

## **GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO RIO MADEIRA, ESTAÇÃO BORBA, FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

### **WATER RESOURCES MANAGEMENT OF THE MADEIRA RIVER, BORBA STATION, IN THE FACE OF CLIMATE CHANGE**

### **GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL RÍO MADEIRA, ESTACIÓN BORBA, FRENTE A LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS**

**Jeniffer Hachiley de Sousa Torquato**

Universidade do Estado do Amazonas, Centro de Estudos, Mestranda do PPG em  
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Amazonas, Brasil  
[jhdst.mgr24@uea.edu.br](mailto:jhdst.mgr24@uea.edu.br)  
0009-0008-7182-0010

**José Camilo Ramos de Souza**

Universidade do Estado do Amazonas, PPG em Gestão e Regulação de Recursos  
Hídricos, Doutor em Ciências, Amazonas, Brasil  
[jramos@uea.edu.br](mailto:jramos@uea.edu.br)  
0000-0002-0578-8533

**Joecila Santos da Silva**

Universidade do Estado do Amazonas, PPG em Gestão e Regulação de Recursos  
Hídricos, Pós-doutorado em Ciências, Amazonas, Brasil  
[jdsilva@uea.edu.br](mailto:jdsilva@uea.edu.br)  
0000-0003-1005-5083

## **RESUMO**

As mudanças climáticas globais têm intensificado eventos hidrológicos extremos, como cheias severas e estiagens prolongadas, que impactam significativamente os ecossistemas e as comunidades ribeirinhas da bacia do rio Madeira. Este estudo analisou a dinâmica hidrológica do rio Madeira, com foco na Estação Borba, no período de 1993 a 2023, destacando os impactos ecológicos, sociais e econômicos dos eventos extremos. A metodologia incluiu a análise de dados históricos de cota, obtidos do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), com a elaboração de gráficos representativos, como cotagramas, distribuição de picos de cheia e estiagem, e séries históricas de máximas e mínimas. Os resultados revelaram uma sazonalidade bem definida no regime hidrológico, com períodos consistentes de cheia e estiagem. No entanto, foi constatada uma intensificação de eventos extremos ao longo das últimas três décadas, como a cheia de 2014 (22,5 m) e a estiagem de 1993 (8,0 m), gerando impactos profundos nos serviços ecossistêmicos e na resiliência socioeconômica da região. Conclui-se que o manejo sustentável dos recursos hídricos do rio Madeira requer ações coordenadas que integrem monitoramento contínuo, políticas públicas adaptativas e o engajamento das comunidades locais para mitigar os impactos das alterações climáticas.

**Palavras-chave:** Eventos extremos; Dinâmica sazonal; Sustentabilidade hídrica; Impactos climáticos.

## ABSTRACT

Global climate change has intensified extreme hydrological events, such as severe floods and prolonged droughts, which significantly impact the ecosystems and riverside communities of the Madeira River basin. This study analyzed the hydrological dynamics of the Madeira River, focusing on the Borba Station, from 1993 to 2023, highlighting the ecological, social, and economic impacts of extreme events. The methodology included the analysis of historical water level data obtained from the National Water Agency (ANA) database, with the development of representative graphs, such as stage-discharge diagrams, flood and drought peak distributions, and historical series of maximum and minimum levels.

The results revealed a well-defined seasonality in the hydrological regime, with consistent periods of flooding and drought. However, an intensification of extreme events was observed over the last three decades, such as the 2014 flood (22.5 m) and the 1993 drought (8.0 m), causing profound impacts on ecosystem services and the socioeconomic resilience of the region.

It is concluded that the sustainable management of the Madeira River's water resources requires coordinated actions that integrate continuous monitoring, adaptive public policies, and the engagement of local communities to mitigate the impacts of climate change.

**Keywords:** Extreme events; Seasonal dynamics; Water sustainability; Climate impacts.

## RESUMEN

Los cambios climáticos globales han intensificado los eventos hidrológicos extremos, como inundaciones severas y sequías prolongadas, que impactan significativamente los ecosistemas y las comunidades ribereñas de la cuenca del río Madeira.

Este estudio analizó la dinámica hidrológica del río Madeira, con énfasis en la Estación Borba, en el período de 1993 a 2023, destacando los impactos ecológicos, sociales y económicos de los eventos extremos. La metodología incluyó el análisis de datos históricos de nivel, obtenidos de la base de datos de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), con la elaboración de gráficos representativos, como hidrogramas, distribución de picos de inundaciones y sequías, y series históricas de valores máximos y mínimos.

Los resultados revelaron una estacionalidad bien definida en el régimen hidrológico, con períodos consistentes de crecida y estiaje. Sin embargo, se constató una intensificación de los eventos extremos a lo largo de las últimas tres décadas, como la inundación de 2014 (22,5 m) y la sequía de 1993 (8,0 m), generando impactos profundos en los servicios ecosistémicos y en la resiliencia socioeconómica de la región.

Se concluye que el manejo sostenible de los recursos hídricos del río Madeira requiere acciones coordinadas que integren monitoreo continuo, políticas públicas adaptativas y la participación activa de las comunidades locales para mitigar los impactos del cambio climático.

**Palabras clave:** Eventos extremos; Dinámica estacional; Sostenibilidad hídrica; Impactos climáticos.

## 1. Introdução

A gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas de grande porte, como a do rio Madeira, assume papel importante na promoção da resiliência ecológica e socioeconômica em face das mudanças climáticas globais (BEHBOUDIAN e KERACHIAN, 2021; KARAN *et al.*,

2023; SADHWANI e ELDHO, 2023). A intensificação de eventos extremos, como cheias e grandes e severas vazantes, está diretamente associada a alterações no regime climático, degradação ambiental e transformações no uso e cobertura do solo na região amazônica (PAREDES-TREJO *et al.*, 2021; PAREDES-TREJO *et al.*, 2022; STAAL *et al.*, 2020; VAN PASSEL *et al.*, 2022). Tais fenômenos têm gerado impactos significativos, não apenas na biodiversidade aquática, mas também na qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos, comprometendo os serviços ecossistêmicos e afetando diretamente as comunidades ribeirinhas que dependem do rio Madeira para sua subsistência e desenvolvimento econômico (DE SOUZA *et al.*, 2019; DE SOUZA *et al.*, 2020; DORIA *et al.*, 2020). No cenário atual, o planejamento e a implementação de estratégias integradas de gestão dos recursos hídricos emergem como ferramentas indispensáveis para mitigar os efeitos negativos das mudanças climáticas e assegurar a sustentabilidade ambiental e social da região.

Localizada no médio curso do rio Madeira, a estação limimétrica Borba desempenha um papel estratégico para o monitoramento hidrológico e para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a dinâmica hídrica da bacia (SIQUEIRA JÚNIOR *et al.*, 2013). Estudos recentes destacam que a intensificação de eventos hidrológicos extremos tem alterado padrões de fluxo, sedimentação e qualidade da água, promovendo modificações nos ecossistemas aquáticos e terrestres (SABATER *et al.*, 2022; YILMAZ *et al.*, 2021). Além disso, as mudanças no regime hidrológico afetam a economia local, baseada em atividades como pesca, agricultura de várzea e transporte fluvial, gerando prejuízos econômicos e sociais para as populações que habitam as margens do rio (SANTOS *et al.*, 2020). Esses efeitos tornam evidente a necessidade de compreender os processos hidrológicos da região e de implementar estratégias de gestão baseadas em dados científicos que considerem os impactos das mudanças climáticas no contexto regional (VERGASTA *et al.*, 2021; VERGASTA *et al.*, 2023).

A intensificação de cheias e vazantes o rio Madeira não é apenas um reflexo das alterações climáticas globais, mas também um produto de processos locais, como o desmatamento, a expansão urbana desordenada e a construção de grandes empreendimentos, como hidrelétricas e rodovias (ALMEIDA *et al.*, 2020; ESPINOZA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2020). Esses fatores contribuem para alterar o equilíbrio natural da bacia hidrográfica, aumentando a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente aos impactos das mudanças climáticas. Embora as iniciativas de gestão hídrica tenham avançado em algumas regiões da Amazônia, ainda há lacunas significativas em termos de políticas públicas

adaptativas e na integração de abordagens científicas para a formulação de soluções baseadas em evidências (FEEREIRA *et al.*, 2020). A estação linimétrica Borba, como ponto de referência no médio curso do rio Madeira, oferece uma oportunidade única para monitorar essas alterações e propor estratégias que minimizem os impactos negativos, ao mesmo tempo em que promovam o uso sustentável dos recursos hídricos.

Este artigo tem como objetivo analisar a dinâmica hidrológica da estação linimétrica Borba, com foco nos impactos ecológicos, sociais e econômicos decorrentes de eventos extremos registrados nas últimas três décadas. A partir de uma abordagem interdisciplinar, busca-se identificar os principais fatores que influenciam as alterações no regime hidrológico e propor estratégias adaptativas que possam subsidiar políticas públicas voltadas à gestão integrada dos recursos hídricos da região. Com isso, pretende-se contribuir para o fortalecimento das práticas de manejo hídrico, promovendo a resiliência ambiental e social em um dos contextos mais desafiadores do Brasil. Este estudo, ao integrar ciência, tecnologia e governança, oferece subsídios relevantes para a conservação e o uso sustentável dos recursos hídricos no cenário amazônico, atendendo às demandas locais e globais por sustentabilidade e equidade ambiental.

## **2. Metodologia**

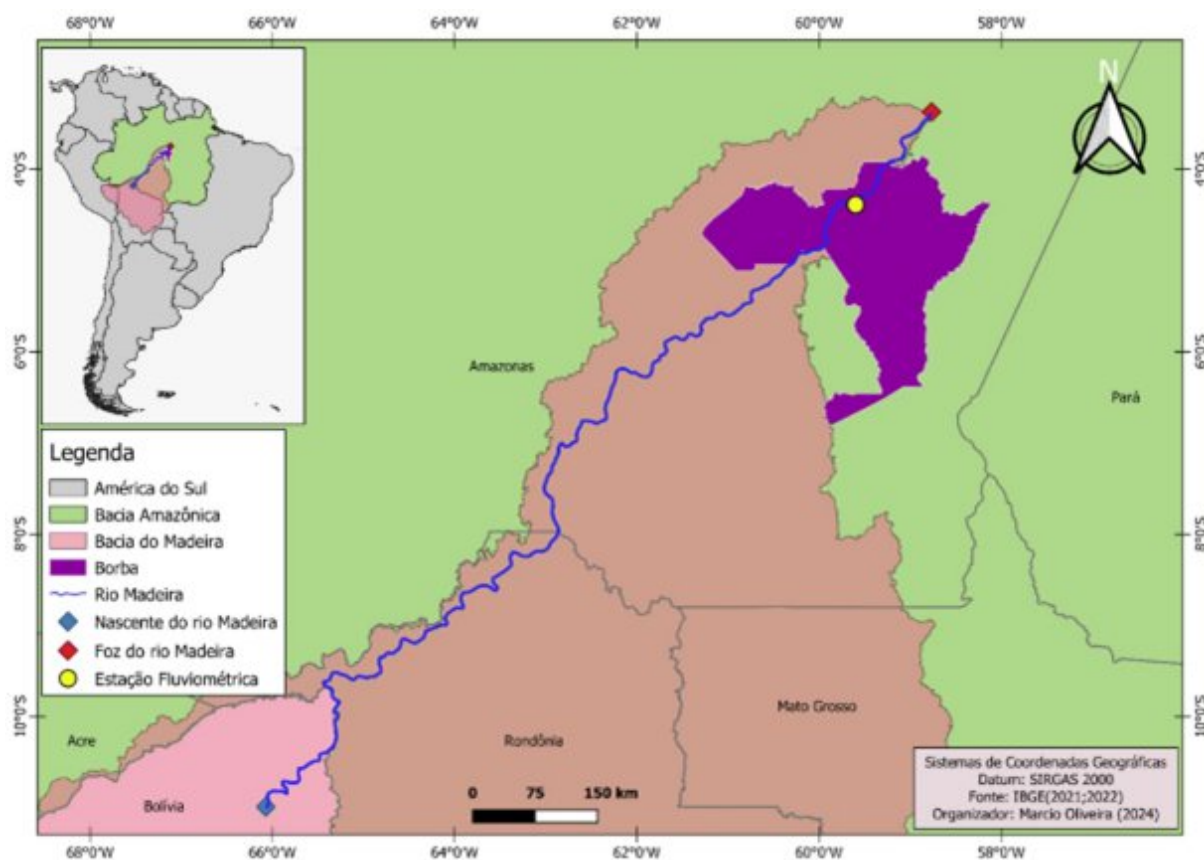
### **2.1 Área de Estudo**

O rio Madeira é um dos principais afluentes do rio Amazonas, com uma extensão aproximada de 3.240 km e uma área de drenagem que abrange cerca de 1.420.000 km<sup>2</sup>, distribuída entre Brasil, Bolívia e Peru (RODRIGUEZ *et al.*, 2013). A bacia do rio Madeira é amplamente reconhecida por sua importância ambiental e socioeconômica, fornecendo serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação hídrica e suporte à biodiversidade. A estação fluviométrica de Borba, localizada no município homônimo no estado do Amazonas, é estratégica para o monitoramento hidrológico, fornecendo dados fundamentais para a gestão de recursos hídricos e previsão de eventos hidrológicos extremos, como cheias e estiagens (GOMES *et al.*, 2019).

O regime hidrológico do rio Madeira em Borba é caracterizado por uma clara sazonalidade. Os períodos de cheia ocorrem predominantemente entre os meses de dezembro e maio, enquanto a estiagem se concentra de junho a novembro. Essa dinâmica sazonal é

fortemente influenciada pelas precipitações nos Andes e nas regiões adjacentes, que desempenham papel crucial no comportamento das vazões e níveis de água do rio Madeira (SIQUEIRA JÚNIOR *et al.*, 2013). Alterações no uso do solo e mudanças climáticas têm potencial para modificar significativamente esse padrão, aumentando os riscos associados a eventos extremos, como enchentes e grandes vazantes prolongadas.

A estação linimétrica de Borba desempenha um papel fundamental no fornecimento de informações contínuas sobre as condições hidrológicas do rio Madeira. Esses dados são utilizados em estudos hidrológicos e na formulação de políticas de gestão de recursos hídricos. Além disso, a integração de dados hidrológicos com modelos climáticos, como o MGB-INPE, permite prever possíveis mudanças no regime hidrológico da bacia, contribuindo para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas (RODRIGUEZ *et al.*, 2013). Esse conhecimento é essencial para promover o uso sustentável dos recursos hídricos na região e garantir a resiliência das comunidades que dependem do rio Madeira.



**Figura 1:** Mapa de localização da estação fluviométrica no Rio Madeira, Borba-AM.

Fonte: Autores, 2024.

## 2.2 Dados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os dados de cota da estação limimétrica Borba, cadastrada no banco de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) sob o código 15900000, obtida a partir do Portal Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>), pertencente ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), e que disponibiliza uma gama de dados hidrológicos coletados pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) (Quadro 1).

A escolha da estação considerou como critério principal a quantidade de dados de cota disponíveis pela estação, cujo período de dados compreende de 01/01/1993 a 31/12/2023 (adotou-se 30 anos como quantidade mínima de anos necessários).

<b>Estação</b>	<b>Código</b>	<b>Número de anos de dados de cota disponíveis</b>
Borba	15900000	30

**Quadro 1:** Estação de monitoramento Borba: Código e número de anos com dados de cota disponíveis.

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2024.

## 2.3 – Métodos

A partir dos dados de cota disponíveis da estação escolhida, procedeu-se com elaboração de três ferramentas gráficas: o cotagrama, ocorrência das máximas e mínimas e cotas máximas e mínimas. Para o desenvolvimento destas foi utilizado o auxílio do software Excel, desenvolvido pela Microsoft (365), como apoio na organização dos dados e geração das curvas.

## 2.4 – Cotagrama

Este gráfico foi obtido a partir da ordenação dos dados de cota de forma que cada coluna representasse um ano e cada linha dessa coluna, um dia do ano. Sendo assim, uma matriz de 365 linhas e  $N_a$  (número de anos de cotas da amostra) colunas foi formada. De cada linha foi retirado seu valor médio, representando, assim, a cota média daquele dia considerando todos os anos registrados, conforme equação 1, de Montgomery e Runger (2003).

$$c_{md} = \frac{\sum c_d}{n_{rd}} \quad (1)$$

Onde:

$c_{md}$ : cota média diária [m];

$c_d$ : cota diária [m]; e

$n_{rd}$ : número de registros na data.

O gráfico foi elaborado colocando no eixo das abscissas os dias equivalentes ao período de um ano inteiro, do dia 01/jan ao dia 31/dez. No eixo das ordenadas foram distribuídas as cotas médias diárias considerando todos os anos.

## 2.5 - Ocorrência das cheias e estiagens

Utilizando-se da mesma organização dos dados do cotograma, ordenou-se as cotas máximas (pico de cheia) conforme mês de ocorrência, e atribuiu-se a cada mês de cota máxima um percentual correspondente ao total de registros, conforme equação 2, de Montgomery e Runger (2003). Procedendo-se o mesmo para os meses de cotas mínimas (pico de estiagem), utilizando a equação 3, de Montgomery e Runger (2003).

$$\%_{máx} = \frac{n_{cmáx}}{N_a} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$\%_{máx}$ : Percentual de picos de cheia no mês;

$n_{cmáx}$ : número de cotas máximas no mês; e

$N_a$ : número de anos de cotas da amostra.

$$\%_{mín} = \frac{n_{cmín}}{N_a} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\%_{máx}$ : Percentual de picos de estiagem no mês;

$n_{cmín}$ : número de cotas mínimas no mês; e

$N_a$ : número de anos de cotas da amostra.

O gráfico foi elaborado colocando no eixo das abscissas os meses de registro das cotas máximas e mínimas e no eixo das ordenadas os percentuais de ocorrências dos picos de cheia e estiagem.

## 2.6 - Máximas e Mínimas

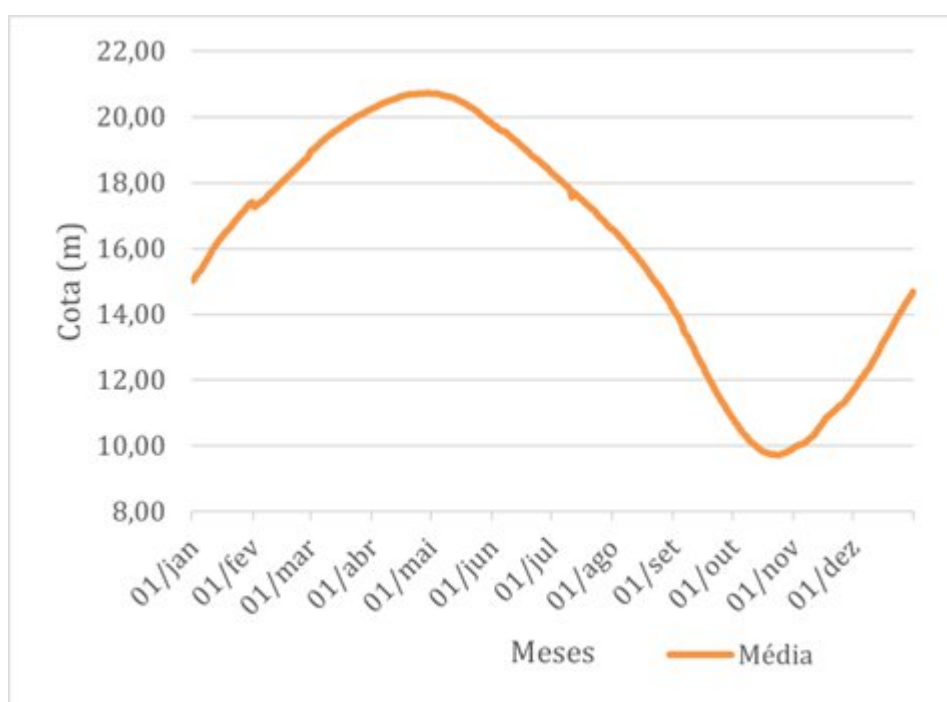
Utilizou-se da mesma organização dos dados do cotagrama para obtenção dos valores das cotas máximas e mínimas, onde foram extraídos os valores das cotas máximas e mínimas de cada ano.

O gráfico foi elaborado colocando no eixo das abscissas os anos de registro e no eixo das ordenadas as cotas máximas e as cotas mínimas.

## 3. Resultados e Discussão

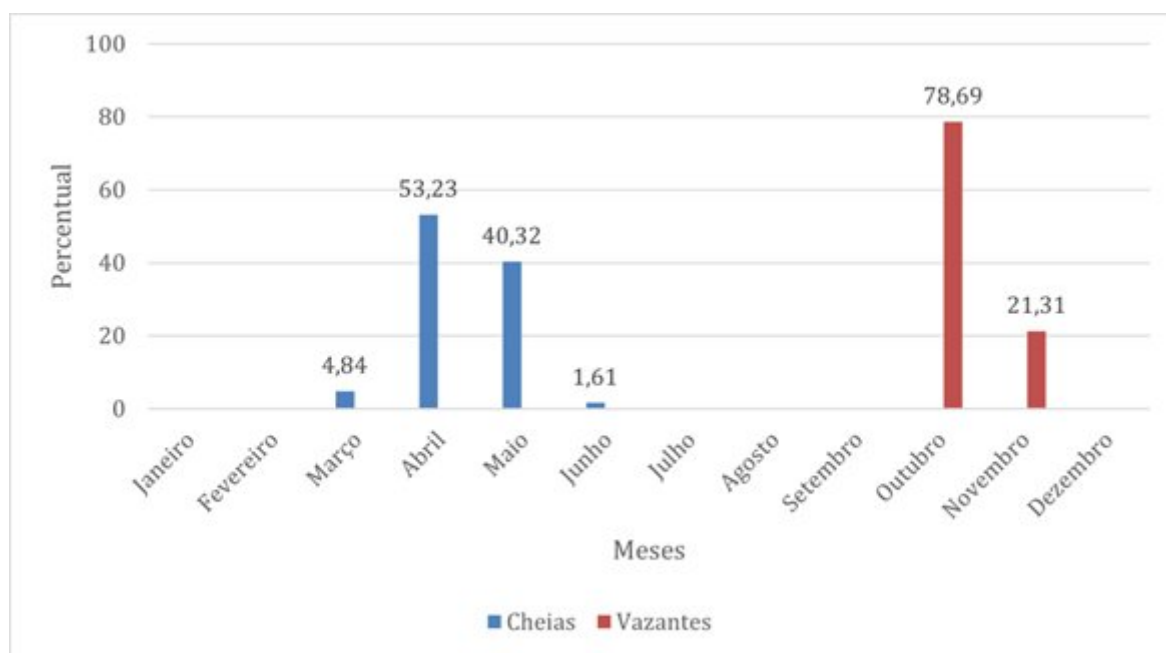
A análise do regime hidrológico do rio Madeira, baseada nos dados da estação de monitoramento de Borba, para o período de 1993 a 2023, revela uma dinâmica sazonal bem definida, como ilustrado na Figura 2. O cotagrama elaborado evidencia a alternância entre os períodos de cheia e estiagem, característicos da bacia Amazônica. Durante o período de cheia, que ocorre de novembro a junho, o nível médio máximo das águas alcança aproximadamente 20,0 metros em junho. Esse comportamento hidrológico é caracterizado por uma ascensão gradual das águas, seguida por uma recessão mais acelerada, resultando em um cotagrama modal assimétrico, típico das grandes bacias fluviais amazônicas (CHAUDHARI e POKHREL, 2022; SWANSON *et al.*, 2021). Em contrapartida, o período de estiagem, que se estende de julho a outubro, registra um nível médio mínimo de cerca de 10,0 metros, em outubro, refletindo a influência das chuvas regionais e das interações com o regime dos seus afluentes (DA MOTTA PACA *et al.*, 2020). Esses valores diferem dos apresentados por Siqueira Júnior *et al.* (2013), visto que seu período de análise (1970 a 1990) é anterior do presente estudo denotando mudanças na dinâmica sazonal dos níveis de água do rio Madeira após os anos 1990.





**Figura 2:** Cotagrama do rio Amazonas, na foz do rio Madeira, para os períodos compreendidos entre os anos de 1993 a 2023.  
Fonte: Autores, 2024.

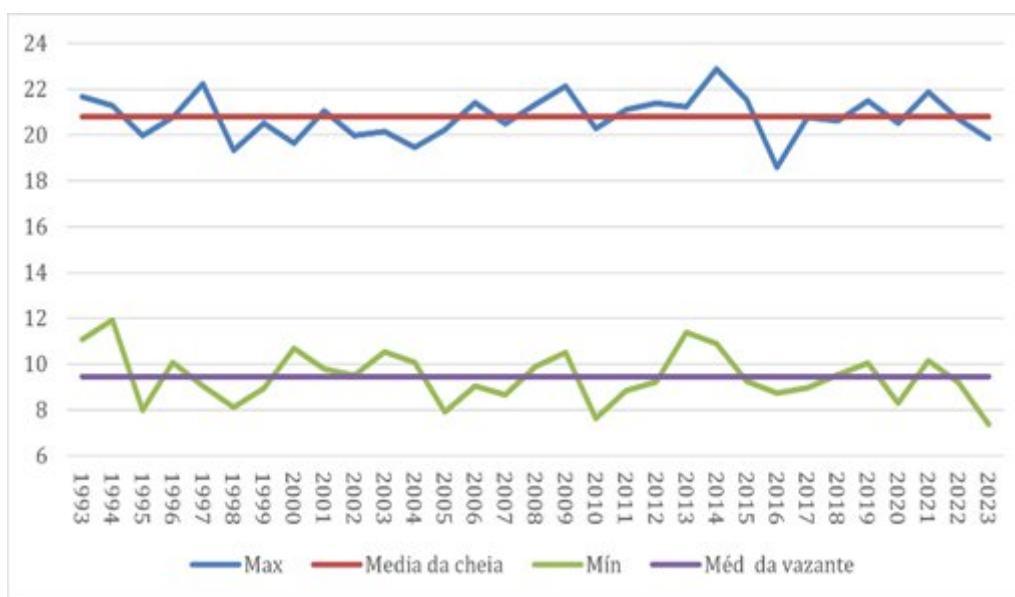
A Figura 3 detalha a ocorrência dos picos de cheia e estiagem ao longo do período analisado, em azul apresentam-se os meses de ocorrência das cotas máximas (pico de cheia) e em vermelho os meses de ocorrência das cotas mínimas (pico de estiagem). Os picos de cheia concentram-se majoritariamente em abril (53,23%) e maio (40,32%), com menor frequência em março (4,84%) e junho (1,61%). Por outro lado, os picos de estiagem ocorrem predominantemente em outubro (78,69%) e novembro (21,31%). Esses padrões reforçam a regularidade sazonal do regime hidrológico do rio Madeira, alinhando-se aos ciclos de precipitação característicos da bacia Amazônica (DE SOUZA *et al.*, 2020). A sazonalidade bem definida, entretanto, não impede a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como cheias históricas e estiagens prolongadas, cuja frequência e magnitude têm aumentado nas últimas décadas (ALMEIDA *et al.*, 2017; ANDRADE *et al.*, 2016; DE SOUZA *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2014; PARRENS *et al.*, 2023).



**Figura 3:** Ocorrência das cheias e estiagens do rio Madeira, em Borba, para os períodos compreendidos entre os anos de 1993 a 2023.

Fonte: Autores, 2024.

Na Figura 4, a análise das cotas máximas e mínimas anuais evidencia a magnitude dos eventos hidrológicos extremos ao longo da série histórica, em azul apresentam-se os meses de ocorrência das cotas máximas (pico de cheia) e em verde os meses de ocorrência das cotas mínimas (pico de estiagem), as linhas vermelha e lilás, corresponde, às médias das cotas máximas e mínimas, respectivamente. A cota máxima histórica foi registrada em 2014, com 22,5 metros, enquanto a mínima entre as máximas foi de 20,0 metros, em 1993. Para as cotas mínimas, o menor valor foi registrado em 1993, com 8,0 metros, e o maior valor mínimo ocorreu em 2014, com 12,0 metros. Esses resultados indicam uma intensificação dos extremos hidrológicos, consistente com as projeções de aumento da variabilidade climática na bacia Amazônica (BARICHIVICH *et al.*, 2018; DUFFY *et al.*, 2015; GLOOR *et al.*, 2015; RESTREPO-COUBE *et al.*, 2023). Apesar disso, a média das cotas máximas (21,0 metros) e mínimas (10,0 metros) ao longo do período reflete uma estabilidade sazonal ainda predominante no regime hidrológico.



**Figura 4:** Cotas máximas e mínimas anuais do rio Madeira, em Borba (1993 - 2023).  
 Fonte: Autores, 2024.

Esses eventos hidrológicos extremos, como as cheias severas de 2014 e as estiagens prolongadas de 1997 e 2010, têm impactos profundos nos ecossistemas e nas comunidades ribeirinhas. As cheias extremas promovem a dispersão de nutrientes e a conectividade de habitats aquáticos, fundamentais para a reprodução de espécies em áreas de várzea (DEATH *et al.*, 2015; HUANG *et al.*, 2019; LARSEN *et al.*, 2019). Contudo, também acarretam prejuízos econômicos e sociais, como deslocamento de populações, destruição de infraestrutura e interrupções nas atividades produtivas (MERZ *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021). Em contrapartida, as estiagens severas resultam na fragmentação de habitats aquáticos, na redução dos recursos pesqueiros e na limitação das rotas de navegação, fundamentais para a economia local (BĂNĂDUC *et al.*, 2021; LENNOX *et al.*, 2019).

Esses resultados destacam a importância de estratégias integradas de gestão hídrica, que combinem monitoramento contínuo e políticas públicas adaptativas para mitigar os impactos das mudanças climáticas. A intensificação dos eventos hidrológicos extremos sugere que, com a alteração da dinâmica sazonal, os sistemas hidrológicos da bacia do rio Madeira estão sob crescente pressão climática. O fortalecimento do monitoramento hidrológico e a promoção de práticas sustentáveis são essenciais para garantir a resiliência ecológica e socioeconômica da região. Assim, a preservação da dinâmica sazonal do rio Madeira e a mitigação dos impactos das alterações climáticas requerem esforços coordenados entre governos, comunidades locais e pesquisadores.

#### **4. Considerações Finais**

Este estudo analisou a dinâmica hidrológica do rio Madeira, na estação linimétrica Borba, ao longo de três décadas (1993-2023), com foco nos impactos ecológicos, sociais e econômicos decorrentes de eventos extremos, como cheias severas e estiagens prolongadas. Os resultados demonstraram que, embora o regime hidrológico da bacia mantenha uma sazonalidade consistente, caracterizada por períodos bem definidos de cheia e estiagem, seus períodos de ocorrência mudaram nos últimos 30 anos, bem como a magnitude e a frequência dos eventos hidrológicos extremos têm aumentado significativamente. Esses padrões estão alinhados às mudanças climáticas globais e às pressões antropogênicas locais, como o desmatamento e a expansão de atividades econômicas desordenadas.

As cheias extremas, apesar de seu papel essencial na manutenção dos ecossistemas de várzea e na redistribuição de nutrientes, têm causado impactos adversos, incluindo perdas econômicas, deslocamento populacional e degradação de infraestrutura. De forma complementar, as estiagens severas contribuem para a fragmentação dos ecossistemas aquáticos, a redução da biodiversidade e a intensificação de riscos ambientais, como incêndios florestais. Esses impactos evidenciam a vulnerabilidade da bacia do rio Madeira às alterações climáticas e às dinâmicas de uso do solo.

Os resultados reforçam a necessidade de políticas públicas baseadas em evidências científicas, voltadas para a mitigação e a adaptação aos impactos das mudanças climáticas na bacia Amazônica. O fortalecimento do monitoramento hidrológico contínuo, associado ao uso de modelos preditivos, é indispensável para prever e gerenciar eventos hidrológicos extremos, enquanto estratégias de manejo sustentável podem ajudar a preservar os recursos hídricos e ecossistemas da região. Além disso, é essencial integrar a participação das comunidades ribeirinhas na formulação de soluções, promovendo uma gestão hídrica mais inclusiva e eficaz.

O manejo sustentável da bacia do rio Madeira exige esforços coordenados entre pesquisadores (equipe multidisciplinar), gestores e comunidades locais. A integração entre ciência, tecnologia e governança é fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas, garantindo a resiliência socioeconômica e ecológica da região para o bem-estar dos povos de comunidades tradicionais, indígenas e demais moradores de comunidades e cidades amazônicas.

## Agradecimentos

O Presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP N°. 951420/2023. Agradecimentos a Universidade do Estado do Amazonas, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua (Mestrado Profissional em Rede Nacional) pelo apoio técnico científico aportado até o momento. Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pelo incentivo e apoio financeiro. Agradecimentos à ANA pela cessão de dados hidrológicos distribuídos gratuitamente.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Inventário das Estações Fluviométricas**. 2ª ed. Brasília: ANA, 2009. ISBN 978-85-89629-57-7.
- ALMEIDA, R.; HAMILTON, S.; ROSI, E.; BARROS, N.; DORIA, C.; FLECKER, A.; FLEISCHMANN, A.; REISINGER, A.; ROLAND, F. Hydropeaking operations of two run-of-river mega-dams alter downstream hydrology of the largest Amazon tributary. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00120>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- ALMEIDA, R.; PACHECO, F.; BARROS, N.; ROSI, E.; ROLAND, F. Extreme floods increase CO2 outgassing from a large Amazonian river. **Limnology and Oceanography**, v. 62, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/lno.10480>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- ANDRADE, C.; AZEVEDO, J.; FREITAS, M.; DEUS, L. Precipitation analysis and the influence of the El Niño phenomenon on the transboundary basin of the Madeira River. **Water Resources Management**, v. 30, p. 3077–3092, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1332-8>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- BĂNĂDUC, D.; SAS, A.; CIANFAGLIONE, K.; BARINOVA, S.; CURTEAN-BĂNĂDUC, A. The role of aquatic refuge habitats for fish, and threats in the context of climate change and human impact, during seasonal hydrological drought in the Saxon Villages Area (Transylvania, Romania). **Atmosphere**, v. 12, n. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos12091209>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- BARICHIVICH, J.; GLOOR, E.; PEYLIN, P.; BRIENEN, R.; SCHÖNGART, J.; ESPINOZA, J.; PATTNAYAK, K. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. **Science Advances**, v. 4, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8785>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- BEHBOUDIAN, M.; KERACHIAN, R. Evaluating the resilience of water resources management scenarios using the evidential reasoning approach: The Zarrinehrud river basin experience. **Journal of Environmental Management**, v. 284, 112025, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112025>. Acesso em: 1 dez. 2024.

- CHAUDAHARI, S.; POKHREL, Y. Alteration of river flow and flood dynamics by existing and planned hydropower dams in the Amazon River Basin. **Water Resources Research**, v. 58, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2021WR030555>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- DA MOTTA PACA, V.; ESPINOZA-DÁVALOS, G.; MOREIRA, D.; COMAIR, G. Variability of trends in precipitation across the Amazon River basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. **Water**, v. 12, n. 5, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12051244>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- DE SOUZA, C.; VIEIRA, L.; LEGENDRE, P.; CARVALHO, P.; VELHO, L.; BEISNER, B. Damming interacts with the flood pulse to alter zooplankton communities in an Amazonian river. **Freshwater Biology**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/FWB.13284>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- DE SOUZA, V.; MOREIRA, D.; FILHO, O.; RUDKE, A. Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira River Basin. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- DEATH, R.; FULLER, I.; MACKLIN, M. Resetting the river template: The potential for climate-related extreme floods to transform river geomorphology and ecology. **Freshwater Biology**, v. 60, p. 2477–2496, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/FWB.12639>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- DORIA, C.; DUTKA-GIANELLI, J.; SOUSA, S.; CHU, J.; GARLOCK, T. Understanding impacts of dams on the small-scale fisheries of the Madeira River through the lens of the Fisheries Performance Indicators. **Marine Policy**, v. 116, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104261>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- DUFFY, P.; BRANDO, P.; ASNER, G.; FIELD, C. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, p. 13172–13177, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1421010112>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- ESPINOZA, J.; SÖRENSSON, A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O.; RUSCICA, R.; CONDOM, T.; WONGCHUIG-CORREA, S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- FERREIRA, S.; DE LIMA, A.; CORRÊA, J. Indicators of hydrological sustainability, governance and water resource regulation in the Moju river basin (PA) - Eastern Amazonia. **Journal of Environmental Management**, v. 263, 110354, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110354>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- GLOOR, M.; BARICHIVICH, J.; ZIV, G.; BRIENEN, R.; SCHÖNGART, J.; PEYLIN, P.; CINTRA, B.; FELDPAUSCH, T.; PHILLIPS, O.; BAKER, J. Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, p. 1384–1399, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014GB005080>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- GOMES, D. C.; FERREIRA, N. S.; LIMA, A. M. M.; SERRÃO, E. A. de O. Variabilidade espaço-temporal da precipitação: bacia hidrográfica do rio Madeira. **Revista Geonorte**, v. 5, n. 19, p. 1-15, 2019.

- HUANG, G.; WANG, Q.; CHEN, X.; GODLEWSKA, M.; LIAN, Y.; YUAN, J.; LIU, J.; LI, Z. Evaluating impacts of an extreme flood on a fish assemblage using hydroacoustics in a large reservoir of the Yangtze River basin, China. **Hydrobiologia**, v. 841, p. 31–43, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-019-04003-4>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- KARAM, S.; ZANGO, B.; SEIDOU, O.; PERERA, D.; NAGABHATLA, N.; TSHIMANGA, R. Impacts of climate change on hydrological regimes in the Congo River Basin. **Sustainability**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15076066>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- LARSEN, S.; KARAU, U.; CLARET, C.; ŠPORKA, F.; HAMERLÍK, L.; TOCKNER, K. Flooding and hydrologic connectivity modulate community assembly in a dynamic river-floodplain ecosystem. **PLOS ONE**, v. 14, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213227>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- LENNOX, R.; CROOK, D.; MOYLE, P.; STRUTHERS, D.; COOKE, S. Toward a better understanding of freshwater fish responses to an increasingly drought-stricken world. **Reviews in Fish Biology and Fisheries**, v. 29, p. 71–92, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11160-018-09545-9>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- LIMA, L.; COE, M.; FILHO, B.; CUADRA, S.; DIAS, L.; COSTA, M.; RODRIGUES, H. Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the southwestern Amazon: Implications for the provision of ecosystem services. **Landscape Ecology**, v. 29, p. 261–274, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- MERZ, B.; BLÖSCHL, G.; VOROGUSHYN, S.; DOTTORI, F.; AERTS, J.; BATES, P.; BERTOLA, M.; KEMTER, M.; KREIBICH, H.; LALL, U.; MACDONALD, E. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 2, p. 592–609, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- MOLINIER, M.; THÉRY, H.; ALVAREZ, J. A. Hydrologie du bassin amazonien. In: THÉRY, H. (Ed.). **Environnement et développement en Amazonie brésilienne**. Paris: Editions Belin, 1997. p. 24-41.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.
- PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H.; GIOVANNETTONE, J.; KUMAR, T.; THAKUR, M.; DE OLIVEIRA BURITI, C. Long-term spatiotemporal variation of droughts in the Amazon River Basin. **Water**, v. 13, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/W13030351>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H.; GIOVANNETTONE, J.; KUMAR, T.; THAKUR, M.; DE OLIVEIRA BURITI, C. Drought variability and land degradation in the Amazon River Basin. **Frontiers in Earth Science**, v. 10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.939908>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- PARRENS, M.; BITAR, A.; FLEISCHMANN, A. Monitoring extreme floods and droughts in the Amazon basin with surface water-based indices. **Journal of Hydrometeorology**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/jhm-d-22-0170.1>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- RESTREPO-COUBE, N.; CHRISTOFFERSEN, B.; LONGO, M.; ALVES, L.; CAMPOS, K.; DA ARAUJO, A.; DE OLIVEIRA, R.; PROHASKA, N.; DA SILVA, R.; TAPAJÓS, R.;



- WIEDEMANN, K.; WOFYSY, S.; SALESKA, S. Asymmetric response of Amazon forest water and energy fluxes to wet and dry hydrological extremes reveals onset of a local drought-induced tipping point. **Global Change Biology**, v. 29, p. 6077–6092, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16933>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L. de. Avaliação do balanço de água na bacia do rio Madeira simulado pelo modelo MGB-INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013.
- SABATER, S.; FREIXA, A.; JIMÉNEZ, L.; LÓPEZ-DOVÁL, J.; PACE, G.; PASCOAL, C.; PERUJO, N.; CRAVEN, D.; GONZÁLEZ-TRUJILLO, J. Extreme weather events threaten biodiversity and functions of river ecosystems: evidence from a meta-analysis. **Biological Reviews**, v. 98, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/brv.12914>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- SADHWANI, K.; ELDHO, T. Assessing the vulnerability of water balance to climate change at river basin scale in humid tropics: Implications for a sustainable water future. **Sustainability**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15119135>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- SANTOS, R.; PINTO-COELHO, R.; DRUMOND, M.; FONSECA, R.; ZANCHI, F. Damming Amazon Rivers: Environmental impacts of hydroelectric dams on Brazil's Madeira River according to local fishers' perception. **Ambio**, v. 49, p. 1612–1628, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01316-w>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- SIQUEIRA JÚNIOR, J. L. de; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; LOPES, L. G.; VON RANDOW, R. C. S. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre o regime hidrológico na bacia do rio Madeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves: ABRHidro, 2013. Disponível em: [https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013\\_\\_PAP012669.pdf](https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP012669.pdf). Acesso em: 1 dez. 2024.
- STAAL, A.; FLORES, B.; AGUIAR, A.; BOSMANS, J.; FETZER, I.; TUINENBURG, O. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- SUEDEL, B.; AMORIM, R.; LAUTH, T.; CREECH, C. Nature-based solutions for improving navigation reliability on the Madeira River, Brazil. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ieam.4478>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- SWANSON, A.; KAPLAN, D.; TOH, K.; MARQUES, E.; BOHLMAN, S. Changes in floodplain hydrology following serial damming of the Tocantins River in the eastern Amazon. **The Science of the Total Environment**, v. 800, 149494, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149494>. Acesso em: 1 dez. 2024.
- VAN PASSEL, J.; DE KEERSMAECKER, W.; BERNARDINO, P.; JING, X.; UMLAUF, N.; VAN MEERBEEK, K.; SOMERS, B. Climatic legacy effects on the drought response of the Amazon rainforest. **Global Change Biology**, v. 28, p. 5808–5819, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.16336>. Acesso em: 1 dez. 2024.



VERGASTA, L.; CORREIA, F.; CHOU, S.; NOBRE, P.; LYRA, A.; DE BRITO GOMES, W.; CAPISTRANO, V.; VEIGA, J. Avaliação do Balanço de água na Bacia do Rio Madeira Simulado Pelo Modelo Regional Climático Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863610005>. Acesso em: 1 dez. 2024.

VERGASTA, L.; CORREIA, F.; SATYAMURTY, P.; CHOU, S.; LYRA, A.; DE BRITO GOMES, W.; FLEISCHMANN, A.; PAPA, F. An assessment of the present hydroclimatic regime of the Madeira River basin using climate and hydrological models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, p. 1338–1357, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2216844>. Acesso em: 1 dez. 2024.

WANG, J.; YU, C.; CAO, S. Urban development in the context of extreme flooding events. **Indoor and Built Environment**, v. 31, p. 3–6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1420326X211048577>. Acesso em: 1 dez. 2021.