

PROJEÇÕES DE CHUVAS EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA AMAZÔNIA

PRECIPITATION PROJECTIONS IN FUTURE CLIMATE SCENARIOS FOR SMALL CATCHMENTS IN THE AMAZON

Amanda de Cássia Lobato Soares^a, Claudio Blanco^a, Ana Karla Rodrigues Lobato^a, Josias da Silva Cruz^a

^aUniversidade Federal do Pará – UFPA

amanda.soares@itec.ufpa.br, blanco@ufpa.br, ana.lobato@itec.ufpa.br, josiascruz@ufpa.br

Submissão: 15 de fevereiro de 2023 Aceitação: 14 de novembro de 2023

Resumo

Buscou-se analisar o impacto das mudanças climáticas nas precipitações de cinco pequenas bacias hidrográficas da Amazônia. Foram utilizados os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. As precipitações futuras foram obtidas via plataforma PROJETA e do Modelo ETA-MIROC5. Na bacia do Igarapé da Prata, observa-se que, ao longo do século, o modelo subestima, as médias diárias mensais mínimas simuladas no cenário realista, em comparação com o observado. No Rio Piranhas, as projeções indicam que as médias mínimas simuladas ocorrerão em meses de estiagem na região. No Rio Caeté, durante o período de 2024 a 2060, o modelo simula a redução das chuvas, em relação ao observado, entre os meses de março e setembro no cenário otimista, e entre fevereiro e setembro, no cenário realista. Já para o período de 2061 a 2099, as projeções apontam para a redução das chuvas entre os meses de março, e agosto e outubro no cenário otimista, e entre março e outubro no cenário realista. No Rio Capivara, no período de 2024 a 2060, o modelo simula reduções das chuvas para os meses de janeiro, março, abril e maio no cenário otimista, e entre fevereiro e maio, no cenário realista, assim como, em setembro e outubro nos dois cenários. Já para o período de 2061 a 2099, as projeções apontam para a redução das chuvas, com médias inferiores ao observado de março a agosto e outubro no cenário otimista, e entre março e outubro no cenário realista. No Rio Braço Norte, não haverá deslocamento temporal das médias máximas e mínimas das chuvas simuladas ao longo do século. Os resultados analisados são úteis para a gestão dos recursos hídricos das cinco pequenas bacias hidrográficas, pois os gestores podem planejar a mitigação de eventos extremos (secas e cheias) nas regiões afetadas devido às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Precipitação futura; Pequena bacia hidrográfica da Amazônia.

Abstract

We sought to analyze the impact of climate change on precipitation in five small catchments in the Amazon. The RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios were used. Future precipitation was obtained via the PROJETA platform and the ETA-MIROC5 Model. In the Igarapé da Prata catchment, it is observed that, throughout the century, the model underestimates the minimum daily monthly averages simulated in the realistic scenario, compared to what was observed. In the Piranhas catchment, projections indicate that the simulated minimum averages will occur in dry months in the region. In the Caeté catchment, during the period from 2024 to 2060, the model simulates the reduction in rainfall, in relation to what was observed, between the months of March and September in the optimistic scenario, and between February and September, in the realistic scenario. For the period from 2061 to 2099, projections point to a reduction in rainfall between the months of March, August, and October in the optimistic scenario, and between March and October in the realistic scenario. In the Capivara catchment, in the period from 2024 to 2060, the model simulates reductions in rainfall for the months of January, March, April and May in the optimistic scenario, and between February and May, in the realistic scenario, as well as in September and October in the two scenarios. For the period from 2061 to 2099,

projections point to a reduction in rainfall, with averages lower than those observed from March to August and October in the optimistic scenario, and between March and October in the realistic scenario. In Braço Norte catchment, there will be no temporal displacement of the maximum and minimum average rainfall simulated throughout the century. The analyzed results are useful for the management of water resources in the five small catchments, as managers can plan the mitigation of extreme events (droughts and floods) in regions affected by climate change.

Keywords: Climate change; Future precipitation; Small catchment in the Amazon.

1 INTRODUÇÃO

Com o entendimento de que as mudanças no clima são inevitáveis, a política climática mundial mudou seu enfoque na atenuação para a preparação e adaptação aos impactos futuros (PORTER; DEMERITT; DESSAI, 2015). Frente a essas preocupações, a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram em 1988 o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Este órgão reúne, periodicamente, diversos centros de pesquisa em clima para atualizar as modelagens climáticas, elaborar relatórios técnicos e outros produtos sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e os impactos nos diversos âmbitos climáticos (PACHAURI; MEYER, 2014). Desde a criação do IPCC, a ciência climática progrediu geometricamente e confirmou a hipótese de que as mudanças climáticas estão ocorrendo, com forte influência humana no aumento das temperaturas do planeta, sendo a queima de combustível fóssil e o desmatamento as principais causas do aquecimento global, constatando-se que o mesmo é inequívoco desde meados de 1950 e que não tem precedentes nos últimos milênios (MARENGO; SOUZA JUNIOR, 2018). Segundo Soito e Freitas (2011), as áreas mais vulneráveis no Brasil, sob a perspectiva das mudanças climáticas, são notadamente a Amazônia e o Nordeste. O clima da região amazônica modula-se pela interação de fenômenos oceano-atmosfera, e por sistemas atmosféricos que atuam em diferentes escalas espaço-temporais, sendo que a Amazônia é a região responsável pela alimentação dos chamados "rios voadores" - correntes de jato que se formam na região equatorial e que transportam umidade da Amazônia para o centro-oeste, sudeste e sul do Brasil (COPERTINO *et al.*, 2019). Por meio desses cursos de água atmosféricos, a região amazônica sofre e interfere diretamente nas mudanças do clima, contribuindo diretamente na emissão de vapor de água para a

atmosfera e consequentemente na umidade atmosférica e precipitação (MARENGO, 2006).

A precipitação é a variável climatológica mais estudada na região amazônica, pois se relaciona com outras características físicas, como temperatura e umidade (MORAES, 2005; ALBUQUERQUE, 2010). Tradicionalmente, a precipitação é medida utilizando-se pluviômetros, que medem a precipitação caindo diretamente em um determinado ponto e, portanto, para abranger uma grande área, vários pluviômetros precisam ser instalados e monitorados de forma eficaz (CHAUDHARY; DHANYA, 2019). No entanto, a ausência parcial ou total de dados de precipitação com qualidade é recorrente na Amazônia e compromete os estudos na região, que necessitam das séries temporais (MENDONÇA, 2022). Assim, preencher lacunas pluviométricas torna-se necessário para completar os bancos de dados. Nesse contexto, Cordeiro e Blanco (2021) propuseram o uso de produtos de satélite para preencher essas lacunas em séries históricas de chuva. Conforme o estudo aplicado pelos autores, o produto com o melhor desempenho pelo método foi o *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations* (CHIRPS), que teve os valores mensais mais baixos de erro absoluto médio (0,979 mm) e raiz do erro quadrático médio (3,656 mm). Os resultados confirmam que as estimativas de satélite representam satisfatoriamente a sazonalidade das chuvas na região. A utilização dos dados gerados por satélites fornece uma oportunidade para medir a precipitação em resolução espaço-temporal satisfatória com cobertura global total, o que é importante para estudos hidrológicos e climatológicos em escala global ou continental (CHAUDHARY; DHANYA, 2019). Somado a isso, diferentemente dos pluviômetros, os satélites medem a radiação da nuvem utilizando diferentes sensores, que são posteriormente convertidos em precipitação, aplicando várias técnicas de recuperação ou transferência, sendo chamados de *Satellite-based Precipitation Estimates* (SPEs), que são

frequentemente associados a ajuste de viés (KIDD; HUFFMAN, 2011; TANG *et al.*, 2015). A ausência parcial ou total de séries temporais de dados na Amazônia pode comprometer a gestão e o uso adequados de recursos hídricos na região. A gestão dos recursos hídricos sempre foi um diferencial para o desenvolvimento mundial ao longo da história; afinal quanto maior a capacidade de uma nação gerenciar esse recurso, menor a sua fragilidade aos extremos climáticos (BRITO, 2018; MENDONÇA, 2022).

Assim, é importante o estabelecimento das influências climatológicas sobre uma determinada localidade. Isso ajuda no entendimento dos impactos sobre a humanidade e o meio ambiente e, inclusive, na compreensão da hidrologia dos rios para a adequação de seus usos, visto que os efeitos da intensificação das sazonalidades climáticas no Brasil e o aumento da temperatura global podem impactar os diversos setores da economia do país. Todavia, ainda são escassos os trabalhos realizados na Amazônia com este objetivo, tendo em vista que a região sofre com carência de infraestruturas, planejamentos técnicos e políticas públicas voltadas para remediação de riscos climáticos (COSTA, 2019). O 5º Relatório do IPCC, em 2014, indica que o aumento da temperatura do ar é atribuído, especialmente, aos níveis de Gases do Efeito Estufa (GEE's) (DROUET; BOSETTI; TAVONI, 2015). Tendo em vista que, na maioria das vezes, o efeito estufa está ligado ao desenvolvimento econômico, houve interesse por parte dos governos em cenários que explorem melhor o impacto de diferentes políticas climáticas, analisando o "custo-benefício" dos objetivos climáticos de longo prazo. Assim, o IPCC solicitou às comunidades científicas que desenvolvessem um conjunto de cenários que substituíssem os antigos (chamados de *Special Report Emission Scenarios* - SRES), e facilitassem a avaliação das situações futuras (BURKHART *et al.*, 2018).

Os cenários de futuras emissões dos GEE's foram propostos baseando-se em estimativas do desenvolvimento da economia mundial. Segundo Costa *et al.* (2012), os chamados RCP's (*Representative Concentration Pathways*) são parâmetros para representar futuros processos físicos na atmosfera, oceanos, rios e superfície terrestre nas simulações pelos Modelos de Circulação Geral (GCM's). Os RCP's possuem um número associado para representar o valor do fluxo radiativo ao final do século XXI em W/m^2 , sendo estes: 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 (ALEMAN *et al.*,

2017). O cenário RCP 2.6 é o cenário menos provável de ocorrer, enquanto o RCP 4.5 é o cenário desejado, em que os países podem controlar os níveis de emissão e o nível de CO_2 na atmosfera, o qual se estabiliza logo após 2100. No entanto, o cenário RCP 8.5 é reconhecido como o mais provável de ocorrer (SCHARDONG; SIMONOVIC; GARCIA, 2014). Os cenários descritos são essenciais para os GCM's, pois são esses modelos numéricos que representam o futuro físico dos processos na atmosfera, do oceano e da superfície terrestre (COSTA *et al.*, 2019). Nesse contexto, os RCP's são utilizados pelos GCM's para possibilitar a previsão das condições do tempo, prever o clima da próxima estação e simular características mais gerais do clima futuro na escala de décadas ou séculos, considerando as modificações antropogênicas e naturais (SAMPAIO; DIAS, 2014).

Para a escolha de um GCM eficiente, devem ser levados em consideração os sistemas meteorológicos, que atuam sobre a atmosfera da região amazônica e influenciam a precipitação. Segundo Carvalho e Oyama (2013), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistema sinótico que ocorre às proximidades da Linha do Equador, é identificada pela presença de aglomerados convectivos, um dos principais mecanismos de aquecimento da atmosfera ocasionado, principalmente, pela liberação de calor latente e pela interação entre radiação e nebulosidade. Logo, a compreensão do comportamento da ZCIT torna-se fundamental para o entendimento das características do regime pluviométrico na região equatorial (MOLION; BERNARDO, 2002). Silveira *et al.* (2013) analisaram a eficiência de alguns modelos globais no Brasil e concluíram que a maioria apresentou correlações elevadas em relação à climatologia observada nas regiões Nordeste, Bacia do Prata e Amazônia. Os modelos foram capazes de capturar eficientemente variações sazonais, principalmente a chuva. Na região Amazônica, ocorreram nas últimas décadas vários eventos hidrológicos extremos, como as enchentes de 2009, 2012 e 2014, e as secas de 2005 e 2010, que alertaram sobre a vulnerabilidade climática da região (MARENGO; ESPINOZA, 2016), além da atual seca de 2023. Para Marengo *et al.* (2009), a ocorrência de eventos extremos como estes pode variar no intervalo de dias e até séculos. Com base nessas condições de contorno, o modelo japonês MIROC5 simula o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS) de forma mais realística que outros, e projeta de maneira

eficiente a precipitação climatológica, especialmente para as áreas de baixas pressões, característica de regiões próximas do Equador, com influência da Zona de Convergência Intertropical (WATANABE *et al.* 2010).

Assim, o objetivo do presente trabalho é contribuir com a análise das possíveis alterações nos padrões de precipitação em cinco pequenas bacias hidrográficas da Amazônia, sob a influência das mudanças climáticas, tendo como base cenários de projeções definidos a partir do Relatório do IPCC. Somado a isso, este estudo também objetivou contribuir com o levantamento e sistematização de informações que otimizem a elaboração de projetos, desenvolvimento de pesquisas e execução de obras, dando suporte a pesquisadores e gestores de água da Amazônia, uma vez que a região tem grande potencial estratégico no país. Logo, o estudo tende a ampliar o olhar científico sobre as pequenas bacias hidrográficas, que geralmente apresentam uma relevância inferior, do ponto de vista econômico, em relação às grandes bacias. Considerando as diversidades supracitadas, as populações que dependem das pequenas bacias tornam-se mais vulneráveis às mudanças climáticas, sobretudo na Amazônia, que historicamente é mais afetada com as desigualdades regionais do Brasil.

2 MÉTODO

2.1 Área de estudo

A área de estudo inclui cinco pequenas bacias hidrográficas da Amazônia Legal, situadas nos Estados do Pará e Tocantins (Quadro 1). A Amazônia Legal possui uma população com mais de 24 milhões de habitantes, totalizando pouco mais de 12% da população brasileira, distribuídos em 772 municípios e possui área que corresponde a aproximadamente 59% do território nacional, sendo superior a 5 milhões de km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022). Essas pequenas bacias hidrográficas foram selecionadas com base no trabalho de Santana e Blanco (2020), no qual os autores definiram pequenas bacias hidrográficas, sendo aquelas que possuem áreas de drenagem inferiores a 500 km². Esse resultado está próximo aos valores sugeridos por Tucci e Clarke (2003) e por Tucci (2004), que classificaram pequenas bacias hidrográficas como aquelas com áreas de drenagem superiores a 300 km² e inferiores a 500 km². Igualmente, as cinco bacias selecionadas no estudo possuem áreas de drenagem variando de 32,7 km² a 465 km².

Quadro 1 - Dados técnicos das pequenas bacias hidrográficas selecionadas

Bacia Hidrográfica	Município/Estado	Área de Drenagem (km ²)	Latitude Exutório	Longitude Exutório
Igarapé da Prata	Capitão Poço/PA	32,7	1° 39' 8" S	47° 7' 0" W
Rio Piranhas	Abreulândia/TO	186	9° 36' 13" S	48° 58' 15" W
Rio Caeté	Ourém/PA	290	1° 19' 0" S	47° 7' 0" W
Rio Capivara	Colinas do Tocantins/TO	386	8° 4' 9" S	48° 27' 6" W
Rio Braço Norte	Novo Progresso/PA	465	9° 21' 32" S	54° 54' 14" W

Fonte: Autores (2022).

A Figura 1 apresenta a localização das cinco pequenas bacias hidrográficas e as coordenadas dos seus respectivos exutórios, também estudados por Mendonça *et al.* (2021). Os autores consideraram a Estação Fluviométrica do Sistema de Informações Hidrológicas – HIDROWEB da ANA (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>), como exutórios das bacias, identificando-os da seguinte forma: Q1 (Igarapé da Prata), Q2 (Rio Piranhas),

Q3 (Rio Caeté), Q4 (Rio Capivara) e Q5 (Rio Braço Norte).

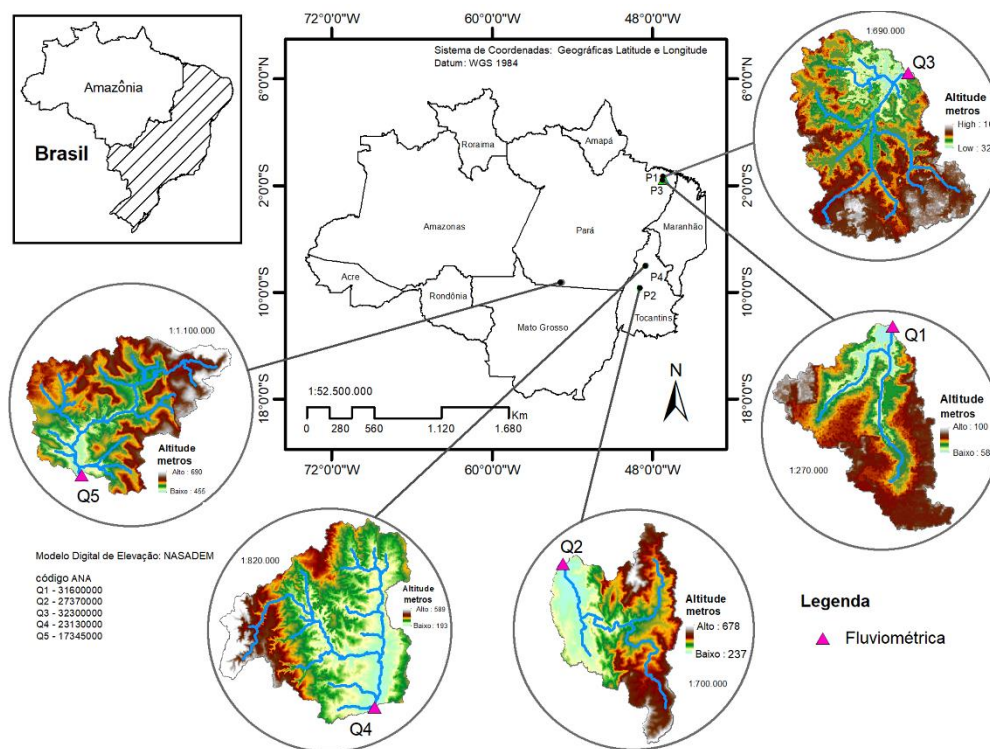
2.1.1 Igarapé da Prata

A pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata está localizada no município de Capitão Poço, no Estado do Pará, com área de drenagem de 32,7 km², cujas coordenadas do exutório são:

1° 39' 8" S de latitude e 47° 7' 0" W de longitude (Lat.: -1.6522; Long.: -47.1167). As classes de solos encontradas na bacia do Igarapé da Prata são o Latossolo Amarelo Distrófico e o Argissolo Vermelho-amarelo Distrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 1999). Sartori, Lombardi e Genovez (2005) comentaram que esta classe pedológica é marcada por altas profundidades e condutividades hidráulicas. Porém, o uso do solo é predominantemente destinado à pastagem, com vegetação forrageira herbácea de espécies cultivadas (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2021). Logo, a dispensa do manejo sustentável do solo ao longo das atividades desenvolvidas compromete as

características físicas do solo, ocasionando mudanças significativas no comportamento hidrológico da bacia ao longo do tempo (MENDONÇA, 2022). O clima desta área é definido como Am, conforme a classificação Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936; GEIGER, 1954), representando um clima tropical com altos índices pluviométricos e baixa variabilidade na temperatura, que sempre está acima dos 18 °C. Segundo os estudos de Mendonça (2022), a variabilidade intra-anual da precipitação na bacia é caracterizada pelo período chuvoso, que é compreendido entre os meses de janeiro e julho, e o período de estiagem, compreendido entre os meses de agosto e dezembro.

Figura 1 - Mapa de localização das pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal



Fonte: adaptado de Mendonça *et al.* (2021).

2.1.2 Rio Piranhas

A pequena bacia hidrográfica do Rio Piranhas, está localizada no município de Abreulândia, no Estado do Tocantins, com área de drenagem de 186 km², cujas coordenadas do exutório são: 9° 36' 13" S de latitude e 48° 58' 15" W de longitude (Lat.: -9.6036; Long.: -48.9708). As classes de solos presentes são o Neossolo

Quartzarênico Órtico e, predominantemente, o Plintossolo Pétrico Concrecionário (MENDONÇA, 2022). Cordeiro *et al.* (2021) constataram que a capacidade de infiltração de água do Plintossolo Pétrico Concrecionário está na faixa de alta a muito alta, em uma área de pastagem degradada no município de Brejinho de Nazaré, local próximo à bacia do Rio Piranhas. A área tem grandes percentuais de vegetação natural florestal primária

(61,51 %), que podem ser descritas como estrato arbóreo-arbustivo com altura de até 18 m. E também, 30,34 % da área é destinada a pastagem, composta com vegetação forrageira herbácea (INPE, 2021). O clima característico da região é o Aw, conforme classificação de Köppen-Geiger, logo, é um clima tropical de savana, pois o mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm, além das temperaturas sempre acima dos 18 °C (ALVARES, *et al.* 2013; ROLDÃO; FERREIRA, 2019).

2.1.3 Rio Caeté

A pequena bacia hidrográfica do Rio Caeté, está localizada no município de Ourém, no Estado do Pará, com área de drenagem de 290 km², cujas coordenadas do exutório são: 1° 19' 0" S de latitude e 47° 7' 0" W de longitude (Lat.: -1.3167; Long.: -47.1167). A classe de solo encontrada na bacia é o Latossolo Amarelo Distrófico (Mendonça, 2022). As classes de uso e ocupação do solo são a vegetação natural secundária (34,25 %), a pastagem (30,09 %) e a vegetação natural primária (11,41 %) (INPE, 2021). Trata-se de uma bacia hidrográfica de baixas altitudes e declividades, moderado percentual de vegetação natural, o que pode favorecer os escoamentos subsuperficiais e subterrâneos. O clima é definido como Am, segundo a classificação Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936; GEIGER, 1954), caracterizando-se por um clima tropical com altos índices pluviométricos e baixa variabilidade na temperatura, que sempre está acima dos 18°C (ALVARES *et al.*, 2013). A variabilidade intra-anual da precipitação na bacia é caracterizada por dois períodos distintos (MORAES, 2005). O período chuvoso é compreendido entre os meses de janeiro e maio, e o período de estiagem é compreendido entre os meses de junho e dezembro (MENDONÇA, 2022).

2.1.4 Rio Capivara

A pequena bacia hidrográfica do Rio Capivara, está localizada no município de Colinas do Tocantins, no norte do Estado do Tocantins, com área de drenagem de 386 km², cujo exutório está sob as coordenadas 8° 4' 9" S de latitude e 48° 27' 6" W de longitude (Lat.: -8.0692; Long.: -48.4517). Há cinco diferentes classes de solos no interior da bacia, sendo estes o Latossolo Vermelho Distrófico (37,39 %), o Neossolo Quartzarênico Órtico (35,75%) e o Latossolo Vermelho-amarelo Distrófico (7,73 %)

(MENDONÇA, 2022). Estes solos são de altas taxas de infiltração. Por outro lado, o argissolo vermelho-amarelo distrófico (9,73 %) e o Neossolo Litólico Distrófico (9,70 %) são as classes que apresentam baixas taxas de infiltração, causadas, principalmente, pelo alto teor de argila e baixas profundidades, respectivamente (SARTORI; LOMBARDI; GENOVEZ, 2005). O principal uso do solo da bacia é a pastagem, com percentual de 70,92 %, seguido da classe vegetação natural secundária, com 15,64 % (INPE, 2021). Na região da bacia, o regime intra-anual das chuvas é definido pelo período chuvoso, que se estende entre os meses de novembro e abril, e pelo período de estiagem, compreendido entre os meses de maio e outubro (MENDONÇA, 2022). O clima característico da região é o Aw, conforme a classificação de Köppen-Geiger, logo, é um clima tropical de savana, pois o mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm, com temperatura média de aproximadamente 26 °C (ALVARES *et al.*, 2013; ROLDÃO; FERREIRA, 2019).

2.1.5 Rio Braço Norte

A pequena bacia hidrográfica do Rio Braço Norte, está localizada no município de Novo Progresso, sul do Estado do Pará, com área de drenagem de 465 km², cujo exutório está sob as coordenadas 9° 21' 32" S de latitude e 54° 54' 14" W de longitude (Lat.: -9.3589; Long.: -54.9039). Esta bacia possui 42 % da sua área de drenagem inseridos na unidade de conservação federal, de proteção integral, Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo (SILVA; BELTRÃO; MORALES, 2021). A classe de solo predominante desta bacia é o Neossolo Quartzarênico Órtico (EMBRAPA, 1999). Segundo Sartori, Lombardi e Genovez (2005), este tipo de solo apresenta alta taxa de infiltração hídrica, e se desfaz com facilidade, o que o torna muito suscetível a erosão hídrica. Além disso, o uso da terra é marcado pela formação natural florestal (18,33 %) e natural não-florestal (80,88 %) (SILVA; BELTRÃO; MORALES, 2021). Ademais, o clima local é Am, conforme a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como clima tropical úmido, com altos índices pluviométricos anuais, bem como apresenta um pequeno período seco (ALVARES *et al.*, 2013). O período chuvoso da região é iniciado em outubro e se estende até o mês de abril, e o período de estiagem estende-se desde o mês de maio até setembro (MENDONÇA, 2022).

2.2 PROJETA – Projeções de Mudança Climática para a América do Sul pelo Modelo Eta

A plataforma PROJETA (Projeções de mudança climática para a América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta) disponibiliza os dados de simulações das projeções climáticas para a América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta. Esse modelo integra informações atmosféricas e oceânicas, além de fornecer previsões climáticas de alta precisão de curto e médio prazo, gerados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O Eta executa projeções de dados e realiza simultaneamente o *downscaling* dinâmico entre o banco de dados fornecidos pelo CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project*), composto de dados observados e de satélite, e os dados projetados pelo seu próprio modelo, gerando os dados históricos fornecidos pelo PROJETA. Os dados para acesso do CMIP5 ficam disponíveis através do portal Earth System Grid, do Centro de Tecnologias de Habilitação (ESG-CET), no endereço eletrônico <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>. Esses dados são resultados de simulações e projeções de modelos globais de centros de pesquisa, contribuindo para a produção dos relatórios do IPCC (MAGALHÃES *et al.*, 2020). Assim, utilizando as coordenadas geográficas dos exutórios das cinco pequenas bacias hidrográficas como entrada (Quadro 1), efetuou-se o *download* dos dados de precipitação diária modeladas pelo ETA-MIROC5 de 1981 a 2005, por meio do endereço eletrônico (<https://projeta.cptec.inpe.br/>). Por conseguinte, foram extraídas as projeções de precipitação diária (2024-2099) para os dois cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5 pelo ETA-MIROC5, configurado com uma resolução de 20 km. Após a obtenção dos dados modelados, foram realizadas as leituras das precipitações para executar as correções de possíveis erros gerados pelo modelo.

2.3 CHIRPS - Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station

Os dados CHIRPS são baseados em uma abordagem prévia de técnicas de interpolação inteligente e estimativas de alta resolução e longos períodos de precipitação com base em observações de infravermelho de duração de nuvem fria (FUNK *et al.*, 2015). Os conjuntos de

dados CHIRPS, CMORPH (*CPC Morphing Technique*) e TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) foram comparados com dados de precipitação na Amazônia. Neste caso, o produto CHIRPS obteve o melhor desempenho nas estimativas de precipitação diária e mensal (CORDEIRO; BLANCO, 2021). Da Motta Paca *et al.* (2020), ao analisar as tendências de precipitação na bacia do rio Amazonas, atestam a qualidade dos dados fornecidos pelo CHIRPS, afirmando que estes são adequados para a bacia do rio Amazonas. Segundo Cavalcante *et al.* (2020), o uso de dados CHIRPS diários em uma grade de 0,05° fornece chuvas médias semelhantes às obtidas com dados de estações pluviométricas localizadas na Amazônia, mas os dados CHIRPS tendem a subestimar os valores dos meses mais úmidos. Assim, para se evitar as lacunas de dados das séries temporais de precipitação das cinco pequenas bacias hidrográficas analisadas, os dados CHIRPS foram tomados como dados observados para o período de 1981 a 2005. Esses dados foram obtidos, utilizando-se a ferramenta *Google Earth Engine* para o ponto de grade referente à localização das estações fluviométricas das bacias em estudo.

2.4 Ajuste de viés com Linear Scaling (LS)

Os dados de projeções futuras de precipitação extraídos precisam ser ajustados, considerando para este um mesmo período de análise (1981-2005). Logo, o Linear Scaling (LS) é uma relação simples de ajuste de viés baseado em média, no qual um fator de ajuste mensal médio é aplicado às projeções diárias das chuvas de um mês (Equação 1).

$$P_{cor,d} = P_{GCM,d} \times \frac{\mu m(P_{sat,d})}{\mu m(P_{proj,d})} \quad (1)$$

Onde $P_{cor,d}$ e $P_{GCM,d}$ são os valores diários das precipitações modeladas corrigidas e não corrigidas, respectivamente; $P_{sat,d}$ é o valor diário de precipitação do satélite (CHIRPS), e $P_{proj,d}$ é o valor diário de precipitação projetada (1981-2005), e μm é a média mensal de longo prazo da precipitação do mês correspondente.

2.5 Verificação do ajuste de viés

Para avaliar o ajuste de viés da precipitação gerada pelo modelo ETA-MIROC5 sem ajuste e ajustado via LS, foram utilizadas as métricas

estatísticas RMSE e eficiência de Kling-Gupta (KGE) e seus três componentes (KGE_r , KGE_α , KGE_β), variando de $-\infty$ a 1, sendo 1 o valor excelente (GUPTA et al., 2009). Esses critérios de desempenho estão disponíveis na biblioteca *Python Hydroeval* (HALLOUIN, 2021). Essas métricas também foram utilizadas para comparação entre os dados observados (CHIRPS) e os dados simulados de precipitação futura do modelo ETA-MIROC5 ajustado, conforme os dois cenários analisados. Não foi necessário fazer nenhuma correção na resolução espacial, pois ambos os dados foram reduzidos à precipitação média mensal acumulada da área de cada pequena bacia hidrográfica dentro da região de estudo. As Equações 2-5 representam o KGE e suas três componentes.

$$KGE = 1 - \sqrt{(1-r)^2 + (1-\alpha)^2 + (1-\beta)^2} \quad (2)$$

$$KGE_r = 1 - \sqrt{(1-r)^2} \quad (3)$$

$$KGE_\alpha = 1 - \sqrt{(1-\alpha)^2} \quad (4)$$

$$KGE_\beta = 1 - \sqrt{(1-\beta)^2} \quad (5)$$

Onde o parâmetro r representa a correlação de Pearson; α representa a variabilidade; e β representa o desvio do viés. Embora haja divergência da comunidade científica sobre a melhor faixa de desempenho do KGE, para determinar se um modelo é “bom” ou “ruim” (KNOBEN et al., 2019), no presente estudo foram adotados níveis de desempenho determinados por Mai et al. (2022) (Tabela 1).

Tabela 1 - Níveis de desempenho estratificados para qualificar um modelo

	Pobre	Médio	Bom	Excelente
KGE_α	$(-\infty, 0.70)$	$(0.70, 0.80)$	$(0.80, 0.90)$	$(0.90, 1.0)$
KGE_β	$(-\infty, 0.70)$	$(0.70, 0.80)$	$(0.80, 0.90)$	$(0.90, 1.0)$
KGE_r	$(-\infty, 0.70)$	$(0.70, 0.80)$	$(0.80, 0.90)$	$(0.90, 1.0)$
KGE	$(-\infty, 0.48)$	$(0.48, 0.65)$	$(0.65, 0.83)$	$(0.83, 1.0)$

Fonte: May et al. (2022)

Além do KGE, adotou-se, também, como coeficiente de desempenho o RMSE (Root Mean Square Error) ou raiz do erro relativo quadrático médio (Equação 6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t}\right)^2}{n}} \quad (6)$$

Onde n é o número de observações; Y_t é a precipitação observada (produto de satélite CHIRPS) no instante t ; e \hat{Y}_t é a precipitação simulada ajustada no instante t .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, são apresentados os resultados da correção de viés da precipitação modelada do ETA-MIROC5 e os dados de satélite CHIRPS, como alternativa aos observados pelas estações hidrometeorológicas, para o período de 1981 a 2005, por meio do método LS. Posteriormente, o ajuste é aplicado para as projeções de chuvas nos cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5, até o final do

século. Outrossim, todas as discussões relevantes também são apresentadas.

3.1 Correção do viés de precipitações históricas simuladas através do modelo ETA-MIROC5

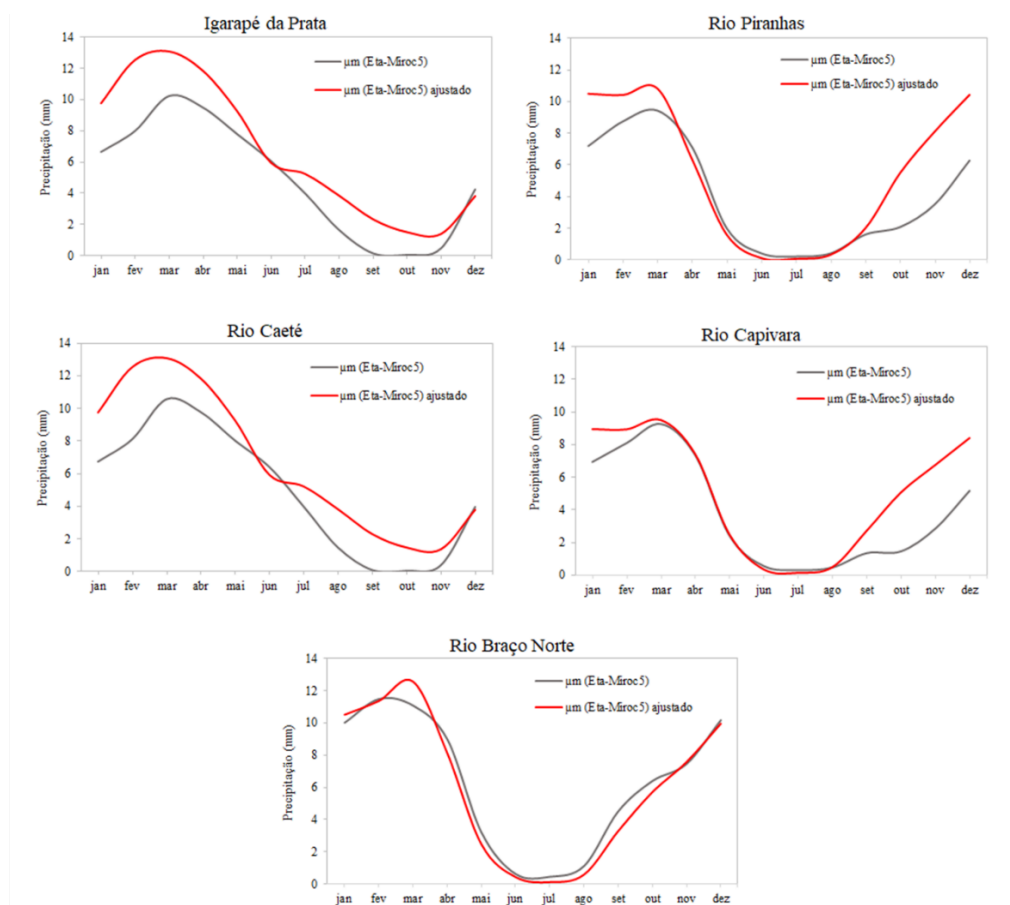
A partir das médias mensais diárias das precipitações simuladas e de satélite (1981 a 2005) foram obtidos, respectivamente, μ_m , d (ETA-MIROC5) e μ_m , d (CHIRPS). Por conseguinte, foi executado o ajuste de viés para a precipitação modelada, representada por μ_m , d (ETA-MIROC5) com ajuste. Na Figura 2 é apresentada a variabilidade do comportamento dos valores da precipitação simulada após o ajuste de viés.

Os estudos de Costa et al. (2023) também analisaram os impactos das mudanças climáticas, entretanto, nas vazões mínimas de referência, utilizando dados de precipitação diária futura da plataforma PROJETA, de duas pequenas bacias hidrográficas localizadas no arco do

desflorestamento. Bem como Zákha *et al.* (2022), que extraíram as precipitações para o clima futuro (2006-2099) também pelo modelo Eta, aplicando o ajuste de viés para simular vazões através modelo climático MHD-INPE, incentivando a aplicação do método de correção neste trabalho. Na Tabela 2 é mostrada a verificação entre os valores das precipitações simuladas pelo ETA-MIROC5 após a aplicação do fator de correção (Equação 1) em relação as chuvas extraídas sem ajuste. Dos três parâmetros que compõem o KGE (r , α e β), o parâmetro de correlação “ r ” obteve resultados abaixo de 0,70 na bacia hidrográfica do Rio Capivara. Isso indica que as projeções de chuva (ETA-MIROC5) no futuro poderiam não ser representativas nessa bacia sem a aplicação do ajuste de viés. Por outro lado, o parâmetro da correlação demonstra que as chuvas simuladas e provenientes do CHIRPS das bacias hidrográficas dos Rio Piranhas e Rio Braço Norte foram

satisfatórias com r igual a 0,93 e 0,99, respectivamente, indicando que o modelo foi eficaz na regionalização das chuvas nessas regiões. Os parâmetros α e β , que estão relacionados à variabilidade e viés, respectivamente, apenas obtiveram resultado médio (valor acima de 0,70) na bacia Rio Braço Norte. Isso indica que os dados das precipitações simuladas sem ajuste de viés nas demais bacias, não seriam representativamente confiáveis para a projeção das chuvas futuras em quatro das cinco bacias. Para se verificar o desempenho após a correção das chuvas, observa-se que: as bacias do Igarapé da Prata e Rio Caeté apresentaram o maior erro entre o modelado ajustado e o observado (dados CHIRPS), com o RMSE igual a 8,9 mm/dia e 9,7 mm/dia. Todavia, de modo geral, os dados modelados com ajuste representam satisfatoriamente o ciclo anual de precipitação da área de estudo (Figura 2).

Figura 2 - Precipitação média diária mensal do Eta-Miroc5 sem ajuste e ajustado para o período de 1981 a 2005 das cinco pequenas bacias hidrográficas



Fonte: Autores (2023).

Tabela 2 - Valores de ajuste e de desempenho de precipitação histórica ETA-MIROC5 em comparação com CHIRPS

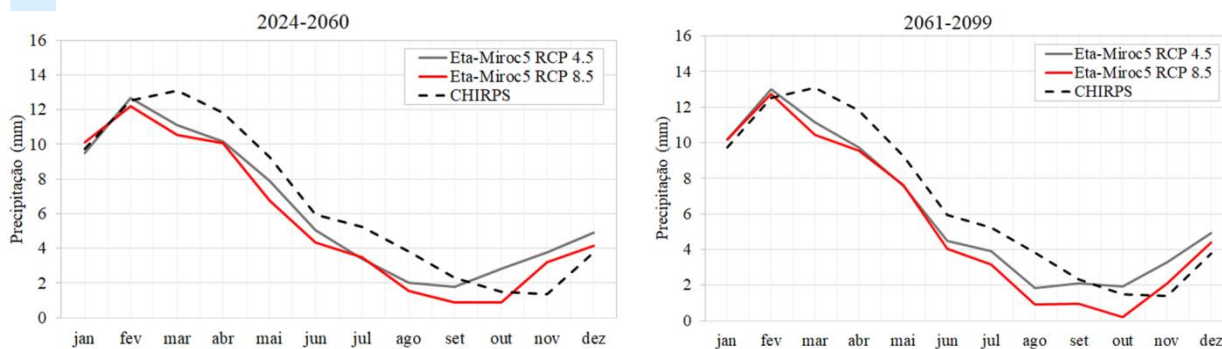
Bacia Hidrográfica	KGE	KGE _r	KGE _α	KGE _β	RMSE
Igarapé da Prata	0.03	0.73	0.14	0.63	8.93
Rio Piranhas	0.42	0.93	0.54	0.65	4.42
Rio Caeté	0.00	0.70	0.10	0.65	9.67
Rio Capivara	0.90	0.55	0.68	0.44	4.44
Rio Braço Norte	0.99	0.99	0.96	0.96	1.22

Fonte: Autores (2023).

3.2 Comparação entre as precipitações futuras e históricas (CHIRPS) de 1981-2005

Nas Figuras de 3 a 7 são apresentadas as projeções futuras das médias diárias mensais de chuvas para os cenários climático futuros otimista

(RCP 4.5) e realista (RCP 8.5) simuladas pelo modelo ETA-MIROC5 e ajustadas pela Equação 1, as quais são comparadas às médias diárias mensais das chuvas históricas (CHIRPS), para as cinco pequenas bacias hidrográficas em estudo.

Figura 3 - Médias diárias de chuvas mensais nos cenários climáticos representativos e CHIRPS – bacia do Igarapé da Prata


Fonte: Autores (2023).

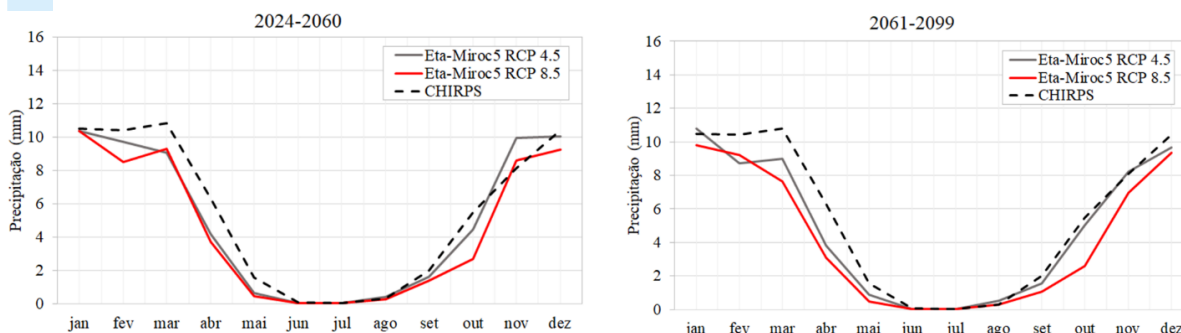
Na pequena bacia hidrográfica do Igarapé da Prata (Figura 3), durante o período de 2024 a 2060, o modelo simula o deslocamento das médias mensais máximas para fevereiro, em relação às chuvas observadas (máximas em março), nos dois cenários climáticos. Quanto às médias mensais mínimas, as projeções indicam o decréscimo na intensidade dessas chuvas futuras, assim como simula o deslocamento temporal das mínimas para setembro no cenário otimista, e para os meses de setembro e outubro, no cenário realista. Projeta-se o decréscimo das médias simuladas, em relação às observadas, de fevereiro a setembro, bem

como, o acréscimo nas médias de outubro a dezembro, nos dois cenários estudados. Durante o período de 2061 a 2099, o modelo simula o deslocamento das médias máximas para fevereiro sem redução da intensidade, em comparação com as observadas. Em relação às médias mínimas, as simulações também indicam o deslocamento temporal para o mês de outubro nos dois cenários, com acréscimo e redução de intensidade das chuvas nos cenários otimista e realista, respectivamente. Relativamente às reduções das médias mensais, observa-se que as chuvas simuladas irão apresentar reduções de março a

setembro no cenário otimista, e de março a outubro, no cenário realista, similar ao analisado no período anterior. Assim, a redução das chuvas, principalmente no final do século, pode afetar as atividades econômicas de Capitão Poço, que tem sua economia impulsionada pela agricultura com cultivo de pimenta-do-reino, laranja, açaí, banana,

dendê, coco-da-baía entre outras culturas. Nesse contexto e sem o adequado manejo sustentável do solo na região, o declínio dessas atividades pode impactar a qualidade de vida das comunidades residentes, devido às mudanças do comportamento hidrológico da bacia do Igarapé da Prata.

Figura 4 - Médias diárias de chuvas mensais nos cenários climáticos representativos e CHIRPS – bacia do Rio Piranhas



Fonte: Autores (2023).

Durante o período de 2024 a 2060, na bacia hidrográfica do Rio Piranhas (Figura 4), a qual está situada em uma região de transição entre a Amazônia e o Cerrado, o modelo simulou o deslocamento temporal das máximas para o mês de janeiro, em comparação com o observado (máximas em março). O modelo simulou, também, a redução da intensidade das chuvas nesses meses, em ambos os cenários climáticos. As projeções apontam que as mínimas ocorrerão de junho a agosto no cenário otimista, e em junho e julho, para o cenário realista. No mais, observa-se redução das médias das chuvas simuladas em relação às observadas, com diminuição do índice do pluviométrico de janeiro a maio, em ambos os cenários, bem como, reduções nos meses de setembro, outubro e dezembro no cenário otimista, e de setembro a novembro, no cenário realista. Novembro é o único mês em que as médias simuladas ultrapassam as observadas. Para o período de 2061 a 2099, o modelo também simulou o deslocamento temporal das máximas para o mês de janeiro, com redução de intensidade apenas no cenário realista. Em relação às mínimas, as médias simuladas ocorrerão em junho e julho, coincidindo com o observado. As médias simuladas irão reduzir de fevereiro a maio, setembro, outubro e dezembro no cenário otimista, bem como, de janeiro a maio, setembro e dezembro, no cenário realista. Ao longo do século,

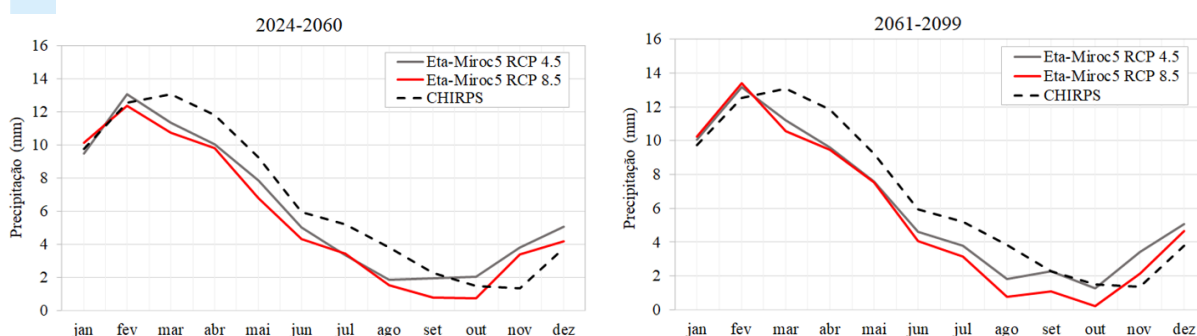
as projeções indicam que as médias mínimas simuladas irão ocorrer com severidade nos meses secos da região, nos quais a média diária mensal não atinge o limiar de 1 mm/dia (junho, julho e agosto), tendo em vista que o clima predominante no bioma Cerrado é o Tropical sazonal de inverno seco, justificando os menores índices pluviométricos observados para esta bacia. Vale ressaltar ainda que o aumento da degradação das áreas de pastagem no município vizinho Brejinho de Nazaré, pode potencializar a ocorrência de eventos hidrológicos extremos (secas e cheias) na bacia hidrográfica do Rio Piranhas.

A pequena bacia hidrográfica do Rio Caeté (Figura 5) está situada na região adjacente à bacia do Igarapé da Prata (Figura 3) e, por isso, percebe-se uma semelhança entre as chuvas observadas nessas duas bacias. Assim, no período de 2024 a 2060, as médias máximas foram projetadas para ocorrer em fevereiro, o que demonstra um deslocamento temporal em relação ao observado (máximas em março), com indicação para a redução da magnitude das chuvas no cenário realista. Nota-se ainda que haverá variações nas médias mínimas das chuvas simuladas, em relação ao observado (mínimas em novembro), com as menores médias sendo projetadas em agosto no cenário otimista, e em outubro, no cenário realista. O modelo simulou a redução das médias das chuvas futuras (em comparação com

às observadas), de março a setembro no cenário otimista, e de fevereiro a setembro, no cenário realista. Ainda neste período, notam-se acréscimos nas médias das chuvas simuladas em novembro e dezembro, nos dois cenários estudados. No período de 2061 a 2099, similarmente ao período anterior analisado, as projeções também indicam o deslocamento temporal das máximas para o mês de fevereiro, com o aumento da intensidade nos dois cenários. Quanto às mínimas, o modelo simulou essas

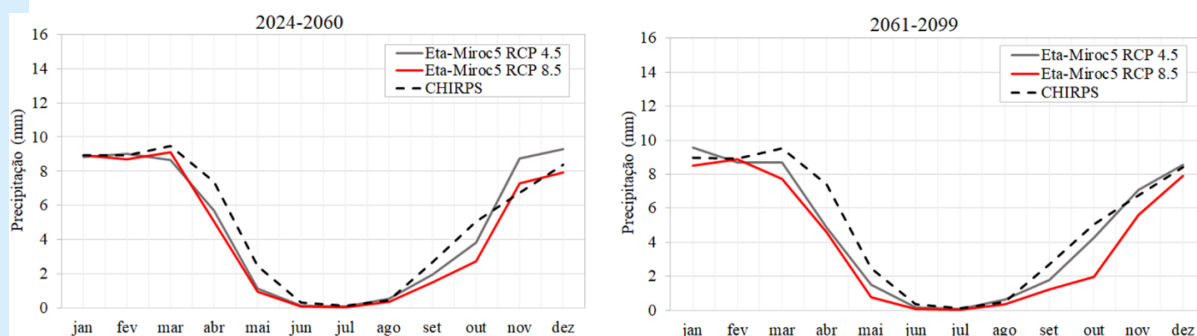
médias com deslocamento temporal para outubro, nas duas hipóteses climáticas, assim como, simulou o decréscimo da intensidade dessas mínimas no cenário realista. Neste segundo período, as projeções apontam para a redução das chuvas futuras de março a agosto e outubro no cenário otimista, e de março a outubro no cenário realista. Entretanto, observa-se que o modelo superestima as médias nos meses de fevereiro, novembro e dezembro em comparação com o observado, em ambas as hipóteses climáticas.

Figura 5 - Médias diárias de chuvas mensais nos cenários climáticos representativos e CHIRPS – bacia do Rio Caeté



Fonte: Autores (2023).

Figura 6 - Médias diárias de chuvas mensais nos cenários climáticos representativos e CHIRPS – bacia do Rio Capivara



Fonte: Autores (2023).

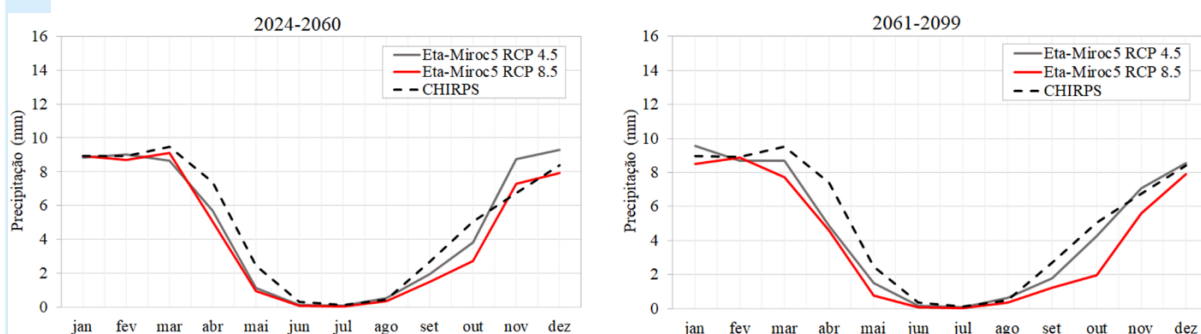
Na pequena bacia hidrográfica do Rio Capivara (Figura 6), para o período de 2024 a 2060, as médias máximas foram projetadas para ocorrer em fevereiro no cenário otimista, e em março, no cenário realista, constatando-se que haverá deslocamento temporal em relação ao observado (máximas em março), com redução na intensidade das máximas simuladas no cenário realista. Conforme as projeções do modelo, as chuvas simuladas apresentaram médias mínimas em junho e julho no cenário otimista, e em junho,

julho e agosto, no cenário realista, indicando deslocamento temporal em comparação com o observado (mínimas em junho, julho e agosto) apenas no cenário otimista. Além disso, o modelo simulou reduções das chuvas futuras para os meses de janeiro, março, abril e maio no cenário otimista, e de fevereiro a maio, no cenário realista, assim como, em setembro e outubro nos dois cenários. Para o período de 2061 a 2099, projetase o deslocamento das médias máximas para janeiro e fevereiro, nos cenários otimista e realista,

respectivamente, com redução de intensidade das chuvas no último cenário climático. Em relação às mínimas, o deslocamento temporal das médias mínimas simuladas irá ocorrer similarmente ao período anterior analisado. Outrossim, o modelo simulou que haverá reduções das chuvas futuras de fevereiro a maio na hipótese otimista, e de janeiro a maio, na hipótese realista, bem como, em setembro e outubro nos dois cenários. Contudo, o modelo superestimou as médias nos meses de janeiro, novembro e dezembro em comparação com o observado no cenário otimista. Salienta-se

que a bacia do Rio Capivara também está situada na região de transição entre a Amazônia e o Cerrado, assim como a bacia do Rio Piranhas (Figura 4). A redução das precipitações simuladas pode levar a redução de vazão dos rios nas bacias hidrográficas em estudo, causando transtornos às comunidades da bacia, podendo afetar setores econômicos importantes, como turismo, produção de energia hidrelétrica e agricultura (BENISTON, 2012). Dessa maneira, essas comunidades podem ser confrontadas com desastres naturais devido a secas mais frequentes.

Figura 7 - Médias diárias de chuvas mensais nos cenários climáticos representativos e CHIRPS – bacia do Rio Braço Norte



Fonte: Autores (2023).

Para o período de 2024 a 2060, não haverá deslocamento temporal das médias máximas e mínimas das chuvas simuladas na pequena bacia hidrográfica do Rio Braço Norte (Figura 7). No entanto, o modelo subestimou as máximas nos dois cenários, isto é, projeta a redução dos índices pluviométricos na bacia em qualquer um dos cenários. Neste mesmo cenário, o modelo simulou reduções das chuvas futuras de janeiro a maio, bem como, em setembro e outubro, nos dois cenários. Para o período de 2061 a 2099, as projeções são similares ao observado no período anteriormente analisado, em relação à intensidade das médias máximas e mínimas simuladas. Notam-se reduções das chuvas no cenário otimista, em comparação ao período anterior, com decréscimo das médias simuladas nos meses de fevereiro a maio, setembro, outubro e dezembro, por outro lado, no cenário realista, observa-se que as reduções serão mais atenuadas neste período, com decréscimo de janeiro a maio. Ademais, o modelo superestimou as médias nos meses de janeiro e novembro, no cenário otimista. Logo, as mudanças climáticas, isoladamente, não influenciarão nas reduções de chuva nesta bacia.

Tendo em vista a amplitude territorial da região amazônica, observa-se a variação da sazonalidade das chuvas na área de estudo, com a predominância dos meses secos de maio a setembro nas bacias do Rio Piranhas, Rio Capivara e Rio Braço Norte, e de setembro a dezembro nas bacias do Igarapé da Prata e Rio Caeté. De modo geral, os resultados mostram que as maiores reduções dos índices pluviométricos ocorrerão para o cenário RCP 8.5, como era esperado, nas bacias que estão situadas na transição entre a Amazônia e o Cerrado. No entanto, são necessários estudos mais aprofundados nessas bacias para se analisar se as reduções de precipitação não afetarão setores econômicos estratégicos, tais como: produção de energia hidrelétrica em pequena escala, turismo, agricultura, entre outras atividades.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou uma interpretação do possível impacto das mudanças climáticas nas chuvas ao longo do século XXI, sob uma perspectiva da interdependência entre a

construção de uma sociedade mais resiliente e ciente das adaptações necessárias aos recursos hídricos e suas variáveis, visto que as reduções das precipitações em cenários climáticos futuros, pressupõem também redução de vazões, impactando no comportamento e disponibilidade hídrica dos rios das bacias hidrográficas em estudo.

Para a correção de viés nas projeções do modelo ETA-MIROC5, foi aplicado o método Linear Scaling (LS) com a verificação do desempenho. Por conseguinte, constatou-se nas pequenas bacias hidrográficas analisadas: 1) Igarapé da Prata, ao longo do século, o modelo subestimou, sobretudo, as médias diárias mensais mínimas simuladas no cenário realista, em comparação com o observado; 2) Rio Piranhas, as projeções indicaram que as médias mínimas simuladas irão ocorrer em meses de estiagem na região (junho, julho e agosto) ao longo do século. Ressaltando que, o aumento da degradação das áreas de pastagem no município vizinho Brejinho de Nazaré, pode potencializar a ocorrência de eventos hidrológicos extremos (secas e cheias) nessa bacia; 3) na pequena bacia hidrográfica do Rio Caeté, durante o período de 2024 a 2060, o modelo simulou a redução das médias das chuvas futuras, em relação ao observado, entre os meses de março e setembro no cenário otimista, e entre fevereiro e setembro, no cenário realista. Já para o período de 2061 a 2099, as projeções apontam para a redução das chuvas futuras entre os meses de março e agosto e outubro no cenário otimista, e entre março e outubro no cenário realista; 4) na pequena bacia do Rio Capivara; no período de 2024 a 2060, o modelo simulou reduções das chuvas futuras para os meses de janeiro, março, abril e maio no cenário otimista, e entre fevereiro e maio, no cenário realista, assim como, em setembro e outubro nos dois cenários. Já para o período de 2061 a 2099, as projeções apontam para a redução das chuvas futuras, com médias inferiores ao observado entre os meses de março e agosto; e outubro no cenário otimista; e entre março e outubro no cenário realista; 5) na pequena bacia hidrográfica do Rio Braço Norte, não haverá deslocamento temporal das médias máximas e mínimas das chuvas simuladas ao longo do século. Assim, as mudanças climáticas, isoladamente, não influenciarão nas reduções de chuva desta bacia.

De modo geral, os resultados mostraram que as maiores reduções dos índices pluviométricos ocorrerão para o cenário RCP 8.5, como era

esperado, nas bacias que estão situadas na transição entre a Amazônia e o Cerrado. Logo, este estudo torna-se útil, tanto para os gestores de águas dessas regiões quanto para as comunidades dessas pequenas bacias hidrográficas, que podem executar um planejamento para mitigar e/ou reverterem consequências de eventos extremos (secas e cheias) devido às influências das mudanças climáticas. Além disso, a metodologia apresentada para a obtenção das séries de dados futuros de precipitação é de fácil aplicação e de baixo custo computacional, mostrando-se eficiente para o estudo proposto e incentivando a aplicação da metodologia em outras bacias hidrográficas. No entanto, é importante salientar que as reduções da precipitação podem ser diretamente influenciadas pelas atividades humanas, ou seja, utilização do solo e desmatamento. Sendo necessários estudos mais aprofundados nessas bacias para se avaliar se as reduções de precipitação não afetarão setores econômicos estratégicos, tais como: turismo, agricultura, entre outras atividades produtivas das pequenas comunidades que habitam as pequenas bacias hidrográficas em estudo.

5 FINANCIAMENTO DA PESQUISA

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES, que forneceu uma bolsa de mestrado e uma de doutorado através do código de financiamento 001; e do CNPq, fornecendo o suporte financeiro desta pesquisa por meio da concessão de uma bolsa de produtividade em pesquisa (Processo n. 308147/2021-9) e uma bolsa de doutorado.

6 AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da Universidade Federal do Pará (UFPA), pela resistência e contribuição no avanço da pesquisa científica na Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2016. p. 95, 2016. Disponível em:

<<http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf>>. Acesso em: dez. 2021.

ALBUQUERQUE, M. F. D. Precipitação nas mesorregiões do estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, n. 6, p. 151-163, 2010.

ALEMAN, J. C. *et al.* Tree cover in Central Africa: determinants and sensitivity under contrasted scenarios of global change. **Scientific Reports**, v.7, n. 41393, 30 jan. 2017.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BENISTON, M. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. **Journal of Hydrology**, v. 412-413, p. 291-296, 2012.

BRITO, A. M. **O desempenho da UHE Belo Monte em um cenário de mudanças climáticas de longo prazo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) - Centro de Desenvolvimento Sustentável – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

BURKHART, H. E. *et al.* Regional Simulations of Loblolly Pine Productivity with CO₂ Enrichment and Changing Climate Scenarios. **Forest Science**, v. 64, n. 4, p. 349-357, apr. 2018.

CARVALHO, M. Â. V. D.; OYAMA, M. D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: Aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 28(3), p. 305-316, set. 2013.

CAVALCANTE, R. B. L. *et al.* Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, jul. 2020, article id. 104879.

CHAUDHARY, S.; DHANYA, C. T. Investigating the performance of bias correction algorithms on satellite-based precipitation estimates. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*. SPIE, v. 11149, p. 279-285, 2019.

COPERTINO, M. *et al.* Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 71, n. 4, out./dez. 2019.

CORDEIRO, A. L. M.; BLANCO, C. J. C. Assessment of satellite products for filling rainfall data gaps in the Amazon region. **Natural Resource Modeling**, v. 34, n. 2, 19 feb. 2021.

CORDEIRO, D. G. *et al.* Análise do desempenho do modelo de Kostiakov na determinação da velocidade básica de infiltração em plintossolo pétrico concrecionário. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 11, n. 1, 30 mai. p. 135-142, 2021.

COSTA, A. S. *et al.* Regionalização de curvas de permanência de vazão de regiões hidrográficas do estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 413-422, dez. 2012.

COSTA, C. E. A. S.; *et al.* Curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. **Journal of Water and Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 760-770, 2019.

COSTA, G. K. L. *et al.* Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, e6, 2023.

DROUET, L.; BOSETTI, V.; TAVONI, M. Selection of climate policies under the uncertainties in the Fifth Assessment Report of the IPCC. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 10, p. 937-940, oct. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1–21, 8 dec. 2015.

GEIGER, R. Landolt-Börnstein–Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie Vol. 3. Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen. **Springer**, Berlin, p. 603-607, 1954.

GUPTA, H. V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, oct. 2009

HALLOUIN, T. Hydroeval: an evaluator for streamflow time series in Python. 22 abr. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Amazônia Legal. Base de Dados. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/amazonialegal.shtm?c=2>. Acesso em: 11 mar. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Mapeamento do uso e cobertura da terra no Cerrado, Projeto TerraClass Cerrado. 2018. Disponível em: <https://www.terraclass.gov.br/geoportal-cerrado/>. Acesso em: dez. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Mapeamento do uso e cobertura da terra na Amazônia Legal, Projeto TerraClass Amazônia Legal. 2014. Disponível em: <https://www.terraclass.gov.br/geoportal-aml/>. Acesso em: dez. 2021.

KOPPEN, W. Das geographische system der klimat. Handbuch der klimatologie, p. 46, 1936.

LIMA, V. S. D. **EtaModelCC**: um pacote R para visualização de dados de mudanças climáticas geradas pelo CPTEC/INPE. 2019. Artigo de Conclusão de Curso (Bacharelado em Computação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2019.

MAGALHÃES, A. J. *et al.* Veranicos no Brasil: Observações e Modelagens (CMIP5). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 597-626, out./dez. 2020.

MAURER, E. P. *et al.* The utility of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California. **Hydrology and Earth System Science**, v. 14, n. 6, p.1125-1138, 2010.

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon Basin: a historical review and current

State-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 01-19, 2006.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARENGO, J. A. *et al.* **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2009.

MARENGO, J. A.; SOUZA JUNIOR, C. Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: ALANA, 2018. 33 p.

MENDONÇA, L. M. **Redes Neurais Recorrentes para Modelagem Chuva-vazão de Pequenas Bacias Hidrográficas da Amazônia**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, 2022. 105p.

MENDONÇA, L. M. *et al.* Modelagem chuva-vazão via redes neurais artificiais para simulação de vazões de uma bacia hidrográfica da Amazônia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2021, 18 mai. 2021.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MORAES, B. C. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 207–214, jun. 2005.

MOTTA PACA, V. H. *et al.* Variability of trends in precipitation across the Amazon river basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. **Water** (Switzerland), v. 12, n. 5, 27 apr. 2020.

OPPENHEIMER, M. *et al.* Emergent risks and key vulnerabilities. *In*: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken *et al.*, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 1039–1099, 2014.

PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.

PORTER, J. J.; DEMERITT, D.; DESSAI, S. The right stuff? Informing adaptation to climate change in British local government. **Global Environmental Change**, v. 35, p. 411-422, nov. 2015.

ROLDÃO, A. F.; FERREIRA, V. O. Climatologia do Estado do Tocantins – Brasil. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 29, n. 59, out./dez. 2019.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, São Paulo, n. 103., p. 41-54, 2014.

SANTANA, L. R.; BLANCO, C. J. C. Contribution to the classification of small catchments according to the drainage area. **International Journal of River Basin Management**, p. 1-12, jun. 2020.

SANTOS, M. R. S.; VITORINO, M. I.; PIMENTEL, M. A. S. Vulnerabilidade e mudanças climáticas: análise socioambiental em uma mesorregião da Amazônia. **Revista Ambiente & Água**, Belém, v. 12, n. 5, p. 842-854, out. 2017.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, out./dez 2005.

SCHARDONG, A., SIMONOVIC, S. P., GARCIA, J. I. B. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 11, n. 2, p. 53–65, jul./dez. 2014.

SILVA, M. G.; BELTRÃO, N. E. S.; MORALES, G. P. Avaliação e mapeamento dos serviços ecossistêmicos ofertados pela Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo, Pará, Brasil. **Geosul**, v. 36, n. 78, p. 516-536, 2021.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia da Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, set. 2013.

SOITO, J. L. S.; FREITAS, M. A. V. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3165-3177, 2011.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia**. Ciência e aplicação. 3.ed. reimp. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2004.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE R. T. Regionalização hidrológica. *In*: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p.3-13, 2003.

WATANABE, M. *et al.* Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

KIDD, C.; HUFFMAN, G. Global precipitation measurement. **Meteorological Applications**. v. 18, n. 3, p. 334-353, sept. 2011.

TANG, L. *et al.* An improved procedure for the validation of satellite-based precipitation estimates. **Atmospheric Research**, v.163, p. 61-73, sept. 2015.

ZÁKHIA, E. M. S. *et al.* Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 667-681, out./dez. 2022.