

Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento

Impact of climate change on minimum reference flows of small catchments in the Legal Amazon and within the arc of deforestation

Giovanna Klautau Leite Costa¹ , Claudio José Cavalcante Blanco¹ ,
Amanda de Cássia Lobato Soares¹ , Josias da Silva Cruz¹ , Leonardo Melo de Mendonça¹ 

¹Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, PA, Brasil. E-mails: giovanna.leite.costa@itec.ufpa.br, blanco@ufpa.br, amanda.soares@itec.ufpa.br, josias.cruz75@gmail.com, leonardomeelo@gmail.com

Como citar: Costa, G. K. L., Blanco, C. J. C., Soares, A. C. L., Cruz, J. S., & Mendonça, L. M. (2023). 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*, 20, e6. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e6>

RESUMO: O objetivo foi analisar a influência das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de duas pequenas bacias hidrográficas localizadas na Amazônia Legal (bioma Cerrado) e, também, no Arco do Desflorestamento. Os cenários utilizados foram os RCP 4.5 e RCP 8.5, definidos durante o 5º Relatório do IPCC, visto que estes são os principais cenários de emissão de gases efeito estufa otimistas e realistas no futuro, sendo projetados nas precipitações futuras das pequenas bacias. As precipitações foram obtidas via plataforma PROJETA e usadas como dados de entrada de um modelo chuva-vazão para simulação de curvas de permanência de vazão e, conseqüentemente, vazões mínimas de referência futuras das pequenas bacias analisadas. Os resultados demonstraram que nos dois cenários, a vazão mínima de referência tende a diminuir bastante, chegando mesmo a ser nula. Assim, diante da redução drástica de vazão outorgável, é necessária atenção dos tomadores de decisão para projetos de manejo, uso e captação de água, que sejam sustentáveis. Esses projetos devem visar o enfrentamento da crise climática para proteção das populações, principalmente, as mais vulneráveis.

Palavras-chave: Modelos GHMs; Cenários RCP 4.5 e RCP 8.5; Dados Futuros de Chuva; Modelo Chuva-Vazão; Curvas de Permanência de Vazão.

ABSTRACT: The objective was to analyze the influence of climate change on the minimum reference flows of two small catchments located in the Legal Amazon (Cerrado biome) and also in the Arch of Deforestation. The scenarios used were RCP 4.5 and RCP 8.5, defined during the 5th IPCC Report, as these are the main optimistic and realistic greenhouse gas emission scenarios in the future, being projected in the future precipitation of small catchments. Precipitation was obtained via the PROJETA platform. The precipitation data were used as input for a rainfall-runoff model to simulate flow duration curves and, consequently, minimum future reference flows for the small catchments analyzed. The results showed that in both scenarios, the minimum flow rate tends to decrease significantly, even reaching zero. Thus, in view of the drastic reduction in the flow, it is necessary to pay attention from decision makers to projects for the management, use and capitation of water that are sustainable. These projects must aim to face the climate crisis to protect populations, especially the most vulnerable.

Keywords: GHMs Models; RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios; Future Rainfall Data; Rainfall-Runoff Model; Flow Duration Curves.

INTRODUÇÃO

Em 1988 o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) lançaram o Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). O principal objetivo do IPCC é o fornecimento de

Recebido: Dezembro 14, 2022. Revisado: Fevereiro 18, 2023. Aceito: Março 20, 2023.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a [licença Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

informações científicas sobre as mudanças climáticas devidas ao aquecimento global causado pelas emissões de gás de efeito estufa (GEE). No quinto relatório de avaliação do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) foram lançados quatro cenários de mudanças na concentração de GEE com validade até o final do século. Esses cenários são denominados Representative Concentration Pathway (RCP), os quatro cenários são chamados RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 e RCP 2.6. A numeração de cada RCP corresponde às forças radiativas até o final do século em W/m^2 . As projeções climáticas para o planeta são realizadas a partir dos Modelos de Circulação Global (Global Circulation Models, GCMs), modelos climáticos que utilizam diversos cenários, incluindo os RCPs como condições de contorno. Entretanto, para se realizar projeções climáticas em escalas regionais, devem ser utilizados os Modelos Climáticos Regionais (Regional Climate Models, RCMs). Costa et al. (2020) e Chokkavarapu & Mandla (2019) citam que os RCMs são modelos utilizados para reduzir as projeções dos GCMs para se obter informações climáticas mais precisas de determinada região.

O Brasil é vulnerável às mudanças climáticas e à crise climática atual (Sanson et al., 2019). A Amazônia Legal, que também é ocupada pelo Cerrado, além de sofrer com as mudanças climáticas, sofre, também, com a expansão do arco do desflorestamento. No caso das mudanças climáticas, isso vem acontecendo, conforme as projeções de variáveis climáticas realizadas por Costa et al. (2021), as quais apresentaram cenários desfavoráveis. Para Reboita et al. (2022), na Amazônia, as projeções indicam condições mais secas em relação ao período histórico. O conhecimento sobre possíveis cenários climático-hidrológicos futuros e as suas incertezas pode ajudar a estimar demandas de água no futuro e definir políticas ambientais de uso e gerenciamento de água para o futuro (Marengo, 2008). Esse conhecimento enquadra-se no objetivo 6 da ONU para o desenvolvimento sustentável, isto é, água potável e saneamento (clean water and sanitation) (Organização das Nações Unidas, 2015).

Assim, diante das mudanças climáticas é necessário analisar seus efeitos nas curvas de permanência de vazão e, conseqüentemente, nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas da Amazônia. A vazão mínima de referência, residual, remanescente, ecológica, ambiental ou, simplesmente, vazão mínima (Benetti et al., 2003; Longhi & Formiga, 2011; Santos & Cunha, 2013), é a vazão que deve permanecer no rio para suprir as necessidades ecológicas, tais como: a manutenção e conservação dos ecossistemas associados ao sistema aquático, preservação das condições de pulso hidrológico, transporte de sedimentos e nutrientes. A principal justificativa da utilização de vazões mínimas de referência, tal como $Q_{90\%}$ e $Q_{95\%}$, consiste no fato destas serem as principais balizadoras no que se refere a licenças ambientais, outorga de direito de usos das águas e autorizações de intervenções hidráulicas (Barros et al., 2019).

Nesse contexto, Taveira & Santos (2019) avaliaram o efeito das mudanças climáticas na vazão sólida e líquida da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, localizado na Serra do Mar, estado do Paraná. Os autores mostraram redução da vazão mínima dessa bacia para o cenário RCP 8.5 analisados entre os anos 2060 e 2100. O Trabalho de Sá et al. (2019) mostrou redução da vazão $Q_{90\%}$, a qual muitas vezes é usada com parâmetro de vazão de referência mínima, para cenários de aumento de temperatura (1,5; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 °C) na região da bacia hidrográfica do Rio Riachão, MG, Brasil. Ricardo et al. (2020) usaram projeções de precipitações do modelo regionalizado ETA-HadGEM2-ES para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 como entrada de modelo hidrológico para simular vazões futuras na bacia hidrográfica do rio Marombas, Santa Catarina. As projeções de vazões futuras no cenário RCP 8.5 apresentaram reduções significativas nas vazões mínimas de referência $Q_{98\%}$ e $Q_{95\%}$ para períodos centrados em 2030 e 2050. Zákha et al. (2021) avaliaram a associação do modelo hidrológico MHD-INPE ao modelo atmosférico ETA/CPTEC, visando simular o impacto de mudanças climáticas na pequena bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará, MG, Brasil, utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 de três modelos globais (HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2), regionalizados pelo modelo ETA. Nesse caso, todas as simulações mostraram redução das vazões mínimas e os autores destacaram a importância dessas por serem consideradas como referência em processos envolvendo a gestão dos recursos hídricos.

Assim, o objetivo do trabalho é analisar o impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de duas pequenas bacias hidrográficas localizadas na Amazônia Legal e no Arco do desflorestamento. Entretanto, o bioma característico da região das bacias é o Cerrado. Essa região já afetada pelo uso e ocupação da terra, que não favorece a conservação dos recursos hídricos; e que tem um clima de baixos volumes precipitados, sobretudo no inverno. Na análise foram utilizados dados de precipitação diária futura da plataforma PROJETA do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Esses dados foram gerados via modelo ETA-MIROC5, seguindo os cenários RCP 4.5 (mais otimista, porém menos realista) e RCP 8.5 (mais pessimista e realista) (Schwalm et al., 2020; Lyra et al., 2018). Os dados diários de chuva e vazão observados das pequenas bacias hidrográficas foram acessados através do HidroWeb (Portal Hidroweb, 2023), integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

MATERIAL E MÉTODOS

Bacias Estudadas e Vazão Mínima de Referência

Na Tabela 1 são apresentados alguns dados das pequenas bacias hidrográficas (Santana & Blanco, 2022). Na Figura 1 estão localizadas as estações pluviométrica e fluviométrica das bacias com seus códigos da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento). Observando-se a Figura 1, nota-se que as bacias estudadas se encontram no Cerrado do estado do Tocantins e dentro do arco do desflorestamento. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2004), cada estado deve regulamentar sua vazão máxima outorgável (ou mínima de referência). Dentre os estados da Amazônia Legal, o Tocantins tem como vazão mínima de referência para fins de concessão de outorga, a vazão $Q_{90\%}$ (Barros et al., 2019).

Tabela 1 – Nomes das estações fluviométricas e pluviométricas da ANA, período de dados observados e áreas de drenagem das pequenas bacias hidrográficas estudadas

Pequena Bacia Hidrográfica	Estação Fluviométrica	Estação Pluviométrica	Período de dados (anos)	Área de Drenagem (km ²)
Rio Capivara	Próximo Colinas do Tocantins	Colinas do Tocantins	1995-1998	386
Rio Piranhas	Fazenda Craveiro	Abreulândia	2004-2007	186

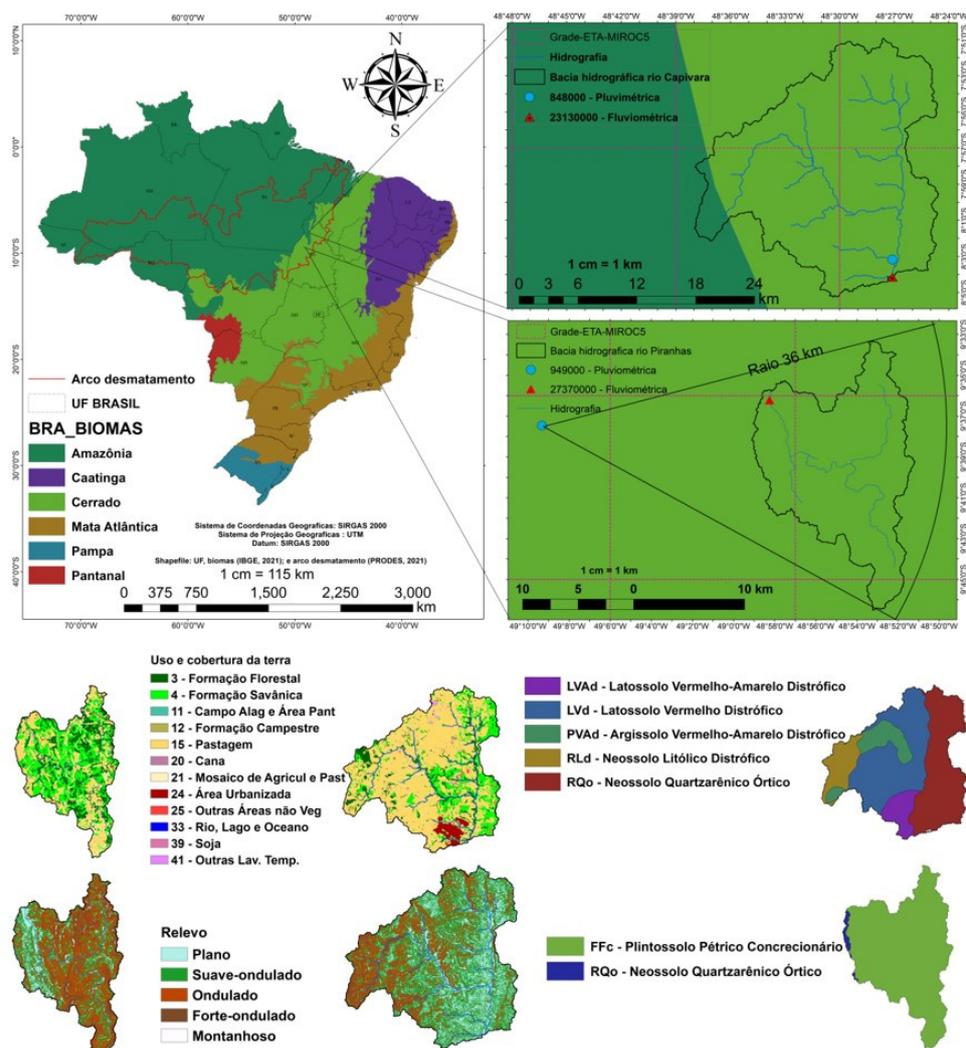


Figura 1 - Localização das pequenas bacias hidrográficas dos rios Capivara e Piranhas, suas respectivas estações fluviométrica e pluviométrica, uso e cobertura da terra, tipos de solos e relevo.

Também na Figura 1, é possível observar que a distância entre as estações pluviométrica e fluviométrica da bacia hidrográfica do rio Piranhas, não ultrapassa um raio de 36 km e, conforme preconiza a Organização Mundial de Meteorologia (2014), esse raio não pode ser maior que 100 km. Essa distância deve ser respeitada para que os dados de chuva possam ser representativos e relacionados com os dados de vazão das bacias hidrográficas.

A bacia do rio Capivara é mais antropizada, onde a principal atividade econômica é a agropecuária; têm solos variando entre o profundo, como o Latossolo Vermelho Distrófico, e raso, como o Neossolo Quartzarênico Órtico. Por outro lado, a bacia do rio Piranhas tem características mais preservadas, com formações florestal e savânica típicas do bioma Cerrado, em solo com alto teor de argila, o Plintossolo Pétrico Concrecionário. Os relevos predominantes das bacias dos rios Piranhas e Capivara são classificados como ondulado e suave-ondulado, respectivamente (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999).

Download dos dados Futuros de Chuva

Efetuiu-se o download dos dados de precipitação diária futura, através da plataforma PROJETA (Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo ETA, 2023; Brasil, 2016; Chou et al., 2014a; Chou et al., 2014b; Lyra et al., 2018), considerando os anos de 2023 a 2099, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. O primeiro cenário foi construído baseado na hipótese de que os níveis atuais de concentrações de Dióxido de Carbono sejam mantidos e a partir de meados do século até o final, estejam estabilizados. O segundo cenário assume o uso de combustíveis fósseis de modo agressivo, sendo assim, o forçamento radioativo 8.5 Wm^2 resulta em um aquecimento global médio no final do século de aproximadamente 4°C (Van Vuuren et al., 2011). Os dados disponibilizados pela plataforma já vêm com o downscaling baseados no RCM ETA forçado para dois cenários RCP e dois Modelos de Circulação Global (GCM), HadGEM2-ES e MIROC5. Sendo assim, foi utilizada a precipitação do ETA-MIROC5 (modelo forçado pelo MIROC5, de origem japonesa) com uma resolução de 20 km. O MIROC5 simula o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) de forma realística e projeta de maneira eficiente a precipitação, especialmente, para regiões próximas ao Equador, com a influência da Zona de Convergência Intertropical (Watanabe et al., 2010). Assim e devido a essas especificações, o modelo forçado por este GCM foi o escolhido para o estudo.

Modelo Chuva-Vazão

Os dados observados foram utilizados para calibrar e validar o modelo chuva-vazão (Blanco et al., 2007; Blanco et al., 2013). Além disso, tais dados representam os cenários atuais de chuva e vazão. Os dados de chuva simulados, através do RCM ETA-MIROC5, são os dados de entrada para a simulação das vazões futuras, a análises das curvas de permanência e vazões mínimas de referência para três períodos de tempos (2023-2029, 2050-2059, 2090-2099). O modelo estabelece entre os dados de chuva e vazão uma relação linear de causa e efeito. A partir das hipóteses de linearidade e invariância no tempo, as vazões $y(t)$ são representadas pela convolução entre a chuva $x(t)$ e a função de transferência ou a resposta impulsional $h(u)$, dada pela Equação 1.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u)x(t - u)du \quad (1)$$

Para o sistema representado pela Equação 1, é necessário acrescentar às hipóteses admitidas, de que os sistemas hidrológicos são reais, ou seja, $h(u) = 0$, se $u < 0$. Além disso, a entrada $x(t)$ e a saída $y(t)$ são consideradas como dois processos aleatórios e estacionários, multiplicando-se a Equação 1 por $x(t-\tau)$ e se considerando a esperança matemática, obtém-se a Equação 2.

$$E[y(t)x(t - \tau)] = \int_0^w h(u)E[(t - \tau)x(t - u)]du \quad (2)$$

Resultando na Equação 3, expressão na qual γ_{xy} é a covariância entre $x(t)$ e $y(t)$; γ_x é a auto covariância de $x(t)$ e τ é a decalagem.

$$y_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} h(u)y_x(t - \tau)du \quad (3)$$

A Equação 4 é a integral de Wiener-Hopf (Chatfield, 1980), a partir da qual se determinam as respostas impulsivas $h(u)$ no domínio do tempo. Assim, aplica-se a transformada de Fourier à equação, multiplicando-a por $\frac{e^{-1\omega t}}{\pi}$ e somando-se τ de $-\infty$ a ∞ , resultando na Equação 4.

$$f_{xy}(\omega) = \frac{\sum_{t=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} h_k e^{-i\omega t} y_x(\tau-k) e^{-i\omega(\tau-k)}}{\pi} \quad (4)$$

Da qual se obtém a Equação 5.

$$H(\omega) = \frac{f_{xy}(\omega)}{f_x(\omega)} \quad (5)$$

Onde f_{xy} é o espectro da variância cruzada entre a entrada e a saída, f_x é o espectro de variância da entrada e $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência. É possível estimar f_x e f_{xy} a partir de um truncamento m , aplicado às transformadas de Fourier de γ_x e de γ_{xy} , os quais são representados respectivamente por C_x (Equação 6) e por C_{xy} e C_{yx} (Equações 7-8).

$$C_x(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{n} \quad (6)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{n} \quad (7)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x})}{n} \quad (8)$$

Onde k varia de 0 a m , representando a decalagem e i é o passo no domínio do tempo. Uma função de ponderação D_k , também chamada filtro de Tukey, é necessária para que os valores estimados sejam não viesados. Os espectros assim estimados tornam-se as Equações 9-10.

$$f_x(\omega) = \frac{1}{\pi} [D_0 C_x(0) + 2 \sum_{k=1}^m D_k C_x(k) \cos \omega k] \quad (9)$$

$$f_{xy}(\omega) = c(\omega) \cdot iq(\omega) \quad (10)$$

Onde $c(\omega)$ e $q(\omega)$ são dados, respectivamente, pelas Equações 11-12.

$$c(\omega) = \frac{1}{\pi} \{D_0 C_{xy}(0) + \sum_{k=1}^m D_k [C_{xy}(k) + C_{yx}(k)] \cos \omega k\} \quad (11)$$

$$q(\omega) = \frac{1}{\pi} \{ \sum_{k=1}^m D_k [C_{xy}(k) - C_{yx}(k)] \sin \omega k \} \quad (12)$$

O filtro de Tukey é expresso pela Equação 13.

$$D_k = \frac{(1 + \cos \frac{\pi k}{m})}{m} \quad (13)$$

Esta análise necessita da transformada inversa de Fourier (Equação 14), a ser aplicada às respostas impulsivas; para que sejam representadas no domínio do tempo, permitindo a aplicação da convolução aos dados de entrada e às respostas impulsivas, reconstituindo os dados de saída.

$$H(i) = \int_{k=0}^{m/2} Re \bar{H}(k) \cos\left(\frac{2\pi k i}{m}\right) + \int_{k=0}^{m/2} Im \bar{H}(k) \sin\left(\frac{2\pi k i}{m}\right) \quad (14)$$

Onde, $H(i)$ é a resposta impulsional calculada no domínio do tempo, sendo $i = 0, 1, 2, \dots, m$. $ReH(k)$ e $ImH(k)$ são, respectivamente, as partes real e imaginária normalizadas da resposta impulsional, onde $k = 0, 1, 2, \dots, m/2$. Após a determinação da resposta impulsional no domínio do tempo, é necessário aplicar a convolução aos dados de entrada $x(t)$ e à resposta impulsional do sistema $h(t)$, resultando nos dados de saída $y(t)$. No caso dos sistemas hidrológicos, a entrada é representada pela precipitação P (mm) e a saída pela vazão Q (m^3/s), que é representada pela forma discreta da integral de convolução (Equação 15).

$$Q_i = \sum_{j=1}^m h_j p_{i-j+1} \text{ com } i = 1, 2, \dots, n+m-1 \quad (15)$$

Onde m é o comprimento da memória do sistema, que representa o efeito de uma chuva continua estendendo-se por m intervalos de duração t , neste trabalho dado de forma diária. A calibração do modelo é baseada na otimização dos parâmetros m e k cuja função objetivo a ser minimizada é a Raiz do Erro Quadrático Médio (Root Mean Squared Error, RMSE) (Equação 16). Em suma, varia-se m e k até que o RMSE, calculado em função das vazões de permanência observadas e simuladas do período de calibração, seja minimizado pelo método das aproximações sucessivas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad (16)$$

Onde Q_{oi} e Q_{si} são as vazões observadas e simuladas no tempo i ; e n é o número total de observações.

A validação do modelo foi realizada através da Equação 15 com os parâmetros determinados na calibração, os quais foram aplicados aos períodos de dados destinados a validação (Tabela 2). Também, com os parâmetros ótimos oriundos da calibração, o modelo chuva-vazão foi aplicado às chuvas obtidas via plataforma PROJETA. Dessa forma, foi possível obter as curvas de permanência para os cenários RCP 4.5 e 8.5, considerando o período “futuro” de 2023 a 2099.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Projeção de chuvas futuras

Na Figura 2 são apresentados os totais anuais precipitados e médio do período de dados observado (Figura 2a), as médias dos totais de chuva decadal e a chuva total média do período analisado da pequena bacia hidrográfica do rio Capivara para o RCP 4.5 (Figura 2b) e para o RCP 8.5 (Figura 2c) e a precipitação média mensal observada, as projetadas pelo RCP 4.5 e RCP 8.5 (Figura 2d). A Figura 3 é similar a Figura 2, mas nela são mostrados gráficos dos dados de chuva da pequena bacia hidrográfica do rio Piranhas.

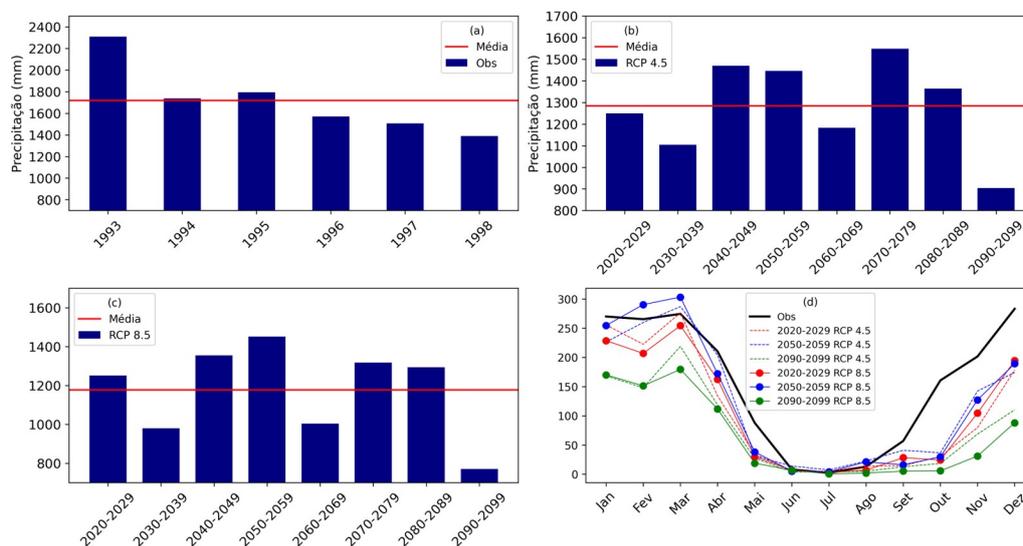


Figura 2 – Chuva decadal total e média para o cenário RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b), chuva anual e média observada (c) da pequena bacia hidrográfica do rio Capivara e sazonalidade de precipitação decadal (d).

Analisando a Figura 2, observa-se que o a média acumulada anual observada da pequena bacia hidrográfica do rio Capivara (Figura 2a) é igual a 1.718 mm, contudo nos anos de 1996, 1997 e 1998 os totais precipitados ficaram abaixo da média. Comparando-se as médias dos totais pluviométricos decadais projetados pelos RCPs 4.5 e 8.5, nota-se uma redução média de 434 mm (Figura 2b) e 540 mm (Figura 2c), respectivamente. Na Figura 2d, observa-se a variação

sazonal da precipitação, para as décadas analisadas, ambos os cenários apresentam deslocamento temporal de 3 meses para o mês de maior precipitação em relação à precipitação observada. Além disso, as projeções de precipitação apresentam um prolongamento da estação de estiagem, concordando com os estudos: de Santos et al. (2022), no qual os autores analisam a redução da erosividade pluviométrica em função da diminuição de precipitação; e Marengo et al. (2022), que apresentou tendência negativa e atraso no início da estação chuvosa. Essa redução dos totais pluviométricos médios futuros deve acarretar uma redução das vazões do rio Capivara, reduzindo ainda mais as vazões mínimas de referência.

No caso da pequena bacia hidrográfica do rio Piranhas (Figura 3), essa redução é de, aproximadamente, 530 mm para o RCP 4.5 (Figura 3b) e 666 mm para o RCP 8.5 (Figura 3c) em relação à média acumulada anual de precipitação observada. Na Figura 3d é projetado um deslocamento de dois meses em relação ao mês mais chuvoso e o prolongamento da estação de estiagem. Também, essa redução deve provocar redução das vazões do rio Piranhas, reduzindo ainda mais as vazões mínimas de referência.

Nota-se que para ambas as bacias, a redução de precipitação será mais intensa no final do século para o RCP 8.5. Levando-se em consideração a afirmação de que precipitação menor que 100 mm para um determinado mês é considerado de seca (Almagro et al., 2020; Sombroek, 2001; Warren & Sombroek, 1967). Logo, para a bacia do rio Capivara haverá 8 meses de estiagem e para a bacia do rio Piranhas 7 meses.

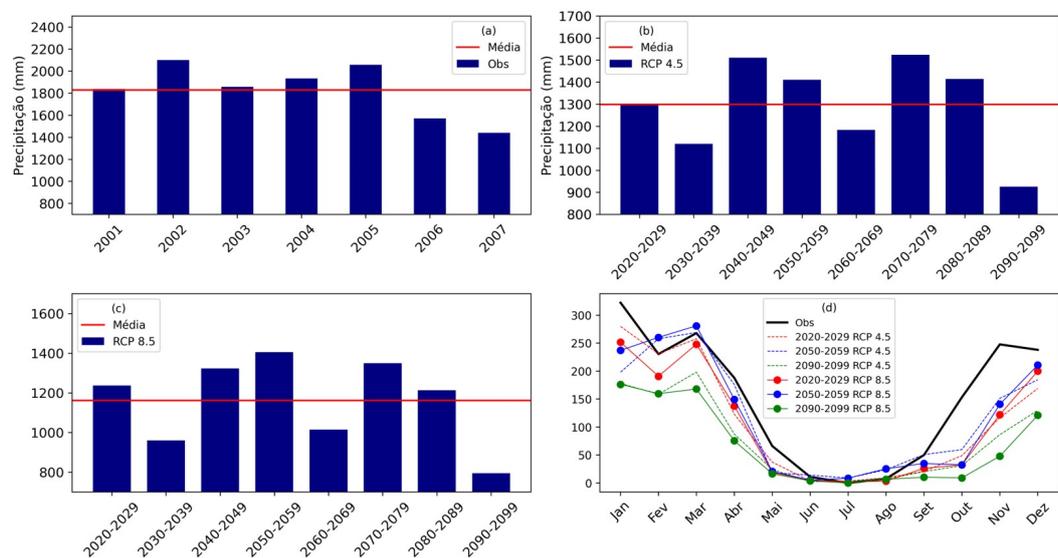


Figura 3 – Chuva decadal total e média para o cenário RCP 4.5 (a) e RCP 8.5 (b), chuva anual e média observada (c) da pequena bacia hidrográfica do rio Piranhas e sazonalidade de precipitação decadal (d)

Calibração do modelo chuva-vazão

Na Tabela 2 são mostrados os parâmetros m e k ótimos, e o valor mínimo de RMSE para calibração do modelo para as pequenas bacias hidrográficas dos rios Capivara e Piranhas. Também nessa Tabela, são mostrados os períodos de dados usados para calibração e validação do modelo. As séries de dados são curtas, mas como destacam Blanco et al. (2007), o modelo só necessita de séries de chuva e vazão de um ano e seis meses para ser calibrado e mais um ano de dados de vazão para ser validado. Nesse caso, foram usados os três últimos anos para calibração e o primeiro ano para validação. Com esse arranjo, foram identificados os menores RMSE para a calibração, o que é confirmado na validação, resultando em melhores aproximações entre as curvas de permanência observadas e simuladas.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros m , k e RMSE relativos à calibração do modelo para as pequenas bacias hidrográficas estudadas

Pequena bacia hidrográfica	m (dias)	k (dias)	RMSE (m^3/s)	Calibração (anos)	Validação (anos)
Rio Capivara	157	4	3,4	1996-1998	1995
Rio Piranhas	270	2	6,6	2005-2007	2004

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que os valores de decalagem (k) indicaram a necessidade de 2 e 4 dias para que toda chuva que cai nas bacias seja convertida em vazão. Em relação aos resultados do comprimento de memória (m), observa-se que são necessárias amostras de mais 150 dias (5 meses) de dados para que se estabeleça a correlação cruzada entre os dados de chuva e vazão e se determine a resposta impulsional do sistema. Segundo Quintas et al. (2011), os valores elevados de m são mais apropriados para a simulação de vazões de estiagem. Na Figura 4 são apresentadas as curvas de permanência das vazões observadas (Q_{obs}) e simuladas (Q_{sim}) dos rios Piranhas (Figura 4a) e Capivara (Figura 4b) na etapa de calibração do modelo.

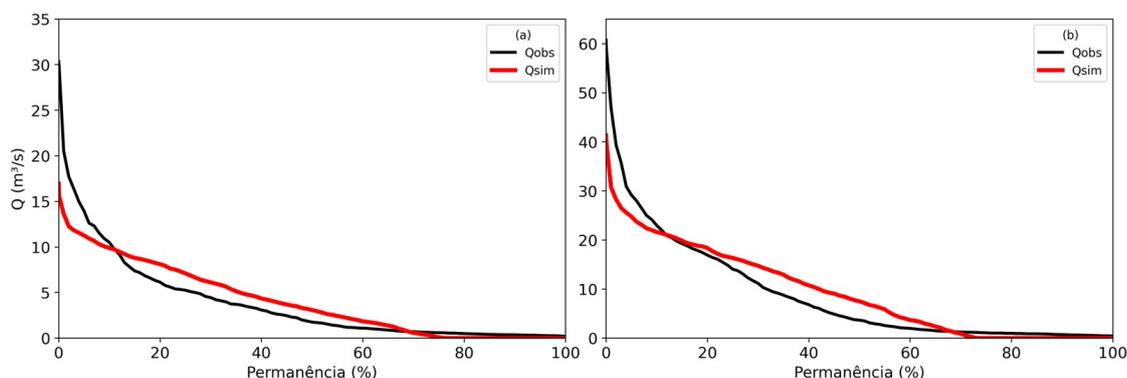


Figura 4 – Curvas de permanência observadas e simuladas para o período de calibração dos rios Piranhas (a) e Capivara (b)

Validação

Para validar o modelo, foram aplicados os parâmetros da Tabela 2 à Equação 15 com os dados de chuvas observadas para o período de validação (Tabela 2). Assim, mais uma vez, foram geradas curvas de permanência das vazões simuladas e observadas (Figura 5).

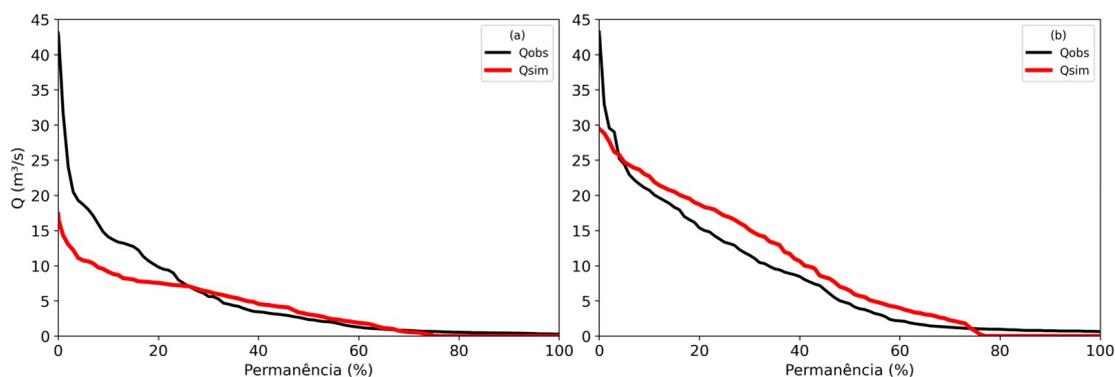


Figura 5 – Curvas de permanência observadas e simuladas para o período de validação dos rios Piranhas (a) e Capivara (b)

De maneira geral, tanto na calibração quanto na validação do modelo, percebe-se que as vazões de baixa frequência não são bem simuladas. Porém, no restante do espectro da curva, as vazões são razoavelmente simuladas. Blanco et al. (2007), também, analisaram esse aspecto, citando que para situações, nas quais não são necessárias análises de vazões de baixa frequência, ou seja, vazões de cheia, o modelo pode ser utilizado para análise de vazões de permanência médias e de alta frequência. Essas últimas representam as vazões mínimas de referência analisadas no presente trabalho.

Curvas de Permanência e Cenários Futuros

Para uma análise destacada em função do tempo, foram simuladas curvas de permanência de vazão com dados de chuva futuros das duas pequenas bacias hidrográficas para quatro períodos: observado (Tabela 1), 2023-2029 (futuro próximo), 2050-2059 (meio do século) e 2090-2099 (fim do século). As curvas de permanência simuladas são em relação a esses períodos e aos cenários RCP 4.5

(Figura 6) e RCP 8.5 (Figura 7). Como era esperado e podendo ser observado nas Figuras 6-7, as curvas de permanência simuladas para os períodos futuros mantiveram padrão semelhante aos das curvas simuladas para os períodos de calibração e validação do modelo.

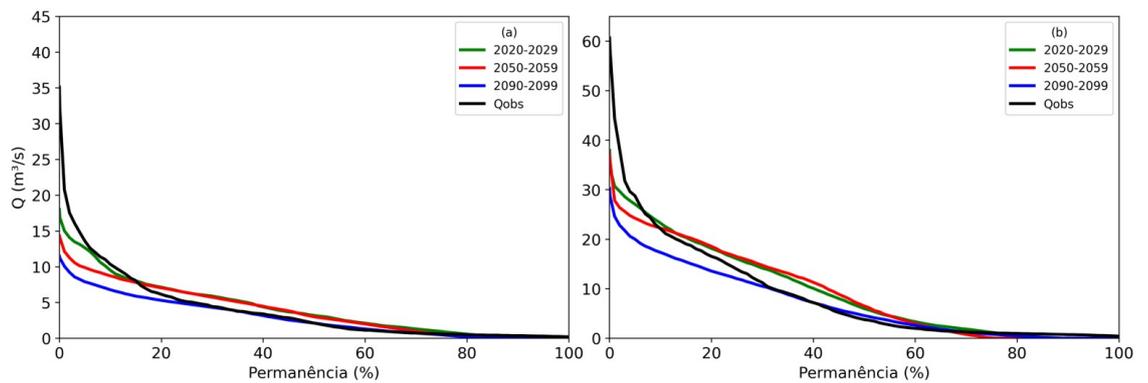


Figura 6 – Curvas de permanência observadas e simuladas do rio Piranhas (a) e Capivara (b) para os três períodos analisados em função do RCP 4.5

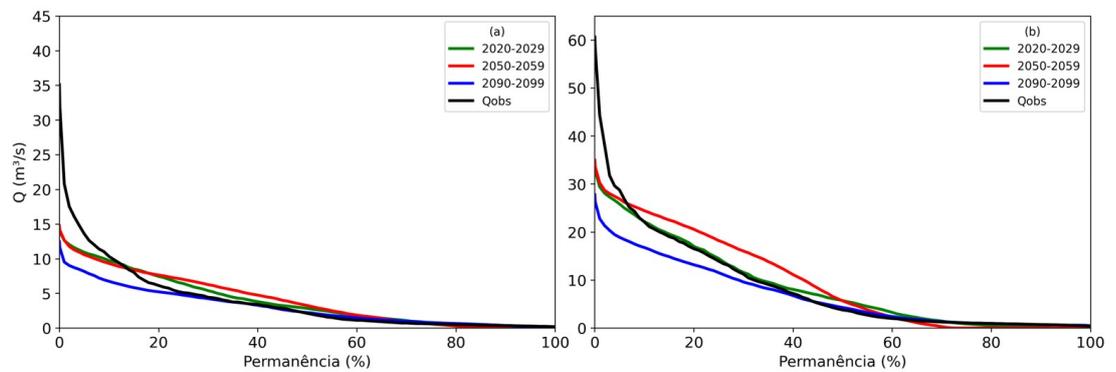


Figura 7 – Curvas de permanência observadas e simuladas do rio Piranhas (a) e Capivara (b) para os três períodos analisados em função do RCP 8.5

Análise das Vazões Mínimas de Referência Futuras

Na Figura 8 são mostrados os valores de vazões de referências observadas e simuladas para as duas pequenas bacias hidrográficas analisadas em função dos RCPs 4.5 e 8.5; e em função dos períodos futuro próximo, meio do século e fim do século. Observando que para o estado do Tocantins, onde se encontram as bacias dos rios Piranhas e Capivara, tem-se como vazão de referência a vazão $Q_{90\%}$.

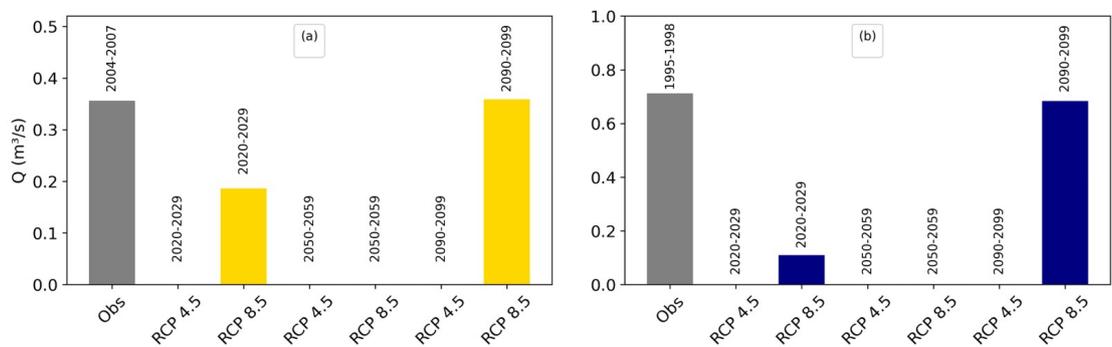


Figura 8 – Vazões mínimas de referência observadas e simuladas dos rios Piranhas (a) e Capivara (b) para os três períodos futuros analisados em função dos RCPs 4.5 e 8.5

Para a bacia do rio Piranhas, pode-se observar na Figura 8a, que no cenário RCP 4.5, é provável que a vazão mínima de referência seja nula para todos os períodos analisados. Já para o RCP 8.5, a

vazão mínima de referência é nula no período 2050-2059; diminuindo no período 2023-2029 (0,20 m³/s) e aumentando no período 2090-2099(0,38 m³/s), quando comparada a vazão mínima de referência (Q_{90%}) observada (0,37 m³/s). A vazão mínima de referência sendo nula ou se reduzindo, projeta um futuro de outorga do uso da água mais restrito, e claro, podendo gerar conflitos na bacia. Para a bacia do rio Capivara (Figura 8b), observa-se que no cenário RCP 4.5, a vazão mínima de referência (Q_{90%}) deve ser nula nos três períodos analisados. No cenário RCP 8.5, a vazão mínima de referência deve diminuir no período 2023-2029 (0,12 m³/s), 2050-2059 (0,00 m³/s) e 2090 a 2099 (0,70 m³/s), se comparada à vazão mínima de referência observada (0,71 m³/s). Também, como no caso da bacia do rio Piranhas, a bacia do rio Capivara deverá passar por estresse hídrico com a outorga do uso da água sendo mais restrita, acarretando a geração de conflitos. Essa tendência de redução de disponibilidade hídrica é confirmada pela própria projeção de chuvas na região dessas duas bacias, conforme discutido anteriormente. Essas reduções de vazão mínima de referência estão de acordo com os trabalhos de: Rodrigues et al. (2020) que encontraram uma redução de 20% na vazão de três bacias do bioma Cerrado; Cambraia Neto et al. (2021) estimaram redução da recarga de água subterrânea na bacia do rio Buriti Vermelho, no Cerrado brasileiro, para o RCP 4.5 (em média redução de 20%) e RCP 8.5 (também em média redução de 20%); Taveira & Santos (2019), Sá et al. (2019), Ricardo et al. (2020) e Zákha et al. (2021), os quais também apontaram redução das vazões mínimas de referências nas bacias hidrográficas analisadas em seus trabalhos.

CONCLUSÃO

O modelo chuva-vazão utilizado simula melhor as vazões de alta frequência (vazões mínimas) que as vazões de baixa frequência (vazões máximas). E as vazões de alta frequência são as necessárias para as análises de vazões mínimas de referência. Em relação à influência das mudanças climáticas, as vazões mínimas de referência, tanto no cenário RCP 4.5, quanto no cenário RCP 8.5, tendem a diminuir para as duas pequenas bacias hidrográficas analisadas. Entretanto, exceção se faz no cenário RCP 8.5 para o final do século, quando as vazões pouco variam em relação à vazão mínima de referência observada. Nos cenários em que as pequenas bacias apresentaram redução de vazão mínima de referência, ou seja, na maioria das vezes, vazões nulas foram simuladas. Nesses casos, é necessária atenção dos tomadores de decisão para projetos de manejo, uso e captação sustentáveis de água para se evitar conflitos pelo uso da água. Esses projetos devem visar o enfrentamento da crise climática para proteção das populações, principalmente, as mais vulneráveis.

Referências

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2004). Res. RE nº 542, de 03 de novembro de 2004. Delega competência para deferimento de pedidos de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Almagro, A., Oliveira, P. T. S., Rosolem, R., Hagemann, S., & Nobre, C. A. (2020). Performance evaluation of ETA/HadGEM2-ES and ETA/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. *Atmospheric Research*, *244*, 105053.
- Barros, C. G. D., Blanco, C. J. C., Pessoa, F. C. L., Gomes, E. P., & Santana, L. R. (2019). Regionalização da vazão Q95% na Amazônia. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, *12*(1), 1-13.
- Benetti, A. D., Lanna, A. E. L., & Cobalchini, M. S. (2003). Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, *8*(2), 149-160.
- Blanco, C. J. C., Santos, S. S. M., Quintas, M. C., Vinagre, M. V. A., & Mesquita, A. L. A. (2013). Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall-runoff models to simulate flow duration curves. *Hydrological Sciences Journal*, *58*(7), 1423-1433.
- Blanco, C. J. C., Secretan, Y., & Favre, A. (2007). Análise, aplicação e transposição de um modelo chuva-vazão para simulação de curvas de permanência de pequenas bacias da Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, *12*(1), 205-216.
- Brasil. (2016). *3ª comunicação nacional do Brasil à Convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima*.
- Cambraia Neto, A. J., Rodrigues, L. N., Silva, D. D., & Althoff, D. (2021). Impact of climate change on groundwater recharge in a Brazilian Savannah watershed. *Theoretical and Applied Climatology*, *143*(3-4), 1425-1436.
- Chatfield, C. (1980). *The analysis of time series: an introduction* (2. ed). Chapman and Hall.
- Chokkavarapu, N., & Mandla, V. R. (2019). Comparative study of GCMs, RCMs, downscaling and hydrological models: a review toward future climate change impact estimation. *SN Applied Sciences*, *1*(12), 1-15.

- Chou, S., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P., & Marengo, J. (2014a). Evaluation of the ETA simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, 3(5), 438.
- Chou, S., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014b). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3(5), 512.
- Costa, C. E. A. S., Blanco, C. J. C., & Oliveira-Júnior, J. F. (2021). Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. *Climatic Change*, 166(3), 1-22.
- Costa, R. L., Gomes, H. B., Silva, F. D. D. S., Baptista, G. M. D. M., Rocha Júnior, R. L. D., Herdies, D. L., & Silva, V. D. P. R. D. (2020). Cenários de mudanças climáticas para a região nordeste do Brasil por meio da técnica de downscaling estatístico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 785-801.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (1999). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Serviço de Produção de Informação.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2014). *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*. Geneva: IPCC.
- Longhi, E. H., & Formiga, K. T. M. (2011). Metodologias para determinar vazão ecológica em rios. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 20, 33-48. Recuperado em 12 de dezembro de 2022, de https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/352
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S. C., Sueiro, G., Dereczynski, C., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., & Giarolla, A. (2018). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, 132, 663-682.
- Marengo, J. A. (2008). Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, 22, 83-96.
- Marengo, J. A., Jimenez, J. C., Espinoza, J. C., Cunha, A. P., & Aragão, L. E. (2022). Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Scientific Reports*, 12(1), 457.
- Organização das Nações Unidas – ONU. (2015). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Recuperado em 22 de agosto de 2022, de <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>
- Organização Mundial de Meteorologia – OMM. (2014). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos*. Recuperado em 30 de novembro de 2022, de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3664
- Portal Hidroweb. (2023, 20 de março). Recuperado em 10 de agosto de 2022, de <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>
- Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo ETA – PROJETA. (2023, 20 de março). Recuperado em 20 de agosto de 2022, de <https://projeta.cptec.inpe.br/>
- Quintas, M. C., Blanco, C. J. C., & Mesquita, A. L. A. (2011). A non-linear rainfall-runoff model applied to Amazon small catchments with limited data to simulate the flow duration curves. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 1(1-2), 19-36.
- Reboita, M. S., Kuki, C. A. C., Marrafon, V. H., Souza, C. A., Ferreira, G. W. S., Teodoro, T., & Lima, J. W. M. (2022). South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Climate Dynamics*, 58(1), 459-485.
- Ricardo, G. S., Rafaeli Neto, S. L., Campos, C. G. C., & Schina, B. Á. (2020). Prognósticos de alterações nas vazões de base como meio de suporte ao gerenciamento de recursos hídricos. *Águas Subterrâneas*, 34(1), 112-124.
- Rodrigues, J. A. M., Viola, M. R., Alvarenga, L. A., Mello, C. R., Chou, S. C., Oliveira, V. A., Uddameri, V., & Morais, M. A. V. (2020). Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. *International Journal of Climatology*, 40(5), 2511-2526.
- Sá, R. A., Kondo, M. K., Vieira, E. O., Santos, S. R., Vieira, N. P. A., & Pizetta, S. C. (2019). Simulação hidrológica ferramenta para gestão dos recursos hídricos em função de mudanças climáticas na bacia do Rio Riachão, MG, Brasil. *Nativa*, 7(6), 718-726.
- Sanson, A. V., Van Hoorn, J., & Burke, S. E. L. (2019). Responding to the impacts of the climate crisis on children and youth. *Child Development Perspectives*, 13(4), 201-207.
- Santana, L. R., & Blanco, C. J. C. (2022). Contribution to the classification of small catchments according to the drainage area. *International Journal of River Basin Management*, 20(1), 111-122.

- Santos, P. V. C. J., & Cunha, A. C. (2013). Outorga de recursos hídricos e vazão ambiental no Brasil: perspectivas metodológicas frente ao desenvolvimento do setor hidrelétrico na Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), 81-95.
- Santos, W. P., Avanzi, J. C., Viola, M. R., Chou, S. C., Acuña-Guzman, S. F., Pontes, L. M., & Curi, N. (2022). Projections of rainfall erosivity in climate change scenarios for the largest watershed within Brazilian territory. *Catena*, 213, 106225.
- Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(33), 19656-19657.
- Sombroek, W. (2001). Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. *Ambio*, 30(7), 388-396.
- Taveira, B. D. A., & Santos, I. (2019). Avaliação do efeito de mudanças climáticas na vazão e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, Serra do Mar paranaense. *Boletín Geográfico*, 37(2), 29-42.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Warren, A., & Sombroek, W. G. (1967). Amazon soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region by W. G. Sombroek. *The Geographical Journal*, 133, 550-551.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'Ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Kimoto, M., Yamazaki, D., Yokonata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Takata, K. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312-6335.
- Zákha, E. M. S., Alvarenga, L. A., Tomasella, J., Martins, M. A., Santos, A. C. N., & Melo, P. A. (2021). Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no sul do estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36, 667-681.

Contribuições dos autores:

Giovanna Klautau Leite Costa: concepção do trabalho, escrita geral, levantamento bibliográfico e de dados, análise dos resultados e revisão geral do artigo.

Claudio José Cavalcante Blanco: revisão geral do artigo, análise dos resultados, escrita geral.

Amanda de Cássia Lobato Soares: revisão geral do artigo, análise dos resultados, escrita geral.

Josias da Silva Cruz: revisão geral do artigo, análise dos resultados, escrita geral.

Leonardo Melo de Mendonça: revisão geral do artigo, análise dos resultados, escrita geral.