

A PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RIO MADEIRA POR IMAGENS DE SATÉLITE

Matheus Silveira de Queiroz¹

Rogério Ribeiro Marinho²

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo estimar a precipitação para a bacia do rio Madeira, na bacia Amazônica, através dos dados do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRPS) entre 1981 e 2023. A precipitação na bacia do rio Madeira foi em média de 3.490 mm.ano⁻¹. Janeiro é o mês mais chuvoso, enquanto junho e julho são os mais secos. A região dos formadores do Madeira, nos rios Madre de Dios e Mamoré, são hotspots pluviométricos, enquanto o sudeste da bacia apresenta tendência de redução de precipitação. O El-Niño Oscilação Sul (ENOS) tende a reduzir a precipitação durante sua fase positiva em cerca de 10%, porém a fase negativa não apresenta um aumento significativo. A compreensão do regime de precipitação é de grande importância para o manejo sustentável dos recursos hídricos e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no padrão de uso da terra na região.

PALAVRAS-CHAVE: Bacia Amazônica. CHIRPS. Bacia do Rio Madeira. El Niño Oscilação Sul.

RAINFALL IN THE MADEIRA RIVER BASIN USING SATELLITE IMAGES

ABSTRACT

This study aims to estimate rainfall for the Madeira River basin in the Amazon basin using data from the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRPS) between 1981 and 2023. Rainfall in the Madeira River basin averaged 3,490 mm.year⁻¹. January is the rainiest month, while June and July are the driest. The region where the Madeira River originates, in the Madre de Dios and Mamoré rivers, are rainfall hotspots, while the southeast of the basin shows a tendency toward reduced rainfall. The El Niño Southern Oscillation (ENSO) tends to reduce rainfall during its positive phase by about 10%, but the negative phase does not show a significant increase. Understanding the rainfall regime is of great importance for the sustainable management of water resources and for mitigating the impacts of climate change and changes in land use patterns in the region.

KEYWORDS: Amazon Basin. CHIRPS. Madeira River Basin. El Niño-Southern Oscillation.

PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO MADEIRA MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE

¹Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Departamento de Geografia, Email: matheussilveiradequeiroz@gmail.com

²Doutor em Clima e Ambiente pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Departamento de Geografia da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Email: rogeo@ufam.edu.br

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo estimar la precipitación en la cuenca del río Madeira, en la cuenca amazónica, a partir de los datos del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRPS) entre 1981 y 2023. La precipitación en la cuenca del río Madeira fue de una media de 3,490 mm.año⁻¹. Enero es el mes más lluvioso, mientras que junio y julio son los más secos. La región de los formadores del Madeira, en los ríos Madre de Dios y Mamoré, son puntos críticos de pluviometría, mientras que el sureste de la cuenca presenta una tendencia a la reducción de las precipitaciones. El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) tiende a reducir las precipitaciones durante su fase positiva en aproximadamente un 10 %, pero la fase negativa no presenta un aumento significativo. La comprensión del régimen de precipitaciones es de gran importancia para la gestión sostenible de los recursos hídricos y para la mitigación de los impactos del cambio climático y los cambios en el patrón de uso del suelo en la región.

PALABRAS CLAVE: Cuenca del Amazonas. CHIRPS. Cuenca del río Madeira. El Niño Oscilación del Sur.

INTRODUÇÃO

A precipitação desempenha um papel central no ciclo hidrológico global, sendo um dos processos mais relevantes para o equilíbrio climático e ecológico do planeta. Nos oceanos tropicais, o calor latente liberado durante a formação das chuvas atua como uma fonte primária de energia, influenciando diretamente a dinâmica atmosférica. Em áreas continentais, a água proveniente das chuvas alimenta rios, lagos e reservatórios subterrâneos, essenciais para a manutenção dos ecossistemas (HSU et al., 2000).

A análise do regime de precipitação é um dos elementos climáticos mais importantes para o entendimento dos processos hidrológicos em diversas escalas espaciais e temporais. O monitoramento da precipitação em escala local, regional e continental é de grande importância para entender os extremos climáticos e seus riscos associados, principalmente com o advento das mudanças climáticas. Além disso, a caracterização da precipitação pode contribuir com projetos de agricultura, energia, transportes e prevenção de riscos (hidrológicos e geológicos) (MARINHO; RIVERA, 2021).

Diversas iniciativas desde a segunda metade do século XX tem utilizado os satélites com sensores que operam no Infravermelho Termal (TIR) em conjunto com estações pluviométricas para monitorar elementos do clima como, por exemplo, o Climate Hazards Group InfraRed Precipitation (CHIRPS) (FUNK et al., 2015) e o Africa Rainfall Climatology (ARC) (NOVELLA; THIAW, 2013). Além disso, estas iniciativas utilizam também sensores

passivos de micro-ondas (PMW), em conjunto com dados TIR e das estações, para detectar a energia de micro-ondas emitida pela Terra e sua atmosfera, afim de estimar a precipitação. Como exemplos, podemos citar a Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (HUFFMAN et al., 2007; KUMMEROW et al., 2000) e o Global Precipitation Climatology Project (GPCP) (HUFFMAN et al., 2009).

A análise e espacialização da precipitação utilizando este tipo de dado é uma alternativa viável para regiões com baixa densidade de estações pluviométricas na bacia Amazônica (MARINHO; RIVERA, 2021). Os dados disponibilizados pelo CHIRPS foram aplicados por diversos autores para analisar a precipitação na bacia Amazônica (PACCINI et al., 2018; ESPINOZA et al., 2019a; CAVALCANTE et al., 2020; PACA et al., 2020; CORDEIRO; BLANCO, 2021; MARINHO; RIVERA, 2021; MU et al., 2021; SOUZA et al., 2022). Portanto, esse trabalho tem como objetivo estimar a precipitação para a bacia do rio Madeira, na bacia Amazônica, utilizando a base de dados disponibilizados pelo programa CHIRPS para o período de 1981 a 2023.

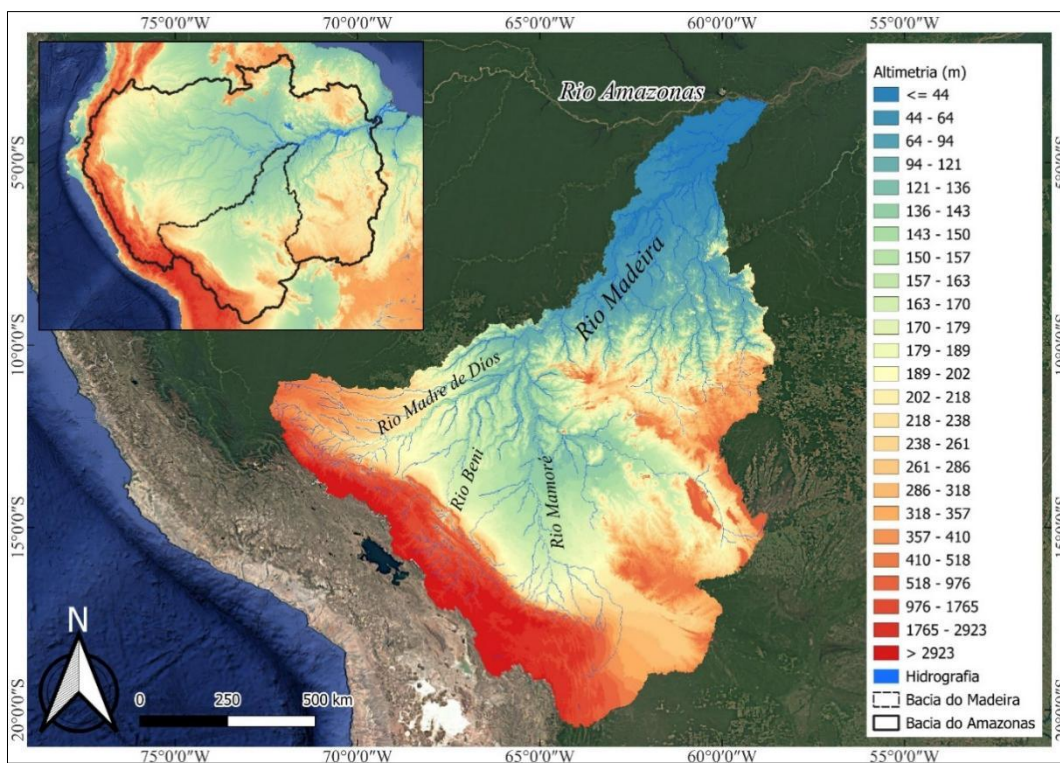
ÁREA DE ESTUDO

A bacia Amazônica é a maior bacia do planeta, com uma área aproximada de 6.000.000 km², e seu canal principal possui a maior descarga líquida (209.000 m³.s⁻¹) (MOLINIER et al., 1996). O rio Madeira é o principal afluente da margem direita do rio Amazonas, com uma descarga líquida de cerca de 27.000 m³.s⁻¹ (VAUCHEL et al., 2017), com os maiores valores entre março-abril (cheia) e os menores entre setembro-outubro (vazante) (ANA, 2025). O canal também transporta grandes volumes de sedimentos suspensos e de fundo para o canal principal (ESPINOZA-VILLAR et al., 2013).

O rio Madeira é denominado após a confluência dos rios Mamoré, Beni, com a contribuição também de importantes afluentes como rio Madre de Dios (MINISTRY OF ENVIRONMENT AND WATER BOLIVIA; STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE, 2024). A bacia hidrográfica do rio Madeira possui uma área de 1.362.273 km² distribuídos entre Brasil, Bolívia e Peru (Figura 1). Os canais desta bacia drenam diversos ambientes geológicos, como a regiões Andinas e Sub-Andinas, com terrenos de altas altitude, bacia de foreland (frente de cadeia ou bacia de antepaís), caracterizado por terrenos planos e baixa

declividade, e a região do Cráton Amazônico, com o Escudo Cristalino do Brasil Central e as terras baixas da planície Amazônica.

Figura 1: Mapa de localização da bacia do rio Madeira



Fonte: Este Trabalho (2024).

Observa-se que as altitudes máximas na bacia estão localizadas na região Andina, com cerca de 6415 metros. Na região central da bacia as altitudes podem ultrapassar os 500 metros, essa área é referente ao escudo cristalino do Brasil, que possui terrenos mais antigos e muito intemperizados. As menores altitudes estão localizadas no baixo curso da bacia, com altitudes inferiores a 10 metros. Entre a região do escudo cristalino e o cinturão orogênico dos Andes há uma região com poucas variações altimétricas, essa região é caracterizada como a bacia de foreland (VAUCHEL et al., 2017).

A variabilidade da precipitação na Bacia Amazônica está ligada em grande parte às variações da temperatura superficial do oceano (Pacífico e Atlântico) (WANG, 2004; GRIMM et al., 2016; SOUZA et al., 2019). Na região Amazônica as precipitações podem ser associadas a índices climáticos, como a Oscilação El Niño-Sul (ENOS) e a Oscilação Decadal do Pacífico

(ODP), além de variações na temperatura tropical do Oceano Atlântico (MARENGO et al., 2008; 2011; ESPINOZA et al., 2019b).

As variações sazonais da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) também influenciam na precipitação na bacia, principalmente, no baixo e médio curso, durante o verão austral, uma característica comum que ocorre durante o Sistema de Monções Sul-Americano (SAMS), esse sistema restringe o período chuvoso na bacia, que ocorre entre novembro e abril (GRIMM et al., 2005).

Na bacia predominam climas de floresta tropical, monções tropicais e climas tropicais úmidos e secos (tipos Af, Am e Aw), de acordo com a classificação de Köppen (PEEL et al., 2007). Portanto, a bacia é caracterizada por verões superúmidos (chuvas do tipo monção) e uma estação de inverno curta e seca. Na região Andina, o clima é caracterizado pelos tipos Cbw, Cfb e Cfc, com predominância de verões mais quentes, com invernos amenos a frios e relativamente secos (LAUREANTI et al., 2024).

MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se a série histórica do projeto CHIRPS (Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations) v.2 (<https://www.chc.ucs.edu/data/chpclim>) para estimar os dados de precipitação entre 1981 e 2023 (FUNK et al., 2015). Segundo Souza et al. (2022) os dados gerados por esse projeto representam bem a precipitação na bacia do rio Madeira. Porém, os autores utilizaram poucas estações na região Andina e Sub-Andina da bacia, dificultando a interpretação dos dados nessa região.

O produto CHIRPS v.2 foi desenvolvido pelo United States Geological Survey (USGS), Earth Resources Observation and Science (EROS) e pelo Climate Hazards Group at the University of California, Santa Barbara (UCSB). O projeto foi desenvolvido para disponibilizar e espacializar dados climatológicos no intervalo temporal anual, mensal e diário sobre as latitudes 50° Sul e 50° Norte (FUNK et al., 2015), facilitando a análise em áreas com uma baixa densidade de estações convencionais, como é o caso da bacia Amazônica.

As estimativas do produto CHIRPS v.2 são calculadas em uma resolução espacial de 0,05° (~5,3 km), utilizando dados oriundos de sensores do infravermelho termal a bordo de

satélites geoestacionários da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), do Centro de Previsão Climática (CPC) e do National Climatic Data Center Climáticos (NCDC), juntamente com registros de estações meteorológicas e outros serviços regionais (FUNK et al., 2015). Foram calculados valores de precipitação médias anuais e mensais, mínimo, máximo e desvio padrão.

Para delimitar faixas com regimes de chuvas diferenciados utilizou-se o método dos quantis seccionados em sete classes de precipitação: Extremamente Seco (ES), Muito Seco (MS), Seco (S), Normal (N), Chuvoso (C), Muito Chuvoso (MC) e Extremamente Chuvoso (EC) (XAVIER; XAVIER, 1999; ALMEIDA et al., 2013; SENA et al., 2014). Essa técnica consiste em reduzir a diferença da função densidade de probabilidade, descrevendo a precipitação como um fenômeno aleatório que é caracterizado por uma dinâmica não-linear (XAVIER et al., 2007). Os quantis determinados referem-se às probabilidades de $Q_{(0,05)}$, $Q_{(0,15)}$, $Q_{(0,35)}$, $Q_{(0,65)}$, $Q_{(0,85)}$ e $Q_{(0,95)}$ para a série histórica anual entre 1981 e 2023. O Q significa o limite do quantil adotado para os cálculos das classes de precipitação para a bacia do rio Madeira (Tabela 1).

Tabela 1: Classes das categorias e probabilidades da precipitação anual e mensal relacionadas às ordens quantílicas

| Categoria | Probabilidade |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Extremamente Seco (ES) | $p(x) < Q_{0,05}$ |
| Muito Seco (MS) | $Q_{0,05} \geq p(x) < Q_{0,15}$ |
| Seco (S) | $Q_{0,15} \geq p(x) < Q_{0,35}$ |
| Normal (N) | $Q_{0,35} \geq p(x) < Q_{0,65}$ |
| Chuvoso (C) | $Q_{0,65} \geq p(x) < Q_{0,85}$ |
| Muito Chuvoso (MC) | $Q_{0,85} \geq p(x) < Q_{0,95}$ |
| Extremamente Chuvoso (EC) | $p \geq Q_{0,95}$ |

Fonte: Adaptado de Xavier e Xavier (1999); Xavier et al. (2002).

Analisaram-se as fases positivas e negativas do El-Niño Oscilação-Sul (ENOS) para entender se o fenômeno influenciou na precipitação da bacia do rio Madeira. A definição dos anos de ENOS foi conforme Trenberth (1997), que considera o período entre agosto de um ano até julho do ano seguinte. O Oceanic Niño Index (ONI) é o principal indicador da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para monitorar a parte oceânica do padrão climático sazonal ENOS. A NOAA considera que as condições de ENOS estão presentes quando a temperatura superficial do mar no Pacífico Tropical Oriental está $+0,5^{\circ}\text{C}$ (fase

positiva) ou $-0,5^{\circ}\text{C}$ (fase negativa). Os limites de ENOS são subdivididos em Fraco, Moderado, Forte e Muito Forte (Tabela 2).

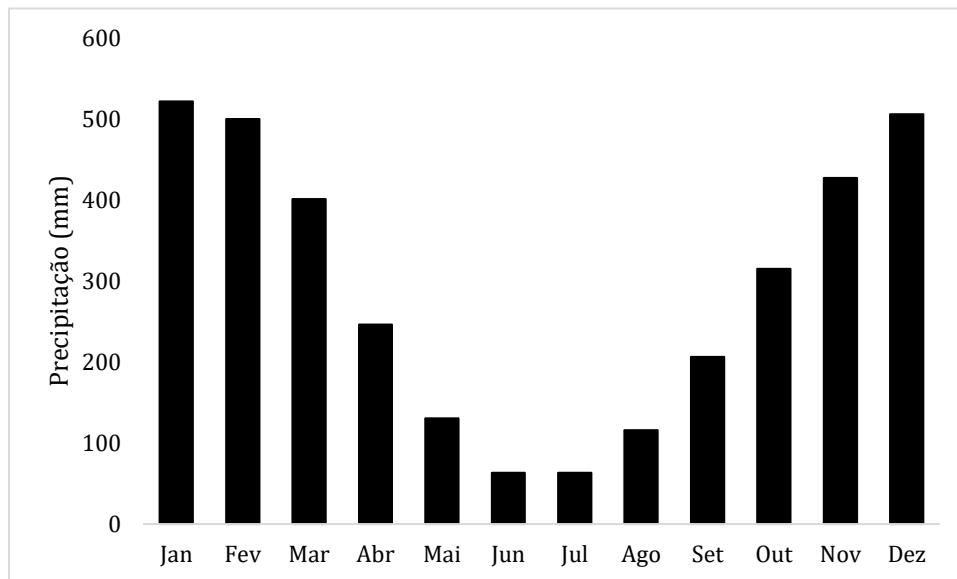
Tabela 2: Classes de ENOS para as fases positiva e negativa de acordo com a Temperatura Superficial do Mar

| Classes | Temperatura Superficial do Mar ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------------|---|
| Fraco | 0,5 - 0,9 |
| Moderado | 1,0 - 1,4 |
| Forte | 1,5 - 1,9 |
| Muito Forte | $\geq 2,0$ |

Para a fase negativa considera-se os valores multiplicados por -1. Fonte: Golden Gate Weather Services (2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precipitação anual acumulada estimada para o período de 1981 e 2023 para a bacia do rio Madeira foi de $3.490 \text{ mm.ano}^{-1}$. O ano com a menor precipitação da série histórica foi 2010 ($3.116 \text{ mm.ano}^{-1}$) e o maior foi 1982 ($3.906 \text{ mm.ano}^{-1}$), com amplitude de 789 mm.ano^{-1} . O desvio padrão foi de 219. O mês com o maior volume precipitado é janeiro, com 522 mm.mês^{-1} , partir de janeiro a precipitação reduz até os meses de junho e julho, bimestre de menor precipitação média ($\sim 63 \text{ mm.ano}^{-1}$), em agosto o volume precipitado volta a aumentar (Figura 2).

Figura 2: Regime de precipitação média mensal na Bacia do rio Madeira entre 1981 e 2023

Fonte: Este Trabalho (2024).

Para o período de 1981 a 2023, observam-se valores mínimos variando entre 0,1 mm.mês⁻¹ (junho) e 137 mm.mês⁻¹ (dezembro). Os valores máximos variam entre 1.361 mm.mês⁻¹ (fevereiro) e 241 mm.mês⁻¹ (julho). O desvio padrão também é maior nos meses de maior precipitação da bacia. As menores amplitudes foram observadas em julho (240 mm.mês⁻¹) e junho (296 mm.mês⁻¹), meses com as menores precipitações médias na bacia (Tabela 3).

Tabela 3: Média, Mínimo, Máximo e Desvio Padrão da precipitação na bacia do rio Madeira

| Meses | Média (mm) | Mínimo (mm) | Máximo (mm) | Desvio Padrão |
|-------|------------|-------------|-------------|---------------|
| Jan | 522 | 124 | 1.194 | 145 |
| Fev | 500 | 96 | 1.361 | 167 |
| Mar | 401 | 44 | 1.022 | 159 |
| Abr | 246 | 9 | 781 | 123 |
| Mai | 131 | 1 | 487 | 78 |
| Jun | 63 | 0,1 | 296 | 47 |
| Jul | 63 | 0,6 | 241 | 33 |
| Ago | 116 | 6 | 347 | 47 |
| Set | 206 | 11 | 581 | 78 |
| Out | 315 | 31 | 929 | 112 |
| Nov | 427 | 72 | 1.294 | 141 |
| Dez | 506 | 137 | 1.113 | 143 |

Fonte: Este Trabalho (2024).

Ribeiro Neto et al. (2008), considerando uma precipitação anual de 1.940 mm.ano⁻¹, afirmam que dentre os principais afluentes do Amazonas, a bacia do rio Madeira apresenta um dos menores valores de precipitação, coeficiente de escoamento e vazão específica. Porém, esse valor de precipitação é cerca de 44% menor que o acumulado anual estimado nesse trabalho. Essa diferença pode ser explicada, por exemplo, devido à influência dos *hotspot* de precipitação que ocorrem no alto curso da bacia. Essas regiões são caracterizadas devido à concentração anormalmente alta de chuva em relação às áreas circundantes, o que pode influenciar no acumulado da bacia estimado pelo produto CHIRPS.

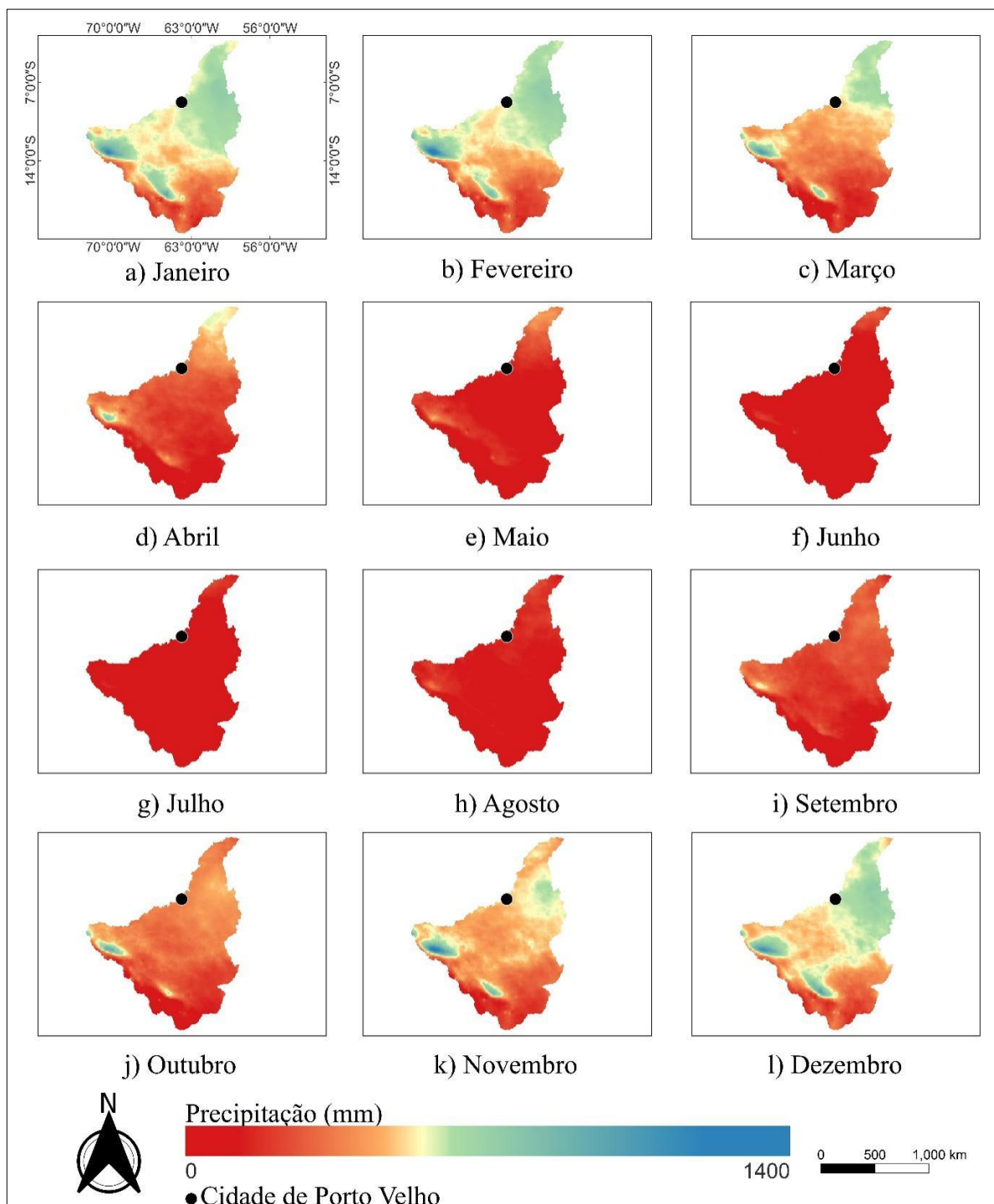
As maiores precipitações ocorrem na bacia do rio Madre de Dios. Estima-se nessa região precipitação total anual de 9.378 mm.ano⁻¹ entre 1981 e 2023. Nota-se também um grande volume precipitado na bacia do rio Mamoré, na região sul da bacia do Madeira (Figura 3). Essas regiões são caracterizadas como um *hotspot* pluviométrico e estão localizadas em condições de barlavento na região Sub-Andina e no Piemonte (em altitudes mais baixas). Há também a influência dos ventos do leste que podem produzir um forte gradiente de precipitação, podendo atingir 190 mm.km⁻¹. Ao analisar os eventos extremos, principalmente entre junho e agosto, a variabilidade transequatorial do vento na baixa troposfera pode ser um fator importante na explicação desses episódios (ESPINOZA et al., 2015).

A análise da precipitação *in situ* em duas estações pluviométricas (Quincemil-San Gaban, no Peru) na região do hotspot do Madre de Dios indica que o acumulado anual pode atingir 6.600 mm.ano⁻¹. No hotspot do Mamoré (estações de Chipiriri-Cristal Mayu, na Bolívia) o acumulado pode atingir quase 5.000 mm.ano⁻¹ (ESPINOZA et al., 2015). Comparando os dados do CHIRPS com a estação de Quincemil (6.600 mm.ano⁻¹), observa-se que os valores estimados por satélite são 42% superiores, o que pode indicar que os dados para essa região estão superestimados.

Os menores valores estimados de precipitação ocorrem na região sudeste da bacia, com um acumulado anual de 1.163 mm.ano⁻¹. Observa-se nessa região (bacia do rio Grande), a Leste do *hotspot* Chipiriri-Cristal Mayu, na Bolívia, uma tendência negativa de -37,9 mm.ano⁻¹ da precipitação. Essa tendência é a menor observada em toda a bacia Amazônica (PACA et al., 2020). Essa região sofre com o aumento acelerado do desmatamento devido à agricultura mecanizada, pecuária e agricultura de pequena escala (MULLER et al., 2012). Esse aumento

do desmatamento pode estar influenciando na redução da precipitação na região. A diminuição da precipitação afeta diretamente a oferta de água para os canais fluviais da bacia do rio Madeira.

Figura 3: Distribuição Espacial da Precipitação Média Mensal na Bacia do rio Madeira



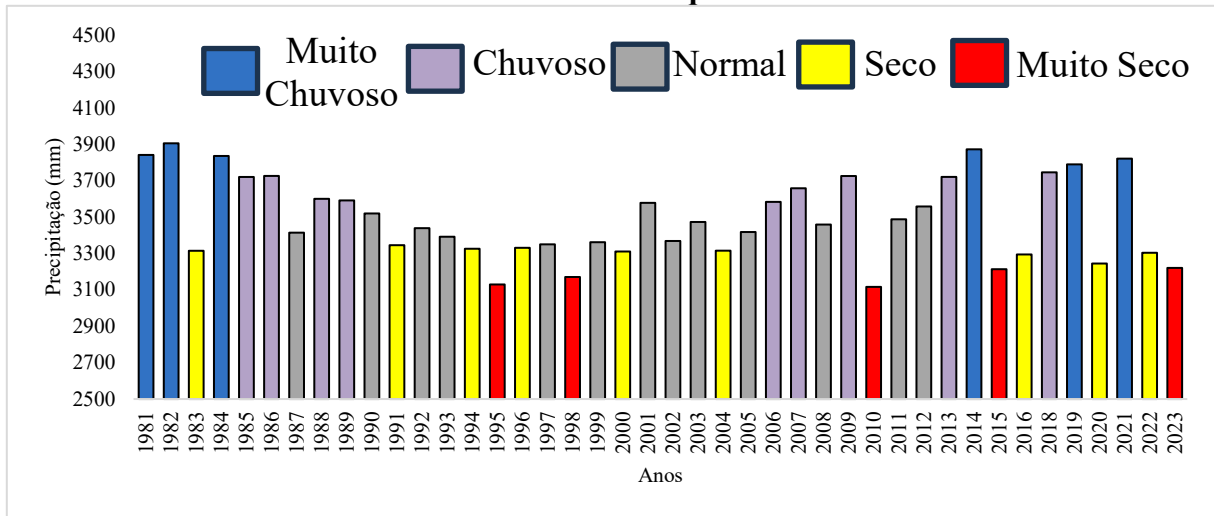
Fonte: Este Trabalho (2024).

Na bacia Amazônica a precipitação é multicausal sendo influenciada por dinâmicas atmosféricas diversas. Na região da bacia há a convergência dos ventos alísios de norte e sul, que produzem as chuvas convectivas. Há também a influência das movimentações sazonais da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (ZANIN; SATYAMURTY, 2020).

Outra dinâmica que influencia na precipitação da bacia Amazônica são as Monções Sul-Americanas (VERA et al., 2006). A evapotranspiração do trecho norte do Oceano Atlântico é transportada para a América do Sul (área continental) pelos ventos alísios, grande parte dessa umidade é precipitada na bacia Amazônica. Essa dinâmica também é importante para o transporte de umidade para a região sul do continente (SPRACKLEN et al., 2012; ZEMP et al., 2014; ZANIN; SATYAMURTY, 2020). E ocorre principalmente durante a temporada do verão austral (ZHOU; LAU, 1998; VERA et al., 2006; MARENGO et al., 2012; COSTA; SATYAMURTY, 2016; ZANIN; SATYAMURTY, 2021).

A análise dos quantis anual de 1981 e 2023 indica que para o período houve seis anos muito chuvosos. O ano com a maior precipitação acumulada anual foi 1982 ($3.906 \text{ mm.ano}^{-1}$). Foram identificados nove anos chuvosos, treze anos com a precipitação normal, nove anos secos e cinco anos muito secos, com o ano mais seco da série histórica sendo 2010 com uma precipitação de $3.116 \text{ mm.ano}^{-1}$ (Figura 4). Desconsiderou-se o ano de 2017 da análise, pois os dados do CHIRPS não apresentam dados mensais completos. Nota-se que a partir de 2010 foram observados três anos muito secos e três anos muito chuvosos, indicando que o tempo de retorno para os eventos extremos está menor na bacia.

Figura 4: Análise anual das classes de precipitação para a bacia do rio Madeira relacionas às ordens quantílica.



Fonte: Este Trabalho (2024).

A tendência na bacia Amazônica é que nos anos da fase positiva do ENOS ocorram períodos mais secos, na fase negativa há um aumento na precipitação (LIMBERGER; SILVA, 2016). A fase positiva do ENOS teve quatro eventos fracos, moderados e três fortes, muito fortes (Tabela 4).

Tabela 4: Anos, intensidade e precipitação da fase positiva do ENOS

| Fraco | Precipitação (mm) | Moderado | Precipitação (mm) | Forte | Precipitação (mm) | Muito Forte | Precipitação (mm) |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-------------|-------------------|
| 2004-2005 | 3.267 | 1986-1987 | 3.339 | 1987-1988 | 3.697 | 1982-1983 | 3.503 |
| 2006-2007 | 3.593 | 1994-1995 | 3.138 | 1991-1992 | 3.148 | 1997-1998 | 2.889 |
| 2014-2015 | 3.578 | 2002-2003 | 3.396 | 2023-2024 | 2.889 | 2015-2016 | 2.973 |
| 2018-2019 | 3.865 | 2009-2010 | 3.286 | | | | |

Fonte: Este Trabalho (2024).

Os eventos de ENOS fracos tiveram uma precipitação 2% maior que a média anual da bacia entre 1981 e 2023, indicando que nesses eventos não há influência significativa do ENOS na diminuição da precipitação na bacia. Para os eventos moderados a média foi cerca de 14% menor, porém nos eventos fortes a média foi 2% maior. Nos anos muito forte a média da precipitação nos ENOS foi cerca de 10% menor que a média da bacia.

Os únicos eventos da fase positiva que apresentaram aumento na precipitação foram 2006-2007, 2014-2015, 2018-2019 (fraco), 1987-1988 (forte) e 1982-1983 (muito forte).

Analisando todos os anos observa-se uma redução média de 6% e desconsiderando os eventos de ENOS fraco, a diminuição média é de 10% (Tabela 5).

Tabela 5: Diferença média nos anos com ENOS positivo em relação a precipitação média na bacia do rio Madeira

| Fraco | Diferença (%) | Moderado | Diferença (%) | Forte | Diferença (%) | Muito Forte | Diferença (%) |
|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-------------|---------------|
| 2004-2005 | -7% | 1986-1987 | -21% | 1987-1988 | 6% | 1982-1983 | 0,2% |
| 2006-2007 | 3% | 1994-1995 | -15% | 1991-1992 | -10% | 1997-1998 | -17% |
| 2014-2015 | 2% | 2002-2003 | -16% | | | 2015-2016 | -15% |
| 2018-2019 | 11% | 2009-2010 | -6% | | | | |

Fonte: Este Trabalho (2024).

Para a fase negativa do ENOS observa-se seis anos com intensidade fraca, quatro anos moderados e cinco anos fortes. Nota-se que a fase negativa é mais frequente, apesar de na série histórica de 42 anos não ter ocorrido nenhum evento muito forte na bacia do rio Madeira (Tabela 6). Na fase negativa houve um aumento médio na precipitação de 1% em relação à média anual da bacia do rio Madeira. Portanto, a fase negativa não tende a aumentar a precipitação média na bacia do rio Madeira, como ocorre em outras áreas da bacia Amazônica (SOUZA et al., 2000).

Tabela 6: Anos, intensidade e precipitação da fase negativa do ENOS

| Fraco | Precipitação (mm) | Moderado | Precipitação (mm) | Forte | Precipitação (mm) |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| 1983-1984 | 3.518 | 1995-1996 | 3.167 | 1988-1989 | 3.626 |
| 1984-1985 | 3.839 | 2011-2012 | 3.571 | 1998-1999 | 3.418 |
| 2000-2001 | 3.484 | 2020-2021 | 3.534 | 1999-2000 | 3.277 |
| 2005-2006 | 3.605 | 2021-2022 | 3.521 | 2007-2008 | 3.645 |
| 2008-2009 | 3.679 | | | 2010-2011 | 3.346 |
| 2022-2023 | 3.459 | | | | |

Fonte: Este Trabalho (2024).

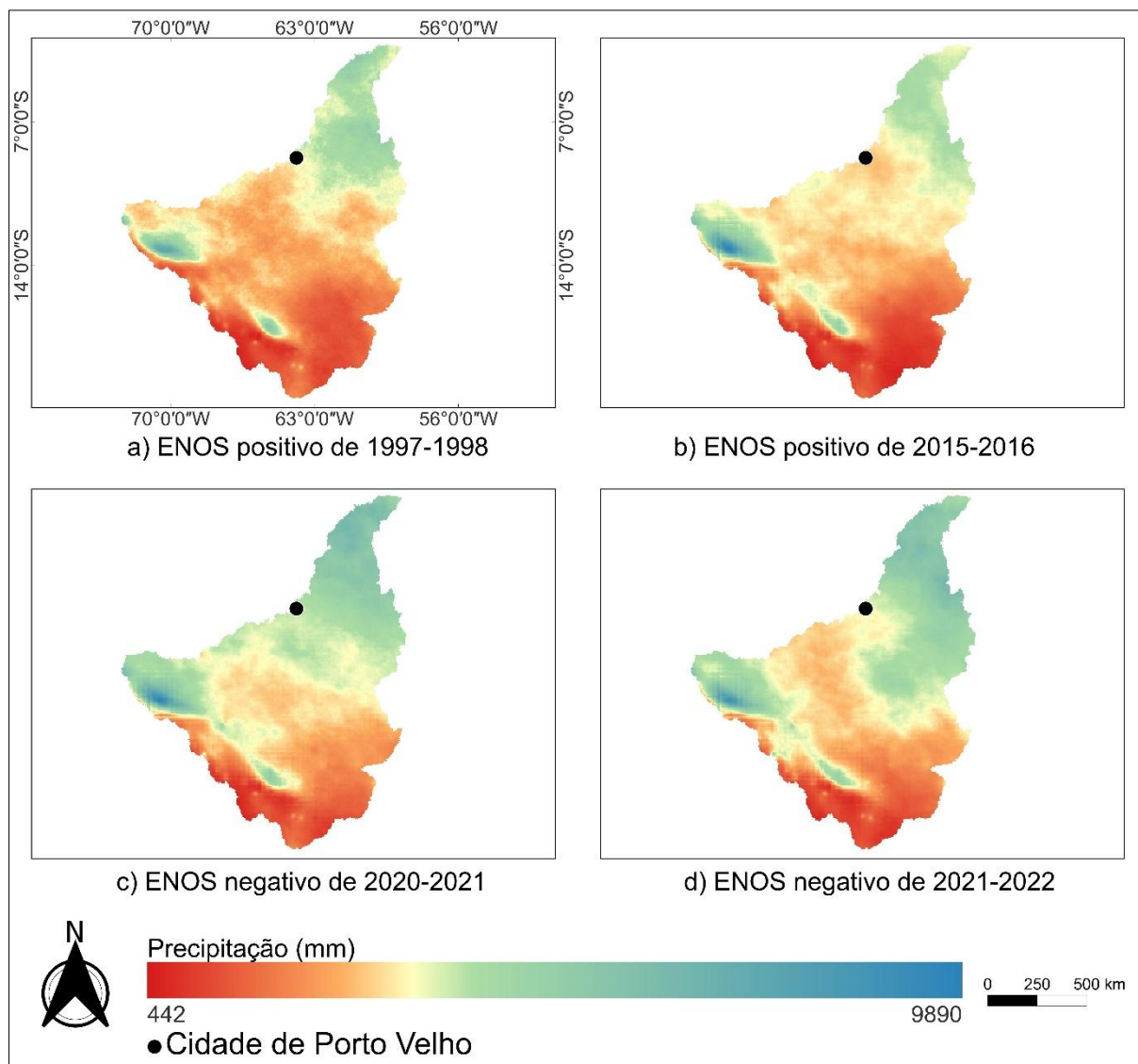
Nos eventos de intensidade fraca houve aumento médio de 3% em relação à média da bacia, com destaque para o evento de 1984-1985, que apresentou um aumento de 10%. Para os anos moderados, houve uma diminuição de cerca de 1%, com o evento de 1995-1996 apresentando uma diminuição de 9% em relação a precipitação média. Nos anos de ENOS forte houve uma diminuição de 1% na precipitação. Isso confirma que a fase negativa não influencia no aumento da precipitação na bacia (Tabela 7).

Tabela 7: Diferença média nos anos com ENOS negativo em relação a precipitação média na bacia do rio Madeira

| Fraco | Diferença (%) | Moderado | Diferença (%) | Forte | Diferença (%) |
|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| 1983-1984 | 0,7% | 1995-1996 | -9% | 1988-1989 | 4% |
| 1984-1985 | 10% | 2011-2012 | 2% | 1998-1999 | -2% |
| 2000-2001 | -0,3% | 2020-2021 | 1% | 1999-2000 | -6% |
| 2005-2006 | 3% | 2021-2022 | 1% | 2007-2008 | 4% |
| 2008-2009 | 5% | | | 2010-2011 | -4% |
| 2022-2023 | -1% | | | | |

Fonte: Este Trabalho (2024).

Para o período de ENOS positivo de 2015-2016 e 2023-2024, o acumulado médio de precipitação foi de 2.972,69 mm.ano⁻¹ e 2.889,27 mm.ano⁻¹, respectivamente (Figuras 6a e 6b). Houve uma diminuição média de 19% na precipitação acumulada da bacia nos anos de ENOS positivo, o que pode impactar no regime hidrológico do rio Madeira. Para a fase negativa nos anos de 2020-2021 e 2021-2022, o acumulado médio foi de 3.534,05 mm.ano⁻¹ e 3.521,47 mm.ano⁻¹, respectivamente (Figuras 6c e 6d).

Figura 6: Distribuição espacial da Precipitação média em anos de ENOS na bacia do rio Madeira

Fonte: Este Trabalho (2024).

Na bacia Amazônica também há a influência do Dipolo Atlântico (DA), caracterizado pela anomalia da TSM no Atlântico Tropical Norte e Sul (WANG, 2004). Assim como o ENOS, o DA também apresenta uma fase positiva (anomalias de TSM positivas no Atlântico Norte e negativas no Atlântico Sul) e outra negativa (anomalias negativas no Atlântico Norte e positivas no Atlântico Sul) (SOUZA; NOBRE, 1998). Um exemplo da influência da TSM na bacia do rio Madeira pode ser observado nos anos de 2005 (MARENGO et al., 2008) e 2014

(ESPINOZA et al., 2014), que ocorreram eventos extremos de seca e cheia, respectivamente, no rio Madeira atribuídas à TSM do Atlântico.

O dipolo atua para modular a intensidade e posicionamento da Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT). Porém, durante o verão, não há uma relação clara com a intensidade e posição da ZCIT (NOBRE; SHUKLA, 1996; SOUZA et al., 2000). O DA também pode influenciar no regime hidrológico da bacia do rio Madeira, impactando diretamente nas grandes cheias e vazantes. Porém, são necessários estudos mais aprofundados para entender o impacto do Dipolo Atlântico na precipitação da bacia do rio Madeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A precipitação total anual na bacia do rio Madeira estimada com dados de sensoriamento remoto entre 1981 e 2023 foi de 3490 mm.ano⁻¹. Os extremos de precipitação foram observados em 2010 (3116 mm.ano⁻¹) e 1982 (3906 mm.ano⁻¹). Os meses de janeiro e fevereiro apresentaram os maiores volumes de precipitação, enquanto junho e julho foram os mais secos. A região dos rios Madre de Dios e Mamoré apresentam *hotspots* pluviométricos, com acumulados anuais elevados, enquanto a região sudeste da bacia, especialmente a bacia do rio Grande, possui uma tendência negativa de precipitação, possivelmente condicionada pelo aumento do desmatamento.

O El-Niño Oscilação Sul (ENOS) tende a reduzir a precipitação durante sua fase positiva em cerca de 10%, a fase negativa não apresenta um aumento significativo. Além disso, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Sistema de Monções Sul-Americano (SAMS) e o Dipolo Atlântico (DA) tendem a influenciar na precipitação da bacia e condicionar eventos extremos de cheia e seca no rio Madeira. Logo, a bacia apresenta uma dinâmica pluviométrica complexa que varia de *hotspots* a regiões com tendências negativas de precipitação, influenciada por fatores físicos e possivelmente antrópicos, com implicações diretas no regime hidrológico. A compreensão desses padrões é essencial para o manejo sustentável dos recursos hídricos e para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no padrão de uso da terra na região.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) – HIDROWEB**. 2025, disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>.
- ALMEIDA, H. A.; FREITAS, R.C.; SILVA, L. Determinação de períodos secos e chuvosos em dias microrregiões da Paraíba através da Técnica dos Quantis. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 30, n. 1, p. 217-232, 2013.
- CAVALCANTE, R.B.L.; FERREIRA, D.B.S.; PONTES, P.R.M.; TEDESCHI, R.G.; COSTA, C.P.W.; SOUZA, E.B. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, 2020.
- CORDEIRO, A.L.M.; BLANCO, C.J.C. Assessment of satellite products for filling rainfall data gaps in the Amazon region. **Natural Resource Modeling**, v. 34, n. 2, 2021.
- COSTA, C. P. W.; SATYAMURTY, P. Inter-hemispheric and inter-zonal moisture transports and monsoon regimes. **Int. J. Climatol.** V. 36, pp. 4705–4722, 2016.
<https://doi.org/10.1002/joc.4662>
- ESPINOZA, J.C.; CHAVEZ, S.; RONCHAIL, J.; JUNQUAS, C.; TAKAHASHI, K.; LAVADO, W. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. **Water Resources Research**, v. 51, n. 5, 2015.
- ESPINOZA, J.C.; MARENGO, J.A.; RONCHAIL, J.; CARPIO, J.M.; FLORES, L.N.; GUYOT, J.L. The extreme 2014 flood in southwestern Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environ. Res. Lett.**, v. 9, 2014.
- ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; MARENGO, J.A.; SEGURA, H. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Clim. Dyn.**, v. 52, pp. 5413–5430, 2019a.
- ESPINOZA, J.C.; SORENSSON, A.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**, v. 26, 2019b.
- ESPINOZA-VILLAR, R.E.; MARTINEZ, J.-M.; LE TEXIER, M.; GUYOT, J.-L.; FRAIZY, P.; MENESES, P.R.; OLIVEIRA, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **J South Am. Earth Sci.**, v. 44, pp. 45–54, 2013.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; et al. The climate hazards infrared precipitation with stations -a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 150066, 2015. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/sdata201566>. Acesso em 09 de março de 2019.
- GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities: Based on Oceanic Niño Index (ONI)**. 2024. Disponível em: <https://ggweather.com/enso/oni.htm>. Acesso em: 07/02/2025.

GRIMM, A.; VERA, C.; MECHOSO, C. The South American monsoon system. In: **The Global Monsoon System: Research and Forecast**. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2005; pp. 219–238

GRIMM, A.M.; LAUREANTI, N.C.; RODAKOVISKI, R.B.; GAMA, C.B. Interdecadal variability and extreme precipitation events in South America during the monsoon season. **Clim. Res.**, v. 68, pp. 277–294, 2016.

HSU, K.L.; GUPTA, H.V.; GAO, X.; Sorooshian, S. Rainfall Estimation from Satellite Imagery. In: GOVINDARAJU, R.S.; RAO, A.R. (Orgs.) **Artificial Neural Networks in Hydrology**. Water Science and Technology Library, vol 36m. Springer, Dordrecht, 2000. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9341-0_12

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G. Improving the global precipitation record: GPCP Version 2.1. **Geophysical Research Letters**, v. 36, L17808, 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GL040000>.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G., HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, pp. 38–55, 2007. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, pp. 1965–1982, 2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)0402.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)0402.0.CO;2).

LAUREANTI, N.C.; TAVARES, P.D.S.; TAVARES, M.; RODRIGUES, D.C.; GOMES, J.L.; CHOU, S.C.; CORREIA, F.W.S. Extreme Seasonal Droughts and Floods in the Madeira River Basin, Brazil: Diagnosis, Causes, and Trends. **Climate**, v. 12, n. 111, 2024.

LIMBERGER, L.; SILVA, M.E.S. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, Brasil, v. 20, n. 3, p. 657–675, 2016.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system. **Int. J. Climatol.**, v. 32, pp. 1–21, 2012. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.D.; OLIVEIRA, G.S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, E.; ALVES, L.M.; BROWN, F. The Drought of Amazonia in 2005. **Climate**, v. 21, 2008.

- MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R.; RODRIGUEZ, D.A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophys. Res. Lett.**, v. 38, pp. 1–5, 2011.
- MARINHO, R.R.; RIVERA, I.A. A Precipitação Estimada Por Satélite Na Bacia Do Rio Negro, Noroeste Amazônico (1981-2017). **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [S. l.], v. 50, p. 44–61, 2021. DOI: 10.5380/raega.v50i0.67426.
- MINISTRY OF ENVIRONMENT AND WATER BOLIVIA, & STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE. **Balance Hídrico de Bolivia 1980 - 2020 (Versão 1)**. Ministerio de Medio Ambiente y Agua – Bolivia, 2024.
- MOLINIER, M.; GUYOT, J.L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. Les Régimes Hydrologiques de L’amazone et de ses Affluents. In: CHEVALLIER, P.; POUYAUD, B. (Orgs.) **L’hydrologie Tropicale: Géoscience et Outil Pour le Développement**. Paris, IAHS, pp. 209-222, 1996.
- MU, Y.; BIGGS, T.; SHEN, S.S.P. Satellite-based precipitation estimates using a dense rain gauge network over the Southwestern Brazilian Amazon: Implication for identifying trends in dry season rainfall. **Atmospheric Research**, v. 261, 2021.
- MULLER, R.; MULLER, D.; SCHIERHORN, F.; GEROLD, G.; PACHECO, P. Proximate causes of deforestation in the Bolivian lowlands: an analysis of spatial dynamics. **Reg Environ Change**, v. 12, pp. 445–459, 2012.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **J. Clim.**, v. 9, pp. 2464–2479, 1996.
- NOVELLA, N. S.; THIAW, W. M. African Rainfall Climatology Version 2 for famine early warning systems. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, pp. 588–606, 2013. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0238.1>.
- PACA, V.H.M.; ESPINOZA-DAVALOS, G.E.; MOREIRA, D.M.; 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.
- PACCINI, L.; ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; SEGURA, H. Intra-seasonal rainfall variability in the Amazon basin related to large-scale circulation patterns: a focus on western Amazon–Andes transition region. **Internacional Journal of Climatology**, v. 38, n. 5, 2018.
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 11, pp. 1633–1644, 2007.
- RIBEIRO NETO, A.; SILVA, R.C.V.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Simulação na Bacia Amazônica com Dados Limitados: Rio Madeira. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13 n.3, pp. 47-58, 2008.
- SENA, J.P.O.; MELO, J.S.; LUCENA, D.B.; MELO, E.C.S. Caracterização da precipitação na microrregião do Cariri Paraibano por meio da Técnica dos Quantis. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7. n.5, p. 871-879, 2014.
- SOUZA, E.B.; NOBRE, P. Uma revisão sobre o padrão de dipolo no Atlântico tropical. **Rev. Bras. Meteorol.** v. 13, pp. 31–44, 1998.

- SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960–1998. **Acta Amazônica**, v. 30, pp. 305–318, 2000.
- SOUZA, V.A.S.; MOREIRA, D.M.; ROTUNNO FILHO, O.C.; RUDKE, A.P.; ANDRADE, C.D.; ARAUJO, LMN. Spatio-temporal analysis of remotely sensed rainfall datasets retrieved for the transboundary basin of the Madeira River in Amazonia. **Atmosfera**, v. 35, n. 1, pp. 39–66, 2022.
- SPRACKLEN, D.V.; ARNOLD, S.R.; TAYLOR, C.M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, v. 489, pp. 282–390, 2012.
- TRENBERTH, K.E. The definition of El Niño. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 78, pp. 2771–2777, 1997.
- VAUCHEL, P.; SANTINI, W.; GUYOT, J.L.; MOQUET, J.S.; MARTINEZ, J.M.; ESPINOZA, J.C.; BABY, P.; FUERTES, O.; NORIEGA, L.; PUTA, O.; SONDAG, F.; FRAIZY, P.; ARMIJOS, E.; COCHONNEAU, G.; TIMOUK, F.; OLIVEIRA, E.; FILIZOLA, N.P.; MOLINA, J.; RONCHAIL, J. A Reassessment of the Suspended Sediment Load in the Madeira River Basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, Based on 10 Years of Data from the HYBAM Monitoring Programme. **J. Hydrol.**, v. 553, pp. 35–48, 2017.
- VERA, C.S.; HIGGINS, J.; AMBRIZZI, T.; GARREAUD, R.; GOCHIS, D.; GUTZLER, D.; LETTENMAIER, D.; MARENGO, J.; MECHOSO, C.R.; NOGUES-PAEGLE, J.; SILVA DIAS, P.L.; ZHANG, C. Toward a unified view of the American monsoon systems. **Journal of Climate**, v. 19, pp. 4977–5000, 2006.
- WANG C. ENSO, Atlantic Climate Variability, and the Walker and Hadley Circulations. In: DIAZ, H.F.; BRADLEY, R.S. (Orgs.). **The Hadley Circulation: Present, Past and Future**. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2004.
- XAVIER, T. M. B. S.; SILVA, J. F.; REBELLO, E. R. G. **A técnica dos quantis e suas aplicações em Meteorologia, Climatologia e Hidrologia, com ênfase para as regiões brasileiras**. Brasília: Thesaurus, 2002.
- XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Caracterização de períodos secos e ou excessivamente chuvosos no estado do Ceará através da técnica dos quantis: 1964-1998. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.14, n 2, p. 63-78, 1999.
- XAVIER, T.M.; B.S.; XAVIER, A.F.S; ALVES, J.M.B. **Quantis e eventos extremos: aplicações em ciências da terra e ambientais**. Fortaleza: RDS, 2007. 278 p.
- ZANIN, P.R.; SATYAMURTY, P. Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from seasonal to intramonthly time scales: A critical review. **Int J Climatol**, pp. 1–35, 2020.
- ZANIN, P.R.; SATYAMURTY, P. Interseasonal and Interbasins Hydrological Coupling in South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 22, n. 6, pp. 1609-1625, 2021.
- ZEMP, D.C.; SCHLEUSSNER, C.F.; BARBOSA, H.M.J.; VAN-DER ENT, R.J.; DONGES, J.F.; HEINKE, J.; SAMPAIO, G.; RAMMIG, A. On the importance of cascading moisture

recycling in South America. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, 13337–13359, 2014.

ZHOU, J.; LAU, K.M. Does a monsoon climate exist over South America? **J. Climate**, v. 11, pp. 1020–1040, 1998.