Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ALTERAÇÕES NAS PRECIPITAÇÕES EM PEQUENAS BACIAS EM FUNÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Changes in precipitation in small basins due to climate change

Cambios en las precipitaciones en cuencas pequeñas debido al cambio climático

Lucas Gomes Rodrigues
Faculdade de Engenharia Civil
Campus Universitário de Tucuruí
Universidade Federal do Pará CAMTUC/UFPA.
Tucuruí, Pará, Brasil
lucas.rodrigues@ufpa.br

Evanice Pinheiro Gomes
Faculdade de Engenharia Civil
Campus Universitário de Tucuruí
Universidade Federal do Pará CAMTUC/UFPA
Tucuruí, Pará, Brasil
gomesevanice@ufpa.br

Resumo: Há fortes evidências de que as mudanças climáticas estão afetando o ciclo hidrológico, e, consequentemente, atingindo as atividades que dependem dos recursos hídricos, especialmente nas pequenas bacias hidrográficas, nas quais eventos extremos, como secas e inundações, são mais impactantes, por terem menor suporte técnico, financeiro e estarem mais isoladas. Assim, neste estudo realizam-se previsões das precipitações na bacia do Uraim, considerando as mudanças climáticas. Utilizaram-se os modelos climáticos MIROC5 e HadGEM2-ES para os cenários RCP4.5 e

RCP8.5, a fim de simular as chuvas no período de 2011 a 2100. Os resultados revelaram uma tendência de redução média nas precipitações, em ambos os cenários. Em relação à análise de desempenho dos modelos, verificou-se que o MIROC5 apresentou melhor simulação, contudo, o coeficiente de Nash manteve-se na faixa de 0,5 em comparação aos dados observados e simulados, no período compreendido entre os anos de 2006 a 2020. As simulações produzidas, juntamente à avaliação do uso do da terra (MApBiomas), na região, apontam que esses dois fatores podem atuar na redução da disponibilidade de recursos hídricos.

Palavras-chave: Modelos Climáticos. Projeções de Chuva. Impacto Climático.

Abstract: There is strong evidence that climate change is affecting the hydrological cycle and, as a result, impacting activities that depend on water resources, especially in small river basins, where extreme events such as droughts and floods have a greater impact because of limited technical and financial support and greater geographic isolation. Therefore, this study aims to project precipitation in the Uraim basin considering climate change. The MIROC5 and HadGEM2-ES climate models were applied under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios to simulate precipitation for the period from 2011 to 2100. The results revealed a trend toward a mean reduction in precipitation under both scenarios. Model performance analysis showed that MIROC5 provided the best simulation results; however, the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) reached approximately 0.5 when observed and simulated data were compared for the period from 2006 to 2020. The precipitation projections, combined with land-use assessment data (MapBiomas) for the region, indicate that these two factors may jointly reduce the availability of water resources

Keywords: Climate Models. Rainfall Projections. Climate Impact.

Resumen: Existe evidencia sólida de que el cambio climático está afectando el ciclo hidrológico y, en consecuencia, las actividades que dependen de los recursos hídricos, especialmente en pequeñas cuencas hidrográficas, donde eventos extremos como sequías e inundaciones tienen mayor impacto debido a su limitado apoyo técnico y financiero y a su mayor aislamiento. Por lo tanto, este estudio busca pronosticar las precipitaciones en la cuenca del Uraim, considerando el cambio climático. Se utilizaron los modelos climáticos MIROC5 y HadGEM2-ES para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para simular las precipitaciones de 2011 a 2100. Los resultados revelaron una tendência a la reducción de la precipitación media en ambos escenarios. En el análisis del desempeño de los modelos, se encontró que MIROC5 presentó una mejor simulación; sin embargo, el coeficiente de Nash–Sutcliffe se ubicó en el rango de 0,5 al comparar los datos observados y simulados, en el período comprendido entre 2006 y 2020. Las simulaciones realizadas, junto con la evaluación del uso del suelo (MApBiomas), en la región, muestran que estos dos factores pueden actuar para reducir la disponibilidad de recursos hídricos.

Palabras clave: Modelos climáticos. Proyecciones de precipitaciones. Impacto climático.

Submetido em: 30/09/2025
Aceito para publicação em: 05/11/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

No sexto relatório (AR6) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (*IPCC*), lançado em 2023, destaca-se que há evidências de que as mudanças climáticas estão afetando o ciclo hidrológico, e consequentemente as atividades que dependem dos recursos hídricos, como o abastecimento público, a pesca, navegação, irrigação.

Conforme informações do Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI, 2024) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2024), há uma intensificação de ocorrência de eventos extremos de precipitações devido a fatores como aquecimento global e as variabilidades climáticas associadas a fenômenos com El niño e La niña, evidenciando ainda mais as buscas por métodos e estratégias de mitigação e adaptação nas bacias hidrográficas brasileiras.

Estudos têm revelado que as mudanças climáticas constituem também resultantes de atividades humanas. Assim, cresceu o interesse em investigar os possíveis impactos desses fenômenos no meio ambiente (Giang et al., 2017; Hatfield et al., 2020). De acordo com Kiefer et al. (2021), as alterações no clima têm provocado mudanças notáveis nos padrões de chuva, afetando, diretamente, as bacias hidrográficas, particularmente, a região Amazônica.

A elevação na ocorrência dos eventos extremos de chuva e a maior variabilidade climática incentivam estudos relativos a pequenas bacias hidrográficas, pois nelas as consequências a respeito dos eventos extremos como secas e inundações são mais impactantes, por terem menor suporte técnico, financeiro e estarem mais isoladas. Análises do comportamento do Clima, realizado por Marengo et al. (2024), destacam que a região Amazônica tem apresentado variabilidade de chuva diversificada tanto em escala local quanto regional, reforçando a importância de avaliação das mudanças climáticas em escala menor, como nas pequenas bacias da Amazônia.

Assim, visando avaliar as condições de mudanças climáticas relacionadas às alterações de chuva em pequenas bacias, no presente estudo, busca-se analisar o comportamento dessa variável considerando os cenários de mudanças climáticas estabelecidos pelo IPCC. Tais cenários, chamados de *RCP* (*Representative Concentration Pathways*), representam as condições atmosféricas do Planeta Terra, considerando as

projeções de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e impactos no clima global. O IPCC descreve 4 cenários futuros de emissões de poluentes atmosféricos. Os cenários futuros possuem um número associado para representar o valor do fluxo radiativo ao término do século XXI em W/m², sendo 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 (Aleman et al., 2017).

Para este estudo, elencaram-se os cenários RCP4.5, que representam um cenário intermediário de estabilização das emissões, e o RCP8.5, que reflete um cenário de emissões elevadas sem medidas efetivas de mitigação. Os RCPs são utilizados como parâmetros dos modelos de circulação global – *General Circulation Models* (*GCMs*) e dos *Global Hydrological Models* (*GHMs*) para suas simulações, pois, a partir deles, são representados os futuros processos físicos na atmosfera, oceanos, rios e superfície terrestre (Costa et al., 2019).

Os GCMS ou os GHMs consistem em modelos climáticos que buscam simular características gerais do clima futuro, na escala de décadas ou séculos, considerando as modificações antropogênicas e naturais (Sampaio; Dias, 2014). De acordo com McWilliams (2019), para previsões mais complexas do clima global, deve ocorrer o acoplamento de diversos modelos que consideraram todo o sistema climático, ou seja, as interações mútuas da atmosfera com a hidrosfera, a biosfera e a criosfera.

Desde 1904, quando o cientista Vilhelm Bjerknes desenvolveu o "teorema da circulação generalizada", o qual fundamentou o desenvolvimento dos GCMs, até os dias atuais, houve uma expansão na criação de GCMs nas diversas regiões do planeta. Exemplos destes são os *Hadley Centre Global Environmental Model Version 2* (*HadGEM2*) e o *Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 5* (*MIROC5*). Destaca-se o modelo britânico *HadGEM2* com acoplamento *ES* (*Earth System*), o qual permite compreender as contribuições dos *feedbacks* biogeoquímicos para a evolução do sistema climático global, pois não necessita de correções de fluxos atmosféricos (BETTS et al., 2015).

O modelo japonês MIROC5 foi desenvolvido para melhor simulação da variabilidade climática influenciadas por fenômenos climáticos. E simula o ENOS de forma mais realista que outros, a fim de projetar, eficientemente, a precipitação climatológica, principalmente para a área de influência da ZCIT, como é o caso da Amazônia (WATANABE et al., 2010).

Mesmo com suas diferenças, de maneira geral, os GCMs já são utilizados em diversos estudos, em nível internacional, para previsões de possíveis eventos extremos, subvencionando a prevenção dos impactos sociais e econômicos causados por desastres

naturais. Porém, alguns modelos podem gerar resultados diferentes com acoplamento de outros modelos, ou são mais precisos em regiões específicas que em outras (Almagro et al., 2020; De Oliveira Serrão et al., 2023).

Dessa forma, considerando-se as projeções de precipitação para pequenas bacias amazônicas diante desses cenários futuros, por meio da aplicação dos GCMs, é possível avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a bacia hidrográfica do Rio Uraim, área de estudo deste trabalho. Além de contribuir para a compreensão dos impactos das alterações climáticas sobre a disponibilidade hídrica regional, subsidiar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos, bem como propor estratégias de adaptação aos eventos extremos identificados.

Nesse sentido, busca-se estimar o comportamento futuro das chuvas em cenários de mudança climática, incorporando a evolução temporal do uso e cobertura da terra. Os resultados poderão instrumentalizar o controle da disponibilidade hídrica regional, garantindo suporte ao planejamento de usos múltiplos, tais como o consumo humano, a agricultura, a pesca e o transporte hidroviário, dependentes do volume pluviométrico.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Uraim (figura 1), está localizada na mesorregião do Sudeste Paraense entre os limites dos municípios de Paragominas (105.550 habitantes) Nova Esperança do Piriá (20.478 habitantes). Possui uma área de 5076,4 km², o comprimento do curso d'água principal, rio Uraim, da nascente até a foz de 145 km (IBGE,2022). De acordo com dados do projeto MapBiomas (2023), a bacia do rio Uraim caracteriza-se por uma combinação de áreas de agricultura intensiva, com ênfase na produção de grãos, pastagens e algumas áreas remanescentes de vegetação nativa além da área metropolitana da cidade de Paragominas.

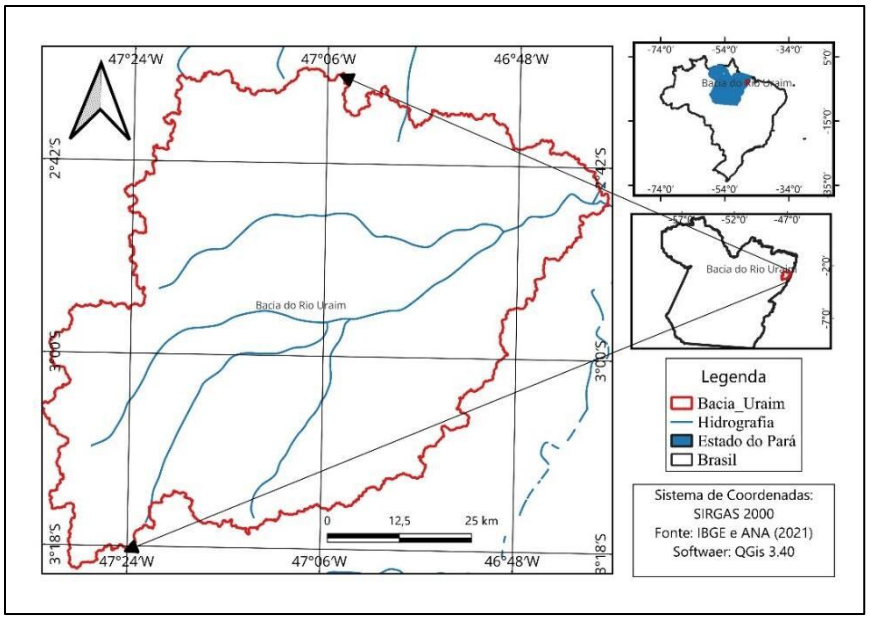
A dinâmica de uso do solo na bacia, juntamente às atividades econômicas predominantes, exerce influência direta na demanda hídrica da região, além de impactar a qualidade e a quantidade de água disponível, sobretudo em períodos de maior pressão agrícola e pecuária. O uso do solo da região, no que se refere à expansão agrícola e

degradação de matas, pode auxiliar nos efeitos de mudanças no clima e alterações no ciclo hidrológico (INPE, 2020). Uma grande porção da malha urbana de Paragominas é cortada pelo Rio Uraim. Assim, estabelece-se uma relação de forte dependência e proximidade entre a população e esse recurso, essencial ao atendimento de suas múltiplas demandas.

O clima da região é do tipo Aw, conforme a classificação de Köppe, (quente e úmido, estação seca bem definida) e BlwA'a' classificação de Thornthwaite, (clima tropical úmido, com déficit hídrico). As temperaturas médias do ar variam em torno de 25, 6° C a 27,8°C, as temperaturas médias são elevadas durante todo o ano (EMBRAPA, 2005).

A região onde está inserida a bacia do rio Uraim caracteriza-se por possuir índices pluviométricos maiores que 1000mm/ano, típicos do bioma amazônico. Nos meses de dezembro a maio, os índices pluviométricos são maiores e, nos meses de junho a novembro, o volume de chuva apresentado na região é inferior (De Souza et al., 2016).

Figura 1 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do rio Uraim no município de Paragominas/PA



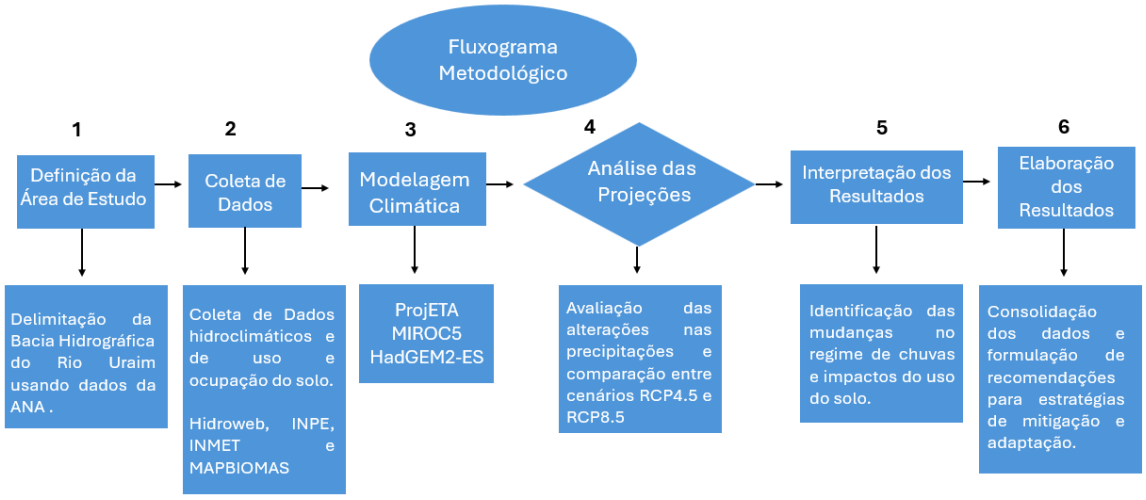
Fonte: Autores (2026).

2.2 Procedimentos metodológicos

O estudo segue o fluxograma apresentado na figura 2. Inicialmente, a bacia hidrográfica do Rio Uraim foi georreferenciada com base em informações da HIDROWEB (ANA). Posteriormente, recolheram-se dados de previsões do INPE e projeções futuras dos modelos climáticos MIROC5 e HadGEM2-ES para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, nos períodos

de 2011-2100. Informações de uso e a cobertura do solo do MapBiomas são adotadas para correlacionar os efeitos das alterações climáticas com as atividades locais de uso do solo. As previsões são geradas por meio do ProjETA, possibilitando a organização dos resultados e análises das mudanças climáticas na precipitação.

Figura 2 – Fluxograma metodológico



Fonte: Autores (2026).

2.3 Bases de Dados

Consideraram-se arquivos *shapefile* da base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). Utilizaram-se estes dados para a delimitação da bacia hidrográfica do Rio Uraim mediante o *software* QGIS. Essa etapa é fundamental para restringir a área de estudo estritamente ao seu limite territorial em relação à sua inserção na plataforma ProjETA, viabilizando as simulações dos modelos climáticos.

A série de precipitação anual, da estação Pluviométrica Cafezal (cód. 247005) do período de 2006 a 2024, foi extraída do banco de dados da Hidroweb da ANA. Elencou-se esta série em virtude de já conter dados consistidos, o que significa que foram tratados, retirando possíveis valores incoerentes. Estes foram utilizados para comparar os valores de precipitação reais medidos na bacia com aqueles simulados pelos modelos climáticos (MIROC5 e HADGEM2-ES), a fim de avaliar seu desempenho.

Os dados adotados de uso e ocupação da terra foram os da coleção 9 do Mapbiomas, equivalente ao período de 1985 a 2023, os quais reconstroem informações anuais de uso e cobertura da terra, com base na floresta aleatória aplicada ao arquivo *Landsat*, por meio de

uso do *Google Earth Engine*. São organizados em cinco classes principais: floresta, formação natural não florestal, agricultura, áreas não vegetadas e águas. Tais classes subdividem-se ainda em níveis que ampliam o detalhamento da cobertura da terra na resolução de 30 metros por pixel. (MAPBIOMAS, 2024). As informações de uso e ocupação da terra, na área de estudo, foram utilizadas para associar a dinâmica desses dados à necessidade de planejamento de uso da bacia hidrográfica do Uraim.

2.4 Modelos climáticos

Para estimar as precipitações com influência das mudanças climáticas, utilizam-se projeções de variáveis atmosféricas fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Estas baseiam-se em dados históricos gerados pelo modelo climático regional ETA. Desenvolvido originalmente pela Universidade de Belgrado e pelo Instituto de Hidrometeorologia da antiga Iugoslávia, o ETA foi implementado como modelo operacional no Centro Nacional de Previsão Ambiental dos Estados Unidos (NCEP). Em 1996, ele foi adaptado e instalado no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE, complementando a previsão numérica de tempo no Brasil (Mesinger et al., 1988; Black, 1994). Para este estudo, são usados dados de projeções baseados nos modelos climáticos MIROC5 e HADGEM2-ES, que integram os cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5. O HadGEM2 significa *Hadley Center Global Environment Model* versão 2. A família de modelos HadGEM2 compreende uma gama de configurações de modelos específicos que incorporam diferentes níveis de complexidade, mas com uma estrutura física comum. A família HadGEM2 inclui uma configuração atmosfera-oceano acoplada, com ou sem uma extensão vertical na atmosfera para a inclusão de uma estratosfera bem resolvida, e uma configuração Terra-Sistema que inclui vegetação dinâmica, biologia oceânica e química atmosférica" (MET OFFICE, 2024). O produto gerado pelo HadGEM2 consiste em realizar projeções climáticas detalhadas que permitem avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas em escala global, sob diferentes cenários de emissões de GEE.

O Denominado *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (*MIROC*), ou Modelo para Pesquisa Interdisciplinar sobre o Clima, foi desenvolvido pela Universidade de Tóquio (NIES), vinculada à Agência de Ciência e Tecnologia Terro-Maritima do Japão e ao *Center of*

Climate System Research (*CCSR*). Esse modelo teve várias versões, como MIROC3, MIROC3.2 e, atualmente, MIROC5, em que diversas condições foram aprimoradas e readaptadas para melhor desempenho (Watanabe et al., 2010). O MIROC5, assim como o HadGEM2, gera projeções climáticas futuras fundamentais para analisar os impactos das emissões de gases do efeito estufa no clima, aplicando-se para pesquisas de condições futuras do clima e avaliações de riscos climáticos.

Os modelos HadGEM2 e MIROC5 consideram, em suas projeções, cenários do comportamento das condições atmosféricas influenciadas pela emissão de GEE, produzidos pelas sociedades globais, ou seja, as ações humanas quanto ao cenário de desenvolvimento mais sustentável ou não, os quais interferem na temperatura do planeta. Entre os principais GEE emitidos estão o dióxido de carbono (CO_2), proveniente, principalmente, da queima de combustíveis fósseis em setores como transporte, geração de energia e indústrias (IPCC, 2021),o Metano (CH_2), que é emitido durante práticas agrícolas, particularmente no contexto do cultivo de gado, bem como por meio de atividades associadas à geração e gerenciamento de resíduos (Saunois et al., 2020); óxido nitroso (N_2O), que é liberado, predominantemente, por métodos agrícolas e pela aplicação de fertilizantes à base de nitrogênio (Davidson; Kanter, 2014); e hidrofluorcarbonos (HFCs), utilizados em várias aplicações industriais e tecnologias de refrigeração (Montzka et al., 2018). O acúmulo dessas emissões na atmosfera intensifica o efeito estufa, contribuindo, assim, para o aquecimento global, que modelos climáticos como o HaDGEM2 e o MIROC5 buscam prever e analisar, particularmente em vários cenários de desenvolvimento sustentável.

Os cenários utilizados para projetar futuros de precipitação na bacia hidrográfica do rio Uraim são o RCP4.5 e RCP8.5. O RCP4.5 representa uma projeção intermediária, caracterizada por uma escalada na temperatura de 1,1 para 2,6 °C até o final do século XXI, acompanhada por uma estabilização das emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, o RCP8.5 simboliza um cenário mais crítico, prevendo um aumento da temperatura de, aproximadamente, 5,0° C até o ponto máximo do século XXI (Silva et al. 2022). Esses cenários são aplicados para uma estimativa no período entre 2011 a 2100. Ambos são analisados para o conjunto de dados do MIROC5 e HADGEM2.

A escolha dos dois cenários de emissões de GEE justifica-se pela possibilidade de comparação entre os cenários, avaliando uma condição em que a sociedade consiga reduzir

suas emissões de gases poluentes, adotando formas sustentáveis de desenvolvimento e a outra uma condição oposta, em que não há uma alteração na postura de desenvolvimento das nações e o volume de poluentes é maior.

2.5 Projeções climáticas

Para aplicar as projeções futuras de precipitação com base nas informações do comportamento dos cenários obtidos pelos modelos MIROC5 e HadGEM2-ES, utiliza-se a plataforma ProjETA para simplificar o acesso a projeções de mudanças climáticas de alta resolução. Esta foi desenvolvida para simplificar o acesso a projeções de mudanças climáticas de elevada resolução, automatizando a extração e disponibilização de dados climáticos globais, o que reduz a complexidade de acessar e formatar esses dados volumosos (Holbig et al., 2018)

A utilização das projeções climáticas tem sido de suma importância para analisar os impactos das mudanças climáticas em pequenas bacias hidrográficas. A plataforma ProjETA regionaliza modelos climáticos globais por meio do modelo ETA/CPTEC, possibilitando as projeções de alta resolução, o que reduz a complexibilidade de acesso e formato de dados volumosos (Zákhia et al., 2021), permitindo, assim, abordagem mais precisa sobre as mudanças climáticas em regiões em que as alterações no regime de precipitações e temperatura são sensíveis.

Os dados da plataforma ProjETA indicam que as projeções climáticas apresentam alterações significativas nas variáveis meteorológicas (Ferreira; Loura, 2023). Outro aspecto que relevam a importância dos estudos baseados na plataforma ProjETA é a tendência de intensificação dos eventos de precipitações extremas ao longo dos anos (Oliveira et al., 2023).

Essas projeções reforçam a necessidade de adoção de estratégias e medidas de adaptação, como armazenamento de forma eficiente de água e aprimoramento de sistemas de gestão hídrica (Zákhia et al., 2021).

O ProjETA, com base em modelos regionais de clima, como o ETA, realiza as previsões globais, proporcionando uma representação precisa das condições locais. A plataforma oferece a possibilidade de utilizar diversos cenários de emissões (RCPs). É possível definir as

variáveis climáticas de interesse, como precipitação, temperatura e umidade, ajustando o período de projeção para diferentes intervalos de tempo no futuro, definir a área de estudo a ser analisado, fornecendo as coordenadas de longitude e latitude.

Nesse caso, os cenários a serem considerados (RCP4.5 e RCP8.5), as informações da área da bacia do Uraim (latitude e longitude), a variável de interesse (precipitação) e os intervalos de projeção futura para um período próximo (2011 – 2040), um período médio (2041 – 2070), e um período distante (2071 – 2100), devem ser fornecidos na Plataforma ProjETA para que ocorra o processamento das informações e assim sejam estimados os comportamentos da precipitação ao longo dos anos, já considerando os cenários de mudança climáticas.

Os resultados extraídos da plataforma indicam o comportamento da precipitação ao longo dos anos, e assim é possível verificar como tais mudanças se manifestam em um período próximo, médio e futuro. Isso auxiliará a previsão dos volumes disponíveis de água que a bacia hidrográfica do Uraim poderá dispor no futuro, bem como antecipar soluções de proteção e melhoramento do uso da terra, e reforçar a necessidade de diminuir emissões de GEE.

2.5 Desempenho dos modelos

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), (Equação 1), foi usado para avaliar o desempenho dos modelos climáticos. Essa métrica estatística é frequentemente empregada para avaliar a precisão das previsões hidrológicas. O NSE varia de -∞ a 1. Valores próximos de 1 indicam que o modelo tem um desempenho excelente. Valores próximos de 0 significam que o modelo não tem uma capacidade preditiva melhor do que a média dos dados observados. Valores negativos indicam que o modelo tem um desempenho abaixo da média.

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - \bar{X})^2} \quad (1)$$

em que n é o número de amostras, $\bar{X}$ é a media, Yobs constitui a precipitação observada, Yest consiste na precipitação estimada.

2.6 Uso e ocupação do solo (MAPBIOMAS)

Conforme Talib e Randhir (2017), e Tecklay et al. (2021), nas bacias hidrográficas, o uso e ocupação do solo e as mudanças climáticas interagem de forma não linear. Enquanto as mudanças climáticas alteram variáveis como temperatura e evapotranspiração, a transformação da cobertura do solo modifica os processos de infiltração, escoamento superficial, recarga e vazão, gerando efeitos combinados sobre o balanço hídrico e os serviços ecossistêmicos da bacia. Sendo assim, a relação no uso e cobertura da bacia hidrográfica do Uraim com as evidências de mudanças climáticas nas precipitações, realizadas neste estudo, são analisadas visando elencar os efeitos cumulativos destes na bacia. Essa análise é importante porque permite compreender os efeitos combinados desses impactos, que podem, ainda, ser mais potencialmente significativos e prejudicar o ecossistema da bacia hidrográfica.

Para demonstrar o comportamento das alterações no uso e cobertura do solo na área de estudo, utilizou-se a Coleção 6 do MapBiomas, a qual reconstrói dados anuais de uso e cobertura da terra com base no algoritmo *Random Forest* aplicado às imagens Landsat, por meio da plataforma *Google Earth Engine*. São organizados em cinco classes principais: floresta, formação natural não florestal, agricultura, áreas não vegetadas e águas. Tais classes são ainda subdivididas, detalhando, de forma mais abrangente, as ocupações da terra em resolução de 30 m pixel (Souza et al., 2020).

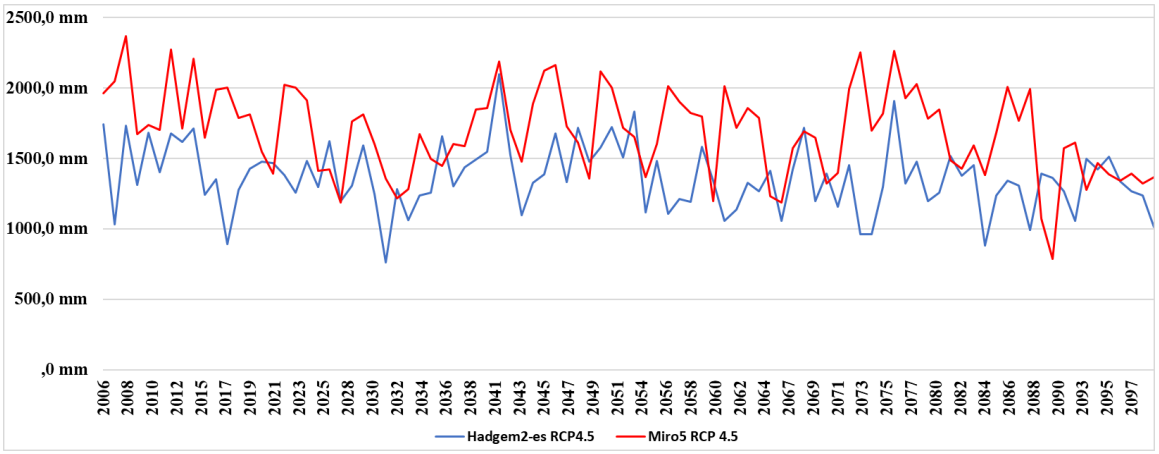
Com o intuito de relacionar a evolução do uso e ocupação da bacia com as alterações hidrológicas, mapeou-se a distribuição espacial das classes florestal, agrícola, agropecuária e urbana em 1985 e 2020. O primeiro ano marca o início do monitoramento pelo MapBiomas, enquanto o segundo compreende um período no qual já se constatam variações no padrão das chuvas. As classes de cobertura avaliada foram selecionadas, com base naquelas que mais sofreram modificações no período avaliado (1985 – 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As analises utilizando os modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 para os cenarios RCP 4.5 e RCP 8.5, projetados pelo modelo regional ETA, revelaram uma tendência de

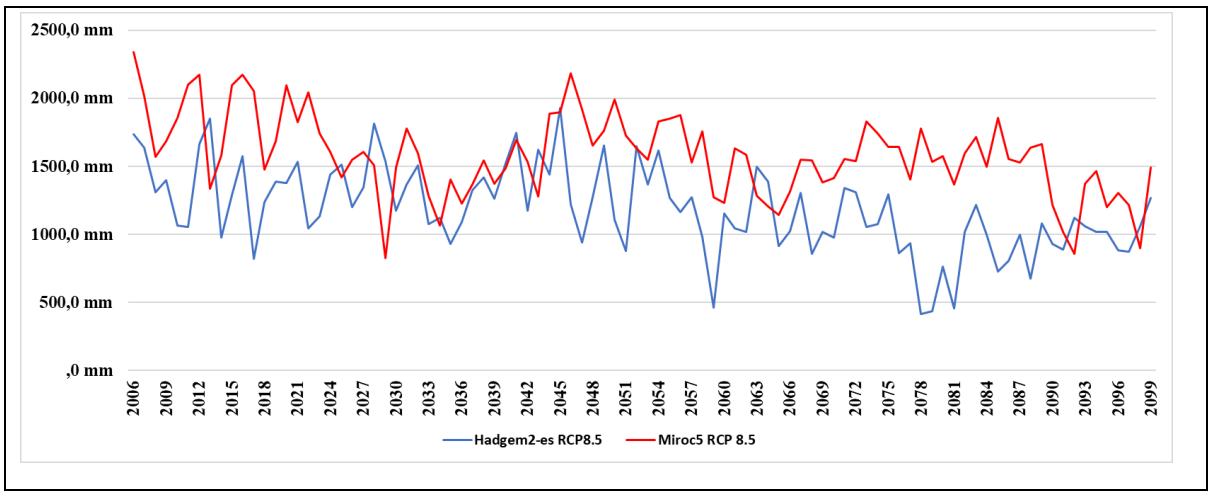
redução média nas precipitações da bacia do Rio Uraim, considerando a projeção de 2011 a 2100. O cenário RCP 4.5 indicou uma redução gradual ao longo da série em relação à média histórica, enquanto o cenário RCP 8.5 registrou uma queda ainda mais expressiva no volume de precipitação (figuras 3 e 4).

Figura 3 – modelos Hadgem2-es e Miroc5, considerando o cenário de emissão de GEE RCP 4.5



Fonte: Autores (2025).

Figura 4 – modelos Hadgem2-es e Miroc5, considerando o cenário de emissão de GEE RCP 8.5



Fonte: Autores (2025).

Os padrões de queda de chuva observados nas simulações climáticas para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 são semelhantes aos registros históricos de outros estudos realizados na bacia Amazônica, onde se insere a área de estudo. Veiga et al. (2023), em suas projeções climáticas, na Amazônia, em relação aos cenários RCP4.5 e RCP8.5, observaram a diminuição

da precipitação e períodos de seca mais longos no leste da Amazônia. Da Silva & Blanco (2023) demonstraram que tanto em relação ao cenário RCP4.5 quanto ao RCP8.5, o modelo Eta-HADGEM2-ES projeta volumes de precipitação reduzidos principalmente entre agosto e outubro, e observa que as reduções relativas ao RCP8.5 excedem as do RCP4.5.

Ainda destaca-se a pesquisa de Araujo e Ponte (2016), a qual revelou, com base em informações coletadas entre os anos de 1985–1989 (antes do desmatamento) e 2003–2007 (após o desmatamento), que a bacia do Rio Uraim experimentou uma redução de cerca de 25% na precipitação média anual após o desmatamento de, aproximadamente, 65% da região, com uma diminuição ainda mais acentuada durante o período seco.

Esses resultados ratificam os modelos climáticos empregados no referente estudo (HadGEM2-ES e MIROC5), uma vez que também apontam tendência de redução na precipitação anual e impacto mais acentuado nos períodos de seca, conforme as figuras 3 e 4, especialmente em relação ao cenário RCP8.5, que simboliza um cenário mais severo de emissões de gases de efeito estufa.

As mudanças nas precipitações podem impactar, diretamente, a oferta de água para os residentes das zonas urbanas e rurais adjacentes à bacia hidrográfica do rio Uraim, especialmente durante os períodos de seca (Twisa e buchroithner 2019, Aliyari et al. 2021 e Aibaidula et al. 2023). A perspectiva econômica da região, que se baseia na regularidade dos ciclos de chuva para a agricultura familiar, afeta a produtividade e a segurança alimentar. Em termos ecológicos, a diminuição da umidade do solo e a recarga dos corpos de água podem resultar na perda de biodiversidade, no aumento do perigo de incêndios e na deterioração de ecossistemas aquáticos.

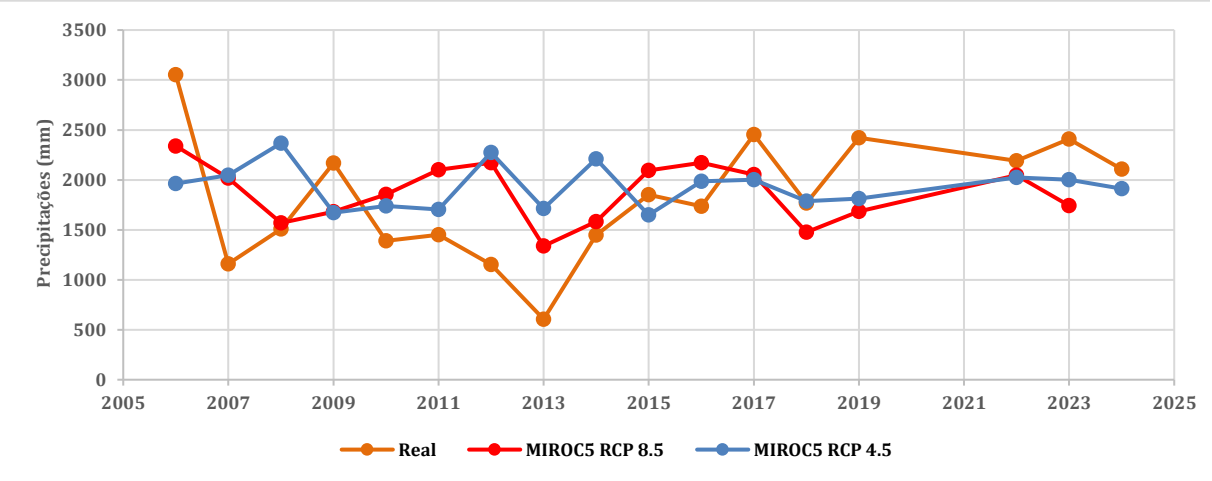
Na avaliação de desempenho dos modelos climáticos adotados, utilizou-se o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (*NSE*). Assim, realizou-se uma comparação entre os dados pontuais observados de precipitações da bacia do rio Uraim, pela ANA e as precipitações simuladas com os modelos (figuras. 5 e 6), no periodo de 2006 a 2024. Nessa análise, os anos de 2020 e 2021 foram desconsiderados devido à ausência de consistência técnica nos dados observados para o período (tabela 1).

Tabela 1 – Valores observados e simulados pelos modelos Hadgem2-Es e MIroc5 em diferentes cenários.

Ano	Observado	HadGEM 4.5	HadGEM 8.5	MIROC 4.5	MIROC 8.5
2006	3052,80	1742,49	1734,41	1963,51	2339,51
2007	1159,90	1032,56	1637,47	2046,21	2018,05
2008	1508,60	1730,85	1312,04	2367,6	1569,82
2009	2169,40	1312,73	1398,8	1670,67	1682,57
2010	1388,60	1683,81	1063,8	1738,49	1855,86
2011	1449,30	1404,46	1056,59	1704,11	2100,38
2012	1151,30	1677,66	1662,12	2274,05	2171,83
2013	606,30	1620,05	1852,8	1712,23	1337,96
2014	1448,70	1714,83	978,48	2210,33	1583,22
2015	1851,50	1244,9	1289,36	1648,68	2096,1
2016	1737,50	1354,59	1574,61	1985,94	2172,46
2017	2454,00	891,48	823,9	2003	2051,98
2018	1769,10	1279,86	1237,05	1788,59	1475,72
2019	2420,50	1428,68	1388,41	1813,69	1685,13
2022	2190,50	1380,15	1042,53	2024,32	2045,5
2023	2409,50	1259,18	1133,49	2003,25	1743,28
2024	2106,50	1484,42	1441,38	1912,43	1606,8
MÉD	**1816,12**	**1426,04**	**1331,01**	**1933,36**	**1855,07**

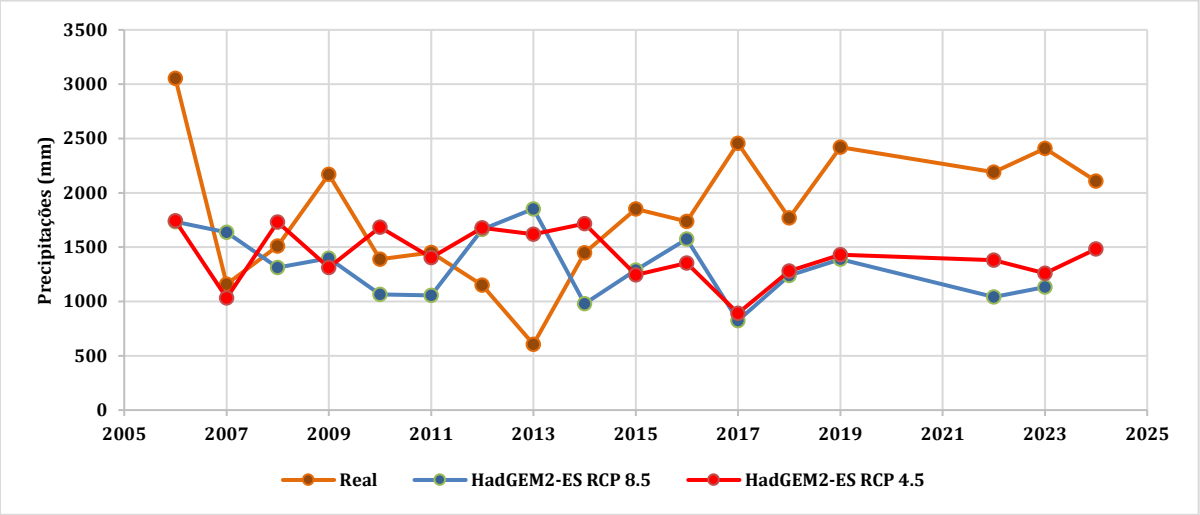
Fonte: Autores (2025).

Figura 5 - Dados reais x simulados pelo modelo MIROC5, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5



Fonte: autores (2025).

Figura 6 – dados reais *versus* simulados pelo modelo Hadgem2-ES (considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5)



Fonte: Autores (2025).

Avaliando o modelo HadGEM2-ES e MIROC5, este apresentou simulações mais próximos aos valores observados na bacia do Uraim (figuras 5 e 6). Outros estudos como os de Alemseged e Tom (2015), De Souza Aguiar et al. (2021), comprovam que o MIROC5 tem melhor capacidade de simular as variações de precipitações em regiões tropicais, em comparação a outros modelos.

Os valores de NSE obtidos nesse estudo indicam que os modelos não apresentaram simulações tão próximas aos dados observados, já que o valores de Nash para os dois cenários simulados, para ambos os modelos HadGEM2-ES e MIROC5, foram inferiores a 0,5. Tal resultado sugere uma eficiência preditiva baixa e pode ser justificada pela limitação da resolução espacial da plataforma Projeta, a qual utiliza resolução espacial de 20 a 40 km, dificultando uma analise mais exata de pequenas bacias hidrograficas, com resoluções menores, como a do rio Uraim. Além disso, segundo Almagro et al. (2020), os dados utilizados pelos modelos climatico HadGEM2-ES e MIROC5 apresentam incertezas, principalmente em regiões tropicais. Esse problema pode afetar a qualidade das projeções, gerando resultados menos precisos para regiões específicas.

Apesar do NSE não ter sido satisfatório, em relação à análise de desempenho dos modelos, ressalta-se que os modelos climáticos da plataforma Projeta foram desenvolvidos para simulações de tendencias de médio em longo prazo, mesmo com baixa eficiência estatística em escala anual, os modelos se mostram eficazes em confirmar estudos já

realizados, mostrando uma tendência de diminuição das precipitações em longo prazo e intensificação de secas nos cenários de maiores emissões de gases de efeito estufa.

De maneira geral, os prejuízos resultantes da ocorrência de eventos extremos, como secas ou estiagens prolongadas, são sentidos tanto no setor público quanto no privado. Para o setor público, ocorre a dificuldade na manutenção de serviços básicos devido à ausência da garantia de abastecimento de água potável. Já no setor privado, a queda na produção, principalmente nas atividades com maior dependência do uso da água (Marengo et al. 2015).

Na bacia do Uraim, com registros de áreas ocupadas com atividades de agricultura, mineração e pesca, que dependem da água da precipitação, essa diminuição de chuvas registradas poderá comprometer tanto a economia local quanto regional, além de impactar a renda e o ganho de pequenos agricultores e ribeirinhos, que terão menores recursos e aportes para enfrentar essas dificuldades provocadas por mudanças climáticas,

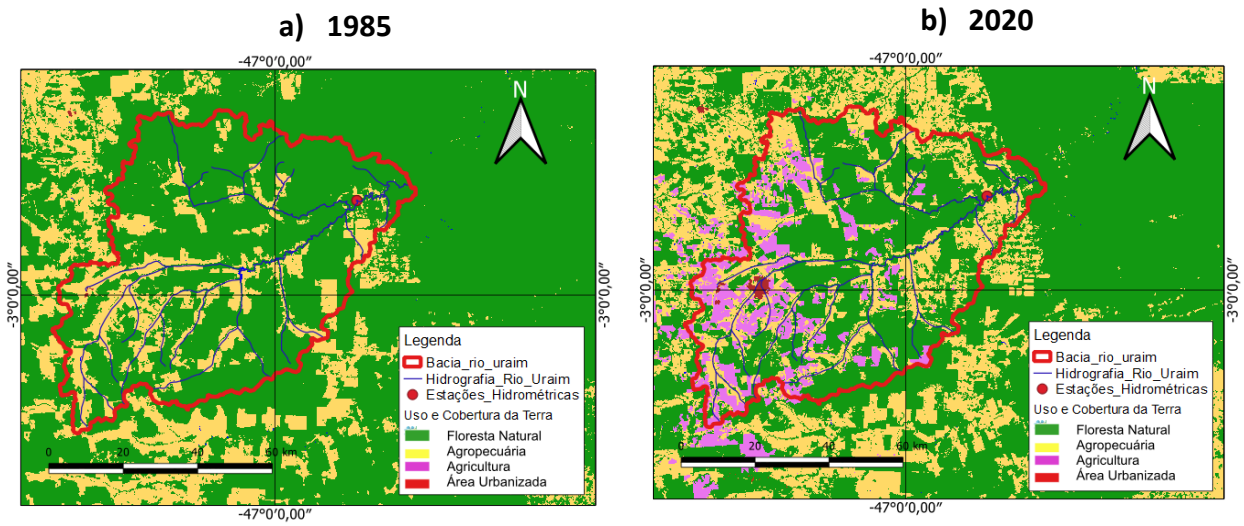
Considerando a análise dos resultados obtidos e das tendências a respeito da diminuição das precipitações na bacia do Rio Uraim, é necessária adoção de medidas estratégicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Dentre as principais medidas evidenciadas por Eekhout e De Vente (2019), Kalogiannidis et al. (2023), Bouguerra et al. (2024) e Gonçalves (2026), destacam-se a recuperação e proteção de nascentes, a promoção do uso e cobertura sustentáveis do solo, a implementação de sistemas de captação de água da chuva e o reflorestamento de áreas degradadas pela ação antrópica, além do fortalecimento de políticas públicas voltadas à educação ambiental e à gestão de recursos hídricos. Essas estratégias integradas de gestão de recursos hídricos no planejamento do uso da terra e adaptações baseadas na natureza são essenciais e podem alcançar tanto o desenvolvimento sustentável quanto a conservação ambiental.

É notória, também, a necessidade da promoção de políticas públicas de redução de gases de efeito estufa, como o combate ao desmatamento, substituição de fontes de energia que liberem gás carbonico, preservação de biomas e áreas vulneráveis etc. Essas estratégias podem assegurar a segurança hídrica, preservar os ecossistemas da região e fortalecer a resiliência das comunidades locais diante dos possíveis cenários climáticos futuros.

A partir das informações de cobertura e uso da terra da bacia do rio Uraim, gerados pelo Mapbiomas (2024), identificou-se que a atividade de agricultura e a redução de floresta natural tem avançado e modificado o espaço da região, desde a década dos anos 80, com expressiva mudança nos anos de 2020 (figura 7). Tais mudanças refletem o ciclo da água, como evidenciado em estudos realizados por Gomes et al. (2023), em que os autores analisaram o comportamento das curvas de permanência de vazões e concluíram que há uma redução significativa das vazões de referência na bacia, provavelmente associada à distribuição de precipitações na superfície, que, ao invés de se distribuirem naturalmente, sofrem modificações nos processos de infiltração e escoamento superficial, devido à cobertura do solo ter se modificado.

Figura 7 – uso e ocupação da Terra na Bacia Hidrográfica do Rio Uraim nos anos de 1985 e 2020



Fonte: MapBiomas (2024).

Os resultados de redução pluviométrica projetados pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, nos cenários RCP4.5 e RCP8.5, aliados às ações antrópicas de alteração do uso da terra, sinalizam o agravamento de impactos ambientais, sociais e econômicos na bacia do Rio Uraim. Esse cenário compromete a oferta hídrica e, por conseguinte, o desenvolvimento sustentável da região.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Avaliaram-se, no presente estudo, os efeitos das mudanças climáticas nas precipitações da bacia do rio Uraim, utilizando os modelos HadGEM2-ES e MIROC5 para os cenários de emissões de gases do efeito estufa (GEE) RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados indicaram uma tendência de diminuição das precipitações ao longo do século XXI, particularmente nos cenários com emissões de gases mais elevada (RCP 8.5), o que pode afetar, diretamente, a disponibilidade hídrica na região.

A avaliação do desempenho dos modelos, por meio de uso do coeficiente de Nash-Sutcliffe, revelou uma eficiência estatística reduzida, principalmente devido à limitação da resolução espacial em pequenas bacias amazônicas. Mesmo assim, os modelos revelaram consistência com pesquisas anteriores e destacaram a necessidade urgente de ações de adaptação e mitigação dos impactos das alterações no regime hidrológico.

Com base nos resultados observados, é necessário que medidas de adaptação às mudanças climáticas sejam adotadas no planejamento de recursos hídricos, uma vez que o elevado risco de redução na disponibilidade de água para as demandas da bacia nos próximos anos acarretará impactos ambientais, sociais e econômicos significativos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Dados hidrológicos e previsões climáticas**. Brasília: ANA, 2024.

AIBAIDULA, D.; ATES, N.; DADASER-CELIK, F. Modelagem dos impactos das mudanças climáticas em um reservatório de água potável na Turquia e implicações para a gestão de reservatórios em regiões semiáridas. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 5, p. 13582-13604, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-022-23141-2.

ALMAGRO, André et al. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, v. 244, p. 105053, 2020. 10.1016/j.atmosres.2020.105053

ALEMAN, Julie C. et al. Cobertura arbórea na África Central: determinantes e sensibilidade em cenários contrastantes de mudanças globais**. Relatórios científicos,** v. 7, n. 1, p. 41393, 2017.

ALEMSEGED, T. H.; TOM, R. Evaluation of regional climate model simulations of rainfall over the Upper Blue Nile basin. **Atmospheric Research**, v. 161, p. 57-64, 2015.

https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.013

BOUGUERRA, Sana et al. Modeling ecosystem regulation services and performing Cost–Benefit analysis for climate change mitigation through Nature-Based solutions using invest models. **Sustainability**, v. 16, n. 16, p. 7201, 2024.

CHANGE, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE. Mudança do clima 2023: Relatório Síntese. **Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.** Disponível em: https://www. gov. br/mcti/pt br/acompanhe-o-cti/sirene/publicacoes/relatorios doipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Rep ort_2023_Portugues. pdf. Acesso em: 15/02/2025, v. 17, 2024.

SILVA, Fabiola Souza da; BLANCO, Claudio José Cavalcante. Influence of climate change and population growth on Amazon Metropolis water supply. **Urban Climate**, v. 49, p. 101538, 2023.

SERRÃO, E. A. de O. et al. Climate and land use change: future impacts on hydropower and revenue for the amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 135700, 2023.

COSTA, C. E. A. de S.; BLANCO, C. J. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de. Curvas IDF para cenários climáticos futuros em uma localidade da Bacia do Tapajós, Amazônia, Brasil. **Revista de Água e Mudanças Climáticas**, v. 11, n. 3, p. 760-770, 2020.

DE ARAUJO, R. da C.; PONTE, M. X. Efeitos do desmatamento em larga-escala na hidrologia da bacia do Uraim, Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 07, p. 2390-2404, 2016.
https://pdfs.semanticscholar.org/9eeb/f7b5b9e2cb680b07fd94fa23275f74bfb76b.pdf

DE SOUZA COSTA, C. E. A.; BLANCO, C. J. C.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. **Climatic Change**, v. 166, n. 3, p. 45, 2021. **https://doi.org/10.1007/s10584-021-03141-w**

DAVIDSON, E. A.; KANTER, D. Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. **Environmental Research Letters,** v. 9, n. 10, p. 105012, 2014. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105012

DE OLIVEIRA, E. P. et al. Impacto das projeções climáticas nas relações Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas em Pelotas/RS. **Revista Brasileira de Climatologia, v. 33, p. 604-630, 2023. https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16691**

EEKHOUT, J. P. C.; DE VENTE, Joris. Assessing the effectiveness of Sustainable Land Management for large-scale climate change adaptation. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 85-93, 2019.

FATEMEH A, R. T. Bailey, Mazdak Arabi, Appraising climate change impacts on future water resources and agricultural productivity in agro-urban river basins. **Science of The Total Environment**, v. 788, 2021, 147717, ISSN 0048-9697. **https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147717**

FERREIRA, C. C.; LOURAS, R. M. O uso de projeções climáticas para construção de arquivos TMY3: uma análise estatística. **Encontro nacional de conforto no ambiente construído,** v. 17, p. 1-10, 2023.

GONCALVES, M. S. O. Building resilience in the Global South: Evidence from a decentralized water policy in Brazil. **Journal of Environmental Economics and Management**, p. 103350, 2026.

GOMES, E. P. et al. **Uso e ocupação da terra em pequenas bacias e alterações no ciclo hidrológico local**. Geoinformação e Análises Socioambientais, p. 71. 2023.

HOLBIG, C. A. et al. Plataforma PROJETA: acessando projeções de mudanças climáticas de alta resolução sobre a América Central e do Sul usando o modelo Eta. **Agrometeoros** , v. 26, n. 1, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE **GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Dados populacionais e geográficos do Pará. Brasília: IBGE, 2022.**

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Relatório sobre uso e ocupação do solo no Brasil. São José dos Campos: INPE, 2020.**

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Relatório sobre uso e ocupação do solo no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2020.

KALOGIANNIDIS, S. et al. Integration of water resources management strategies in land use planning towards environmental conservation. **Sustainability,** v. 15, n. 21, p. 15242, 2023.

KIEFER, A. P. et al. Panorama das mudanças nos padrões de atualizações e alterações diante das mudanças climáticas: revisão de literatura. **Revista Brasileira de Geografia Física** , v. 3, p. 1724-1747, 2021.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI. **Relatório sobre mudanças climáticas e impactos hidrológicos**. Brasília: MCTI, 2024.

MONTZKA, S. A. et al. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11 [Um aumento inesperado e persistente nas emissões globais de CFC-11 que destrói a camada de ozônio]. **Nature**, v. 557, n. 7705, p. 413-417, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-018-0106-2.

MARENGO, J. A; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. 2015. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo**. Revista USP**, 106: 31-44. doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44.

MARENGO, José Antonio et al. **Variabilidade de longo prazo, extremos e mudanças de temperatura e hidrometeorologia na Região Amazônica: Uma revisão**. **Acta Amazônica** , v. 54, p. e54es22098, 2024. https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980

MET OFFICE. **HadGEM2**: Modelo climático do Reino Unido. Londres: Met Office, 2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – IPCC. **Relatório sobre mudanças climáticas**. Genebra: IPCC, 2023.

PROJETO MAPBIOMAS. **Relatório de mudanças no uso e cobertura do solo**. São Paulo: MapBiomas, 2023.

SAUNOIS, M. et al. O orçamento global de metano 2000–2017. **Earth System Science Data Discussions** , v. 2019, p. 1-136, 2019.

SILVA, V. O.; DE MELLO, C. R. **Projeções de secas severas no clima futuro no Sudeste do Brasil: um estudo de caso no Sul de Minas Gerais, Brasil. Climatologia Teórica e Aplicada**, v. 3, p. 1289-1302, 2022.

TALIB, A.; RANDHIR, T. O. Climate change and land use impacts on hydrologic processes of watershed systems. **Journal of Water and Climate Change**, v. 8, n. 3, p. 363-374, 2017.

TEKLAY, A. et al. Impacts of climate and land use change on hydrological response in Gumara Watershed, Ethiopia. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 21, n. 2, p. 315-332, 2021.

TWISA, S.; BUCHROITHNER, M. F. Seasonal and annual rainfall variability and their impact on rural water supply services in the Wami River Basin, Tanzania. **Water**, v. 11, n. 10, p. 2055, 2019.

VEIGA, S. F. et al. Climate change over South America simulated by the Brazilian Earth system model under RCP4. 5 and RCP8. 5 scenarios. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 131, p. 104598, 2023.

WATANABE, M. et al. Simulação climática aprimorada pelo MIROC5: estados médios, variabilidade e sensibilidade climática. **Revista do Clima** , v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.

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, n. 4, p. 667-681, 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786360002