Camada Oceânica com uma camada misturada em massa e camadas isopícnais internas. As diferenças no estado médio do oceano incluem a profundidade, sendo relativamente profunda no ESM2M e relativamente rasa no ESM2. O papel crucial da dinâmica dos oceanos na variabilidade climática é destacado no El Niño-Oscilação Sul, sendo excessivamente forte no ESM2M e excessivamente fraco no ESM2G em relação às observações. Assim, embora o ESM2G possa representar melhor as alterações climáticas relacionadas com a variabilidade total do conteúdo de calor, dada a sua falta de deriva a longo prazo, a circulação e ventilação do giro no Pacífico Norte, os oceanos Atlântico tropical e Índico, e a estrutura de profundidade nos fluxos de inversão e abissais, o ESM2M pode representar melhor as mudanças climáticas relacionadas com a circulação superficial, dada a sua temperatura superficial superior, padrões de salinidade e altura, circulação e variabilidade

tropical do Pacífico e dinâmica do Oceano Antártico. Eles concluem avaliando que nenhum dos modelos é fundamentalmente superior ao outro, e que ambos os modelos possuem fidelidade suficiente para permitir aplicações significativas de modelagem de sistemas climáticos e terrestres. Isto permite avaliar o papel da configuração dos oceanos nas interações do sistema terrestre no contexto de dois modelos acoplados carbono-clima de última geração (Dune et al. 2012).

Tayt'Sohn et al. (2018) utilizaram as projeções do ESM2M e do ESM2G com os cenários RCP4.5 e 8.5 para avaliar as mudanças nas projeções com o objetivo de observar a expansão do cultivo da cana-de-açúcar para a produção do etanol na bacia do rio Paranaíba no Centro-Oeste do Brasil. Os resultados encontrados por eles indicam que o modelo é eficiente neste tipo de simulação.

3.8 NorESM

O modelo NorESM faz parte dos modelos climáticos globais disponibilizados pelo CMIP5, que tem como base o quinto relatório de dados do IPCC. Foi desenvolvido pelo Norwegian Climate Centre da Noruega. Possui quatro cenários, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5 e duas versões, o NorESM1 e o NorESM2.

O NorESM1 tem suas métricas focadas na atividade de tempestades nas latitudes altas e médias do Hemisfério Norte e são avaliadas a partir de resultados históricos e projeções futuras do modelo climático global acoplado ao Modelo Norueguês do Sistema Terrestre (NorESM1-M). O European Re-Analysis Interim (ERA-Interim) e o Community Climate System Model (CCSM4), um modelo climático global da mesma época do NorESM1-M, fornecem referências para comparação (Knudsen e Walsh, 2016). Os rastros de tempestade derivados de um algoritmo baseado em vortacidade para identificação de tempestades são bem reproduzidos pelo NorESM1-M, embora os rastros sejam um pouco melhor resolvidos no ERA-Interim e CCSM4 de resolução mais alta. As trilhas mostram indicações de mudança em direção aos polos no futuro. Knudsen e Walsh (2016) testaram o modelo e informaram que à medida que as mudanças climáticas sob os cenários de RCP avancem, prevê-se que os ciclones se tornem geralmente mais intensos nas altas latitudes, especialmente na região do Alasca, embora em algumas outras áreas a intensidade devam diminuir. Embora as mudanças projetadas na densidade da via sejam menos coerentes, há uma tendência geral para tempestades menos frequentes em latitudes médias e tempestades mais frequentes em latitudes altas, especialmente na região da Baía de Baffin/Estreito de Davis em setembro. Prevê-se que a precipitação do outono aumente significativamente em todas as altas latitudes. Juntamente com a perda prevista de gelo

marinho e o aumento da intensidade das tempestades e do nível do mar, este aumento da precipitação implica uma maior vulnerabilidade às inundações costeiras e à erosão, especialmente na região do Alasca. As mudanças projetadas na intensidade da tempestade e na precipitação (bem como no gelo marinho e na pressão ao nível do mar) variam geralmente de forma linear com o valor RCP da forçante e com o tempo ao longo do século XXI (Knudsen e Walsh, 2016).

Já o NorESM2 é baseado na segunda versão do Modelo Comunitário do Sistema Terrestre (CESM2) e compartilha com o CESM2 a infraestrutura de código de computador e muitos componentes do modelo do sistema Terrestre. No entanto, NorESM2 emprega modelos oceânicos e de biogeoquímica oceânica totalmente diferentes. O componente atmosférico do NorESM2 (CAM-Nor) inclui um módulo diferente para física e química de aerossóis, incluindo interações com nuvens e radiação. Além disso, o CAM-Nor incluem melhorias na formulação da conservação local de energia seca e úmida, na conservação do momento angular local e global e nos cálculos para convecção profunda e fluxos. Os componentes de superfície do NorESM2 apresentam pequenas alterações nos cálculos de albedo e nos modelos terrestres e de gelo marinho (Seland et al. 2020).

Como forma de comparação, é bastante comum que pesquisadores de todo o mundo utilizem mais de um MCG para suas pesquisas. Isso ajuda a observar as projeções de diferentes formas e fazer ainda mais suposições. Oliveira et al. (2020) utilizaram dados observados históricos para o downscaling da precipitação e temperatura usando diferentes modelos climáticos globais (CanESM2, CNRM-CM5, IPSL-CM5A-MR, GFDL-ESM2M, MIROC-ESM, MPI-ESM-MR, e NorESM1-M) em relação ao período de referência (1961-1990), e, em seguida, para cenários futuros de 2021 a 2080 e constataram que ocorrerá redução das chuvas e aumento da evapotranspiração nos cenários futuros mas que isso não diminuiu a estimativa da produtividade, que tem até previsão de aumento. Eles concluem informando que a este fato, pode-se atribuir que a redução das chuvas previstas, mais acentuadas no período chuvoso, não serão decisivas para a diminuição da produtividade, pois na maioria dos modelos climáticos há previsão de aumento das chuvas no período seco de setembro a dezembro, crítico para o crescimento inicial da cultura, que tem calendário de plantio a partir do primeiro decêndio de setembro.

3.9 SMHI-ESM

O Modelo SMHI foi desenvolvido pelo Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco e

ESM significa que é um modelo EC-EARTH. É um modelo que contribui para a pesquisa e análise climática, permitindo prever como o clima pode evoluir no futuro sob diferentes cenários. O modelo é projetado para simular o comportamento do sistema climático da Terra, incluindo a atmosfera, os oceanos, as calotas de gelo e outros componentes do sistema climático. O objetivo é entender melhor as mudanças climáticas e suas implicações. Não foram encontradas muitas informações sobre esse modelo.

As maiores informações sobre o desenvolvimento deste modelo foram encontradas no website do SMHI (SMHI, 2020). Eles informam que O SMHI utilizará agora o EC-Earth para realizar uma série de cálculos climáticos seguindo uma estrutura coordenada no âmbito do CMIP6, uma colaboração internacional de modelização climática na qual os investigadores calculam como o clima está a mudar, comparando os resultados de diferentes modelos climáticos e disponibilizando os seus cálculos dentro de um arquivo de dados internacional aberto e em grande escala para modelagem climática. Esses dados serão disponibilizados abertamente para pesquisa através do Earth System Grid Federation (ESGF), que a SHI opera em conjunto com o National

4. Conclusão

Através desta pesquisa, conclui-se que os modelos climáticos globais, principalmente os abordados aqui, são de grande importância nas simulações e projeções de como estará nosso clima no futuro. Bem aplicados, podem ser uma ferramenta excelente que ajudará a formular políticas públicas de mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

Agradecimentos

Ao CNPQ pela concessão de bolsa de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial através do processo 405853/2022-0. Ao Projeto FACEPE-FAPESP, Mudanças Globais e adaptações sustentáveis com a viabilidade hídrica e energética e solvência econômica - Projeto OUR-EYES. Processo número APQ-0392-22 (FACEPE).

Referências

Almagro, A.; Oliveira, P. T. S. Avaliação da precipitação simulada pelos modelos ETA/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5 para o Brasil. In: 71ª reunião anual da SBPC, UFSM, Campo Grande/MS, 2019.

Arakawa, A.; W. H. Schubert. 1974. Interactions of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *Journal of the Atmospheric Science*, 31, 671-701.

Supercomputer Center (NSC) da Universidade de Linköping.

Eles continuam afirmando que dentro de um modelo climático, a área a ser estudada é dividida em vários quadrados. Os investigadores reduziram agora o tamanho dos quadrados na EC-Earth, aumentando assim a resolução de cerca de 120 km para cerca de 80 km na atmosfera. Uma resolução mais alta significa que o modelo pode mostrar mais detalhes. Eles também desenvolveram o modelo para calcular mais processos do sistema climático que foram anteriormente descritos de forma simplificada, e concluem que O EC-Earth foi desenvolvido dentro de um consórcio internacional liderado pela SMHI nos últimos anos. Na Suécia, a SMHI trabalhou com as universidades de Lund, Estocolmo, Gotemburgo e Uppsala. Na Universidade de Lund, foi desenvolvido um modelo de vegetação dinâmica que agora faz parte do EC-Earth. “A vegetação reage às alterações climáticas e dá feedback climático”, explica Klaus. “À medida que a vegetação muda, também muda o albedo, ou seja, a quantidade de radiação refletida pela superfície. Anteriormente, tínhamos descrições simplificadas desse processo, mas agora o modelo calcula isso sozinho.”

Araújo-Junior, L. M. A.; Silveira, C. S.; Souza-Filho, F. A.; Guimarães, S. O.; Porto, V. C. Análise das projeções de precipitação e temperatura do IPCC-AR5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o século XXI para a Amazônia. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 2013.

Assis, E. A.; Alves, J. M. B.; Silva, E. M.; Vasconcelos-Junior, F. C.; Barbosa, A. C. B.; Santos, A. C. S.; Sombra, S. S. 2019. Modelos acoplados do IPCC (CMIP3-CMIP5) e o gradiente meridional de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Atlântico Tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 217-226.

Benestad, R. 2016. Downscaling Climate Information.” *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*, Oxford University Press, Oxford Research Encyclopedia of Climate Science.

Betts, A. K.; Miller, M. J. A. 1986. New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests Using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-Mass Data Sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 112, 693-709.

Bombardi, R. J.; Carvalho, L. M. V. 2008. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2xCO₂ usando o modelo MIROC. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 23, 58-72.

Brito, A. L.; Veiga, J. A. P.; Correia, F. W.; Capistrano, V. B. 2019. Avaliação do desempenho

- dos modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de indicadores de extremos climáticos de precipitação para a bacia amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34,165-177.
- Cardoso, L. P.; Siqueira, T. M.; Timm, L. C.; Rodrigues, A. A.; Nunes, A. B. 2022. Analysis of average annual temperatures and rainfall in Southern region of the state of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 57, 58-71.
- Carvalho, V. S. O.; Alvarenga, L. A.; Melo, P. A.; Tomasella, J.; Mello, C. R.; Martins, M. A. 2022. Climate change impact assessment in a tropical headwater basin. *Revista Ambiente e Água*, v.17, n.1, p.1-19.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C; Liebmann, B. 2002. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. *Journal of Climate*, v. 15, p. 2377-2394.
- Chou, S. C.; Lyra, A. A.; Chagas, D. J.; Sueiro, G.; Gomes, J. L.; Campos, D.; Rodrigues, D. C.; Tavares, P.; Rodriguez, D. Projeções de mudanças de precipitação na bacia do rio São Francisco. In: *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis, 2017.
- Chou, S. C.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J.; Bustamante, J.; Tavares, P.; Silva, A.; Rodrigues, D.; Campos, D.; Chagas, D.; Sueiro, G.; Siqueira, G.; Nobre, P.; Marengo, J. 2014. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3, 438–454.
- Chou, S. C.; Marengo, J. A.; Lyra, A.; Sueiro, G.; Pesquero, J. F. 2012. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, v. 38635-653.
- Chou, S. C.; Nunes, A. M. B.; Cavalcanti, I. F. A. 2000. Extended range forecasts over South America using the regional Eta Model. *Journal of Geophysical Research*, v.105, n.D8, p.10,147-10,160.
- Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney N.; Halloran, P. et al. 2011. Development and Evaluation of an Earth System Model HadGEM. *Geoscientific Model Development*, v. 4, p. 997-1062.
- Cox, P. M. Description of the “TRIFFID” dynamic global vegetation model. London Road: Hadley Centre, 2001. (Technical Note, 24).
- Cruz, M. A. S.; Aragão, R.; Almeida, A. Q.; Santos, M. I. M. Avaliação da estimativa da precipitação para diferentes modelos globais de clima (GCM) na região Nordeste do Brasil. In: *XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 2016.
- Cruz, M. A. S.; Mota, P. V. M.; Aragão, R.; Rocha, R. O. F. 2017. Avaliação das precipitações geradas pelo modelo climático regional ETA-HadGEM2-ES para o Estado de Sergipe. *Scientia Plena*, 13, 1-9.
- Csiro - The Models That Help Us Predict Climate Change – (2015). Disponível em:<<https://www.csiro.au/en/news/all/articles/2015/april/explainer-the-models-that-help-us-predict-climate-change>>. Acesso em 10. Set. 2023.
- Doblas-Reyes, F. J.; Navarro, J. C. A.; Acosta, M.; Bellprat, O.; Bilbao, R.; Castrilho, M.; Fuckar, N.; Guemas, V.; Lhedó, Ll.; Ménégoz, M.; Prodhomme, C.; Serradell, K.; Tintó, O.; Batté, L.; Volpi, D.; Ceglar, A.; Haarsma, R.; Massonnet, F. 2018. Using EC-Earth for climate prediction research. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, n. 154.
- Döscher; R.; Acosta; M.; Alessandri; A.; Anthoni; P.; Arsouze; T.; Bergman; T.; Bernardello; R.; Boussetta; S.; Caron; L.-P.; Carver; G.; Castrillo; M.; Catalano; F.; Cvijanovic; I.; Davini; P.; Dekker; E.; Doblas-Reyes; F. J.; Docquier; D.; Echevarria; P.; Fladrich; U.; Fuentes-Franco; R.; Gröger; M.; V. Hardenberg; J.; Hieronymus; J.; Karami; M. P.; Keskinen; J.-P.; Koenig; T.; Makkonen; R.; Massonnet; F.; Ménégoz; M.; Miller; P. A.; Moreno-Chamarro; E.; Nieradzik; L.; Van Noije; T.; Nolan; P.; O'donnell; D.; Ollinaho; P.; Van Den Oord; G.; Ortega; P.; Prims; O. T.; Ramos; A.; Reerink; T.; Rousset; C.; Ruprich-Robert; Y.; Le Sager; P.; Schmith; T.; Schrödner; R.; Serva; F.; Sicardi; V.; Sloth Madsen; M.; Smith; B.; Tian; T.; Tourigny; E.; Uotila; P.; Vancoppenolle; M.; Wang; S.; Wårlind; D.; Willén; U.; Wyser; K.; Yang; S.; Yepes-Arbós; X.; Zhang; Q. 2022. The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geoscientific Model Development*, v.15, p.2973–3020.
- Dufresne, J. L.; Fojols, M. A.; Denvil, S.; Caubel, A.; Marti, O.; Aumont, O.; Balkanski, Y.; Bekki, S.; Bellenger, H.; Benshila, R. et al. 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, v.40, p.2123-2165.
- Dunne, J. P.; Horowitz, L. W.; Adcroft, A. J.; Ginoux, P.; John, J. G.; Crasting, J. P.; Malyshev, S.; Naik, V.; Paulot, F.; Shevliakova, E. et al. 2020. The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall coupled model description and simulation characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 11, p.1-56.
- Dunne, J. P.; Jasmin, G.; John, A. J.; Adcroft, S. M.; Griffies, R. W.; Hallberg, E. S.; Ronald, J. S.; Cooke, W.; Dunne, K. A.; Harrison, M. J.; Krasting, J. P.; Malyshev, S. L.; Milly, P. C. D.; Phillipps, P. J.; Sentman, L. T.; Samuels, B. L.

- Spelman, M. J.; Winton, M.; Wittenberg, A. T.; Zadeh, K. 2012. "GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics", *Journal of Climate*, v. 25, n.19, p. 6646-6665.
- Dunne, J. P.; Jasmin, G.; John, A. J.; Adcroft, S. M.; Griffies, R. W.; Hallberg, E. S.; Ronald, J. S.; Cooke, W.; Dunne, K. A.; Harrison, M. J.; Krasting, J. P.; Malyshev, S. L.; Milly, P. C. D.; Phillipps, P. J.; Sentman, L. T.; Samuels, B. L.; Spelman, M. J.; Winton, M.; Wittenberg, A. T.; Zadeh, K. 2013. "GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics". *Journal of Climate*, v. 26, n.7, p. 2247-2267.
- EC-EARTH - A European community Earth System Model. (2023). Disponível em: <<https://ec-earth.org/>>. Acesso em 10. set. 2023.
- Ek, M. B.; Mitchell, K. E.; Lin, Y.; Rogers, E.; Grunmann, P.; Koren, V.; Gayno, G.; Tarpley, J. D. 2003. Implementation of NOAA land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 108, p. 1-16.
- Fels, S. B.; Schwarzkopf, M. D. 1975. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 32, p. 1475-1488.
- Fernandez, J. P. R.; Franchito, S. H.; Rao, V. B. 2006. Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models Part I Mean climatology. *Theoretical Applied Climatology*, v. 86, p. 247-260.
- Ferreira, P. S.; Souza, W. M. 2020. Modelagem hidroclimática e demográfica para estimativa da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Brígida. *Revista Brasileira de Climatologia*. v. 27, p.181-196.
- Gadd, A. J. A. 1978. split-explicit integration scheme for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 104, p. 569-582.
- GFDL - Earth System Models. Disponível em: <<https://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model/>>. Acesso em: 10 set. 2023.
- Gordon, H. B.; O'farrell, S. P.; Collier, M. A.; Dix, M. R.; Rotstayn, L. D.; Kowalczyk, E. A.; Hirst, A. C.; Watterson, I. G. The CSIRO Mk3.5 Climate Model. Aspendale: CSIRO Marine and Atmospheric Research; 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/102.100.100/108810?index=1>>. Acesso em: 10 set. 2023.
- Gordon, H. B.; Rotstayn, L. D.; Mcgregor, J. L.; Dix, M. R.; Kowalczyk, E. A.; O'farrell, S. P.; Waterman, L. J.; Hirst, A. C.; Wilson, S. G.; Collier, M. A.; Watterson, I. G.; Elliott, T. I. The CSIRO Mk3 Climate System Model. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No.60. 2002. 134p. Disponível em: <<https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=procite:ff94db7e-ad41-40bf-b6be-2ab1ad07805c&dsid=DS1>>. Acesso em: 10 set. 2023.
- governo do Canadá. Climate Model: second Generation Canadian Earth System Model. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/science-research-data/modeling-projections-analysis/centre-modelling-analysis/models/second-generation-earth-system-model.html>. Acesso em: 10. Set. 2023.
- Hasumi, H.; S. Emori. K-1 Coupled GCM (MIROC) Description. Disponível em: <<http://www.ccsr.utokyo.ac.jp/kyosei/hasumi/MIROC/tech-repo.pdf>>. Acesso em: 09 Set. 2023.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change - (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to Fifth Assessment Report of the IPCC*, Stockholm, 2216p.
- IPSL - Institut Pierre Simon Laplace – (2015). *Climate Modelling Center*. Disponível em: <<https://cmc.ipsl.fr/ipsl-climate-models/ipsl-cm5/>>. Acesso em 10 set. 2023.
- Knudsen, E. M.; Walsh, J. E. 2016. Northern Hemisphere storminess in the Norwegian Earth System Model (NorESM1-M). *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 2335–2355.
- Lacis, A. A.; Hansen, J. E. 1974. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, p. 118-133.
- Le Treut, H.; Z.-X. Li. 1991. Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: feedback effects associated with the simulation of cloud optical Properties. *Climate Dynamics*, v. 5, p. 175-187.
- Martin, G. M.; Bellouin, N.; Collins, W. J.; Culverwell, I. D.; Halloran, P. R. Et Al. The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. *Geoscientific Model Development*, v. 4, p. 723-757, 2011.
- Mcfarlane, N. A. 1987. The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *Journal of the Atmospheric Science*, v. 44, p.1775–1800.
- Mellor, G. L.; Yamada, T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 31, p. 1791-1806.

- Mellor, G. L.; Yamada, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geostrophic fluid problems, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 20, p. 851-875.
- Mesinger, F. 2020. 1984. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, v. 44, p. 195-202.
- Mesinger, F.; Chou, S.C.; Gomes, J.L.; Jovic, D.; Bastos, P. et al. 2012. "An upgraded version of the Eta Model". *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 116, p. 63-79.
- Moss, R. H.; Edmonds, J. A.; Hibbard, K. A.; Manning, M. R.; Rose, S. K.; Vanvuurem, D. P.; Carter, T. R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G. A.; Mitchell, J. F. B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S. J.; Stouffer, R. J.; Thomson, A. M.; Weyant, J. P.; Wilbanks, T. J. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, n. 7282, p. 747-756.
- Moura, C. N.; Campos, C. C.; Rafaeli-Neto, S. L.; Sá, E. A. S.; Caron, H. R.; Liebl, B. 2017. Validação do modelo climático ETA-HADGEM2-ES para o município de Lages, Santa Catarina. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Florianópolis.
- Nakajima, T.; Tsukamoto, M.; Tsushima, Y.; Numaguti, A.; Kimura, T. 2000. Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model, *Applied Optics*, v. 39, p. 4869-4878.
- NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN, L. 2001. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Northeast Brazil with ECHAM3 and NCEP's Regional Spectral Models at IRI. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2787-2796.
- Nóbrega, M. R. R.; Silva, M. V. M.; Lima, C. E. S.; Silva, G. K.; Golçalves, S. T. N.; Silveira, C. S. 2022. Impacto das mudanças climáticas na aridez da bacia estendida do -rio São Francisco, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 185-197.
- O'connor, F. M.; Johnson, C. E.; Morgenstern, O.; Abraham, N. L.; Braesicke, P. et al. 2013. Evaluation of the new UKCA climate-composition model - Part 2: The Troposphere. *Geoscientific Model Development Discussions*, v. 6, p. 1743 - 1857.
- Oliveira, L. P. M.; Silva, F. D. S.; Costa, R. L.; Rocha-Junior, R. L.; Gomes, H. B.; Pereira, M. P. S.; Monteiro, L. A.; Silva, V. P. R. Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana de açúcar em Maceió. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 35, n. especial, p.969-980.
- Palmer, J. R.; Totterdell, I. J. 2001. Production and export in a global ocean ecosystem model. *Deep Sea Research Part I. Oceanographic Research Papers*, v. 48, n. 5, p. 1169-1198.
- Ramos, A. M. Influência das Mudanças Climáticas Devido ao Efeito Estufa na Drenagem Urbana de uma Grande Cidade Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/511> 1 Acesso em 09 set. 2023.
- Schliep, E. M.; Cooley, D.; Sain, S. R.; Hoeting, J. A. 2010. A comparison study of extreme precipitation from six different regional climate models via spatial hierarchical modeling. *Extremes*, v. 13, i. 2, p. 219-239.
- Seland, O.; Bentsen, M.; Olivie, D.; Toniazzo, T.; Gjermundsen, A.; Graff, L. S.; Debernard, J. B.; Gupta, A. K.; He, Y.-C.; Kirkevåg, A.; Schwinger, J.; Tjiputra, J.; Aas, K. S.; Bethke, I.; Fan, Y.; Griesfeller, J.; Grini, A.; Guo, C.; Ilicak, M.; Karset, I. H. H.; Landgren, O.; Liakka, J.; Moseid, K. O.; Nummelin, A.; Spensberger, C.; Tang, H.; Zhang, Z.; Heinze, C.; Iversen, T.; Schulz, M. 2020. Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK. *Historical, and scenario simulations*, v. 13, ed. 12, p.6165-6200.
- Sestini, M. F.; Alvalá, R. C. S.; Mello, E. M. K.; Valeriano, D. M.; Chou, S. C.; Nobre, C. A.; Paiva, J. A. C.; Reimer, E. S. 2002. Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 74p.
- Silva, A. E. F.; Gomes, D. T.; Silveira, C. S.; Sakamoto, M. S. 2020. Desempenho das simulações do Projeto Cordes quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre o Município de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.35, v. 3, p.387-396.
- Silva, G. K.; Silveira, C. S.; Silva, M. V. M.; Marcos-Júnior, A. D.; Lima, C. E. S. 2022. Projeções Dos Impactos Das Mudanças Climáticas Sobre As Bacias Do Hidrossistema Jaguaribe, Ceará, Brasil, Utilizando Informações Do Cordex Do Modelo Climático Regional RCA4. *Revista AIDIS*, v.15, n.1, p.258-281.
- Silveira, C. S.; Souza-Filho, F. A.; Lázaro, Y. M. C. 2013. Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4 Quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual da Precipitação Sobre o Nordeste do Brasil, Bacia do Prata e Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18, 177-194.
- Silveira, C. S.; Souza-Filho, F. A.; Lázaro, Y. M. C. 2012. Sazonalidade da Precipitação Sobre o

- Nordeste Setentrional Brasileiro nas Simulações do IPCC-AR4. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17, 125-134.
- SMHI - Researchers describe the development of the ec-earth global climate model. 2020. Disponível em: <<https://www.smhi.se/en/research/research-news/researchers-describe-the-development-of-the-ec-earth-global-climate-model-1.156437>>. Acesso em: 10 set. 2023.
- Tayt'sohn, F. C. O.; Nunes, A. M. B.; Pereira, A. O. 2018. Assessing sugarcane expansion to ethanol production under climate change scenarios in Paranaíba river basin - Brazil. *Biomass and Bioenergy*, V. 119, P.436-445.
- The Conversation - Explainer: The Models That Help Us Predict Climate Change – (2015). Disponível em: <<https://theconversation.com/explainer-the-models-that-help-us-predict-climate-change-39568>>. Acesso em: 10. Set. 2023.
- Vera, C.; Higgins, W.; Ambrizzi, T.; Amador, J.; Garreaud, R.; Gochis, D; Gutzler, D; Lettenmaier, D.; Marengo, J.; Mechoso, C. R.; Noguez-Paele; Silva Dias, P. L.; Zhang, C. 2006. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, v. 19, p. 4977-5000.
- Wang, S.; Wyser, K.; Strandberg, G. 2017. The impact of Arctic SST/SIC changes and North Atlantic Ocean SST changes associated with high end SWLs on European climate variability. Report 3.3 to the EU FP7 HELIX programme.”
- Watanabe, S.; Kanae, S.; Seto S.; Yeh, Patj-F.; Hirabayashi, Y.; Oki, T. 2012. Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models. *Journal of Geophysics Research: Atmospheres*, 17, 1-13.
- Wyser, K.; Strandberg, G.; Caesar, J.; Gohar, L. 2017. Documentation of changes in climate variability and extremes simulated by the HELIX AGCMs at the 3 SWLs and comparison to changes in equivalent SST/SIC low-resolution CMIP5 projections. Report 3.1 to the EU FP7 HELIX programme.
- Yaghoobzadeh, M.; Rahmani, Y. 2019. Evaluation models and scenarios of the climate change fifth report in estimation temperature and precipitation of Birjand Station. *Journal of Climate Research*, v. 10, n.37, p.87-100.
- Zhao, Q.; Black, T. L.; Baldwin, M. E., 1997. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta model at ncep. *Weather and Forecasting*, 12, 697-712.