

# RELATÓRIO DE ATIVIDADES

## DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA



### SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO MADEIRA

#### Relatório Anual de operação 2021

---

**Serviço Geológico do Brasil - CPRM**

**Dezembro de 2021**

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**  
**DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT**  
**DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA**

# **Relatório de Atividades**

## **Departamento de Hidrologia**

---

**SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO MADEIRA**  
Relatório Anual de operação 2021

---

### **REALIZAÇÃO**

Divisão de Hidrologia Aplicada

### **AUTORES**

Marcus Suassuna Santos

Hérculys Castro

Artur José Soares Matos



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL  
CPRM

**Brasília, dezembro de 2021**

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

**Ministro de Estado**

Bento Albuquerque

**Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**

Pedro Paulo Dias Mesquita

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

**DIRETORIA EXECUTIVA**

**Diretor-Presidente**

Esteves Pedro Colnago

**Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial**

Alice Silva de Castilho

**Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

Marcio José Remédio

**Diretor de Infraestrutura Geocientífica**

Paulo Afonso Romano

**Diretor de Administração e Finanças**

Cassiano de Souza Alves

**COORDENAÇÃO TÉCNICA**

**Chefe do Departamento de Hidrologia**

Frederico Claudio Peixinho

**Chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada**

Adriana Dantas Medeiros

**EQUIPE DO SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DO RIO MADEIRA**

Marcus Suassuna Santos

Hérculys Castro

Artur José Soares Matos

## PROJETO DOS SISTEMAS DE ALERTAS HIDROLÓGICOS

### SISTEMA DE ALERTA HIDROLÓGICO DO RIO MADEIRA – SAH MADEIRA

(Relatório de Atividades N° 1 – Ano 2021)

#### REALIZAÇÃO

Divisão de Hidrologia Aplicada

#### AUTORES

Marcus Suassuna Santos

Hérculys Castro

Artur José Soares Matos

**FOTOS DA CAPA:** Rio Madeira, arquivo pessoal Franco Buffon

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

S237r Santos, Marcus Suassuna.  
Relatório de atividades Departamento de Hidrologia : sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Madeira : relatório anual de operação 2021 / Marcus Suassuna Santos, Hérculys Castro, Artur José Soares Matos ; realização Divisão de Hidrologia Aplicada. – Brasília : CPRM, 2021.  
1 recurso eletrônico : PDF  
  
ISBN 978-65-5664-186-7  
  
1.Hidrologia. 2.Bacias hidrográficas. I. Santos, Marcus Suassuna. II. Castro, Hérculys. III. Matos, Artur José Soares. IV. Título.

CDD 551.48

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB 5662

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM  
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - CPRM  
[www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)  
[seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br)

## **APRESENTAÇÃO**

---

O Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Madeira (SAH Rio Madeira) apresenta seu Relatório Anual de Operação de 2021. Neste relatório será apresentada uma descrição geral do monitoramento feito na bacia e um histórico da operação do SAH Madeira. Será feita ainda uma caracterização da bacia em seus aspectos hidroclimatológicos, incluindo caracterização do clima, chuvas e hidrologia, com foco na caracterização das cheias. Serão descritas também a cheia e a vazante de 2021 no rio Madeira, considerando as chuvas, vazões e níveis observados na bacia. Por fim, serão tratados aspectos relevantes da operação deste ano e a repercussão nos meios de comunicação.

## RESUMO

---

A cheia de 2021 no rio Madeira foi uma cheia com uma probabilidade de ocorrência anual de 36%. Ela foi causada por chuvas acima da média nos meses de dezembro a abril de 2021. Esse período de chuvas acima da média foi sucedido por períodos de meses com chuvas abaixo da média, entre maio e outubro deste ano, o que acabou provocando a terceira seca mais severa no rio, em termos de níveis e a oitava seca mais severa em termos de vazões. O acompanhamento do ano hidrológico utilizando um conjunto de ferramentas de sensoriamento remoto permitiu ampliar as análises e gerar prognósticos e previsões mais assertivas. O uso do modelo hidrológico SMAP, calibrado utilizando-se algoritmo genético MOPSO na previsão de níveis com horizonte de até 15 dias, utilizando dados de evapotranspiração SSEBOP, estimativas de chuvas utilizando-se o produto MERGE/INPE e previsão de chuvas por Ensemble com modelo meteorológico GEFS gerando um conjunto de previsões, qualificou bastante o acompanhamento das cheias e secas na bacia. Limitações decorrentes tanto da modelagem hidrológica quanto dos dados de entrada são objeto de constantes investigações por parte da CPRM e espera-se que para o período de monitoramento de 2021/2020 avanços ainda mais significativos possam ser produzidos.

## ABSTRACT

---

The 2021 flood on the Madeira River was a flood with an annual probability of occurrence of 36%. It was caused by above-average rainfall from December to April 2021. This period of above-average rainfall was followed by periods of months with below-average rainfall, between May and October of this year, which ended up causing the third drought the most severe in the river, in terms of levels and the eighth-most severe drought in terms of flows. Monitoring the hydrological year using a set of remote sensing tools made it possible to expand the analysis and generate more assertive forecasts and forecasts. The use of the SMAP hydrological model, calibrated using the MOPSO genetic algorithm to forecast levels with a lead time of up to 15 days, using SSEBOP evapotranspiration data, rainfall estimates using the MERGE/INPE product and the GEFS ensemble model forecast , highly qualified the monitoring of floods and droughts in the basin. Limitations arising from both hydrological modelling and input data are subject to constant investigation by the CPRM and it is expected that for the monitoring period 2021/2020 even more significant advances can be produced.

## SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. BACIA DO RIO MADEIRA E MONIOTORAMENTO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>12</b>
<b>3. HISTÓRICO DE OPERAÇÃO DO SAH MADEIRA .....</b>	<b>15</b>
<b>4. HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO MADEIRA .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Clima .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 Regime hidrológico .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3 Análise de frequência de cheias .....</b>	<b>19</b>
<b>5. DESCRIÇÃO DO ANO HIDROLÓGICO DE 2021.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1 Impactos da cheia na bacia .....</b>	<b>25</b>
<b>6. OPERAÇÃO REALIZADA EM 2021.....</b>	<b>26</b>
<b>7. AGRADECIMENTOS AOS PARCEIROS .....</b>	<b>28</b>
<b>9. CONCLUSÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>10. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>30</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: Mapa da bacia do rio Madeira, com destaque para as sub-bacias que compõem a bacia, que apresenta a estação de Rio Branco em seu trecho mais à jusante. ....	13
Figura 2: Diagrama unifilar da bacia do rio Madeira, com destaque para as estações de monitoramento, sedes municipais, os principais afluentes do rio, áreas de drenagem e distância entre as estações. ....	14
Figura 3: Mapa de climas de acordo com classificação de Koppen-Geiger na América do Sul (Fonte: Peel et al., 2007). ....	16
Figura 4: Chuva média mensal – dados MERGE/INPE – período de 2000 a 2020. ....	17
Figura 5: Variação sazonal dos níveis na estação de Porto Velho. ....	18
Figura 6: Variação sazonal dos níveis das demais estações do SAH Madeira. ....	19
Figura 7: Relação entre períodos de recorrência e vazões máximas anuais nas quatro principais estações na calha do rio Madeira. ....	20
Figura 8: Anomalias de precipitação na bacia do rio Madeira ao longo meses que antecederam as cheias (Fonte do dado: <a href="https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p05/">https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p05/</a> , créditos ao analista em geociências pela CPRM Daniel Medeiros Moreira pela geração da figura).....	22
Figura 9: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Porto Velho. ....	23
Figura 10: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Guajará Mirim.....	24
Figura 11: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Jirau Jusante Beni. ....	25
Figura 12: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Pedras Negras. ....	25

Figura 13: Previsão de níveis em Porto Velho utilizando o modelo SMAP, previsão de precipitação por ensemble a partir do modelo GEFS, evapotranspiração do SSEBOP e chuvas do MERGE/INPE. ....27

Figura 14: Hidrograma de cheia observado em Porto Velho e desempenho do modelo hidrológico SMAP ao longo da cheia deste ano.....28

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1: Estações de Monitoramento Fluviométrico de interesse na bacia do rio Madeira.....	13
Tabela 2: Municípios atendidos com previsão hidrológica e dados gerais dos municípios.....	14
Tabela 3: Parâmetros ajustados da distribuição Gumbel, utilizando o método dos momentos-L aos dados das estações de monitoramento do alerta do Madeira. .....	21

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Madeira (SAH Rio Madeira) apresenta seu Relatório Anual de Operação de 2021. Neste relatório será apresentada uma descrição geral do monitoramento feito na bacia e um histórico da operação do SAH Madeira. Será feita ainda uma caracterização da bacia em seus aspectos hidroclimatológicos, incluindo caracterização do clima, chuvas e hidrologia, com foco na caracterização das cheias. Serão descritos também os processos de cheia e vazante de 2021, considerando as chuvas, vazões e níveis observados na bacia. Por fim, serão tratados aspectos relevantes da operação deste ano e a repercussão nos meios de comunicação.

## 2. BACIA DO RIO MADEIRA E MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Na Figura 1 é apresentado um mapa da bacia do rio Madeira e as estações que compõem a rede de monitoramento da região. Dados dessas estações são detalhados na

Tabela 1. O rio Madeira banha o município de Porto Velho e é formado a partir da confluência dos rios Guaporé e Beni, entre as estações de Guajará-Mirim e UHE Jirau Jusante rio Beni. Além dos principais formadores do rio Madeira (Mamoré, Guaporé e Beni) os principais afluentes do rio Madeira são o rio Abunã, por sua margem esquerda, e os rios Machado e Ariquemes por sua margem direita, esses dois últimos, já à jusante de Porto Velho.

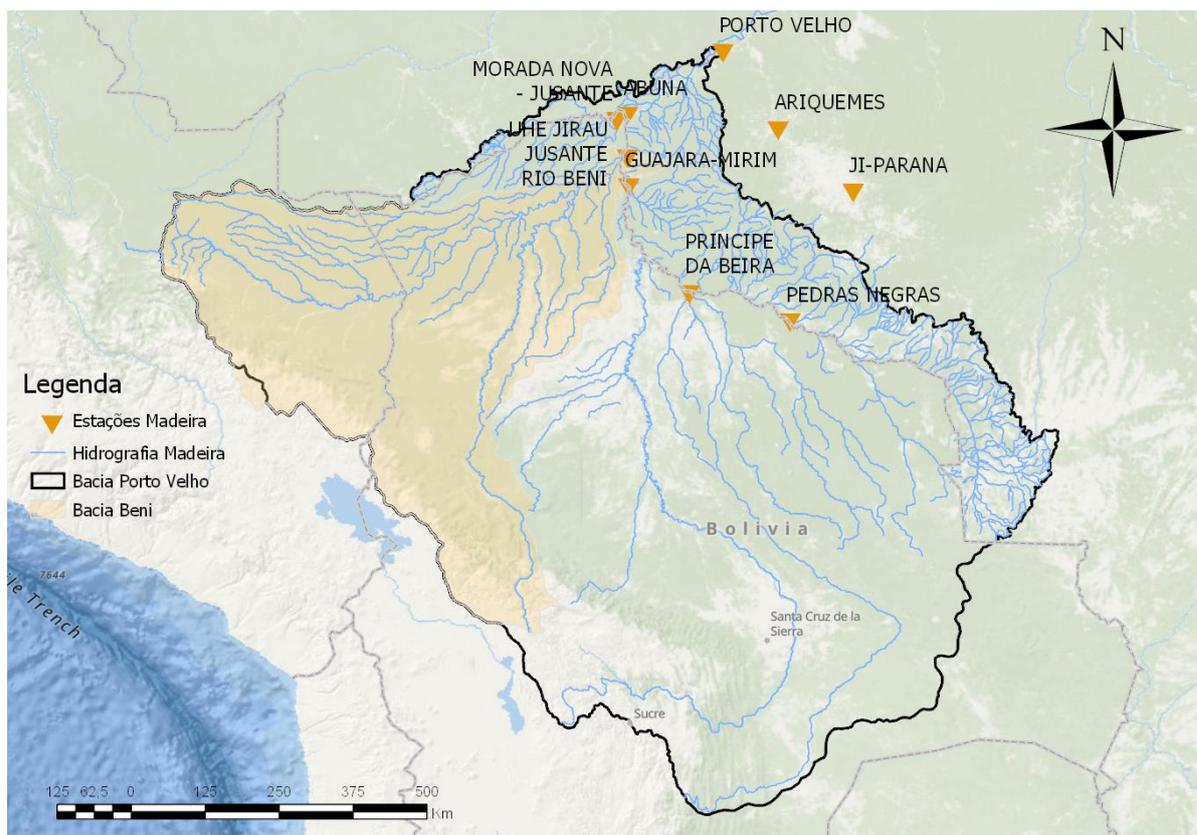


Figura 1: Mapa da bacia do rio Madeira, com destaque para as sub-bacias que compõem a bacia, que apresenta a estação de Rio Branco em seu trecho mais à jusante.

Tabela 1: Estações de Monitoramento Fluviométrico de interesse na bacia do rio Madeira.

Nome	Código	Rio	Município	Área
PIMENTEIRAS	15130000	Guaporé	Pimenteiras	54.400
PEDRAS NEGRAS	15150000	Guaporé	Costa Marques	110.000
PRINCIPE DA BEIRA	15200000	Guaporé	Costa Marques	341.000
GUAJARÁ-MIRIM	15250000	Mamoré	Guajaré Mirim	609.000
ABUNÃ	15320002	Madeira	Porto Velho	921.000
MORADA NOVA - JUSANTE	15326000	Abunã	Porto Velho	31.100
PORTO VELHO	15400000	Madeira	Porto Velho	976.000
PROSPERIDADE	15490000	Madeira	Porto Velho	977.000
UHE JIRAU JUSANTE RIO BENI	15318000	Madeira	Nova Mamoré	834.000
Ji-PARANÁ	15560000	Ji-Paraná (ou Machado)	Ji-Paraná	32.800
TABAJARA	15580000	Ji-Paraná (ou Machado)	Machadinho d'Oeste	60.200

Na Figura 2 uma outra representação da hidrografia do rio Madeira é apresentada, que é o diagrama unifilar. Esse diagrama é uma representação cartográfica, sintética e esquemática da organização estrutural da rede fluvial. Nessa representação, os rios são representados por linhas conectados por nós, que representam as confluências. No diagrama unifilar do rio Madeira, também são indicadas informações das estações de monitoramento da bacia, incluindo

seu nome, código e área de drenagem, os nomes dos rios e as distâncias entre as estações. Além disso, as sedes municipais são indicadas por círculos.

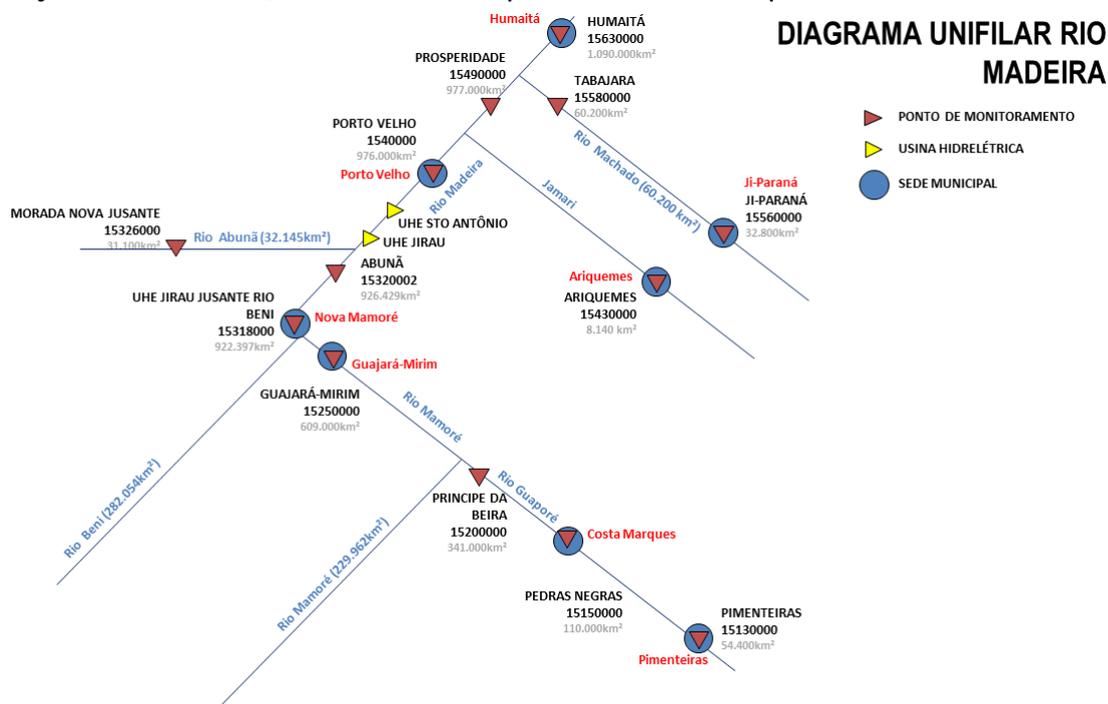


Figura 2: Diagrama unifilar da bacia do rio Madeira, com destaque para as estações de monitoramento, sedes municipais, os principais afluentes do rio, áreas de drenagem e distância entre as estações.

Em termos de vulnerabilidade a inundações, as localidades onde há maior risco na bacia são as sedes municipais dos municípios Porto Velho e Guajará-Mirim. Na Tabela 2 são indicadas as populações desses municípios. Além da população, são indicadas nessa mesma tabela os níveis de referência utilizados para o monitoramento da bacia ao longo do período de cheias. Vale resgatar que, pelas definições hoje adotadas pela CPRM: a cota de inundação é aquela em que o primeiro dano é observado no município; a cota de alerta indica que há possibilidade elevada de ocorrência de inundação; e a cota de atenção indica que há possibilidade moderada de ocorrência de inundação.

Tabela 2: Municípios atendidos com previsão hidrológica e dados gerais dos municípios.

Municípios	População (IBGE, 2010)	Cota de referência (m)		
		Atenção	Alerta	Inundação
Porto Velho	428.527	14,0	15,0	17,0
Guajará-Mirim	41.656	-	10,2	11,1

Fonte: [http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php](http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php)

### **3. HISTÓRICO DE OPERAÇÃO DO SAH MADEIRA**

O rio Madeira, dentre os afluentes amazônicos, é o maior tributário, contribuindo com aproximadamente 15% da descarga líquida total do rio Amazonas (MARTINELLI et al., 1989). Também é o rio com maior carga de transporte de sedimentos do mundo e está em permanente processo de agradação e erosão fluvial, o que reflete em constantes mudanças de grande magnitude na geometria do canal e na formação de ilhas. Além disso, este rio possui uma grande oscilação sazonal de níveis e vazões, intensificando os processos de sua dinâmica fluvial.

No ano de 2014 ocorreu a maior enchente já registrada no rio Madeira, com vazões superiores a  $60.000\text{m}^3/\text{s}$  causando velocidades superiores a  $4\text{m/s}$  no canal do rio. Em determinadas medições de descargas líquidas, realizadas pela equipe técnica do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Residência de Porto Velho, a vazão de fundo móvel estimada foi superior a  $6.000\text{m}^3/\text{s}$ .

Em Porto Velho, o trimestre em que ocorrem as maiores vazões média na bacia do rio Madeira é durante fevereiro-março-abril, cuja vazão média é da ordem de  $37.000\text{m}^3/\text{s}$ . Durante o trimestre de agosto-setembro-outubro ocorrem as menores vazões em Porto Velho, cuja média das vazões mínimas é da ordem de  $4.500\text{m}^3/\text{s}$ . A vazão média de longo período em Porto Velho é de  $18.886\text{m}^3/\text{s}$ . Nota-se a grande variabilidade das vazões entre os períodos de cheia e seca.

### **4. HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO MADEIRA**

Neste capítulo, será feita uma breve descrição das principais características hidroclimatológicas da bacia do rio Madeira. Características gerais do clima da região serão apresentados, incluindo-se: os principais elementos geradores de chuvas na região; regime pluviométrico; e regime hidrológico.

#### **4.1 CLIMA**

A bacia do rio Madeira, localizada à margem direita do rio Amazonas, encontra-se em uma região de clima complexo com características amazônicas, mas também derivada da posição de muitos de seus afluentes situados na cordilheira dos Andes, especialmente na bacia do rio Beni. Sendo assim, uma grande diversidade de classificações de clima, conforme a classificação de Koppen-Geiger

é observada na bacia (Figura 3). Em uma área de aproximadamente 1.000.000 km<sup>2</sup> são observadas áreas com características típicas de: Floresta Tropical (clima do tipo Af, onde no mês mais seco chove ao menos 60 mm); Savana (Aw, onde no mês mais seco não ocorre praticamente nenhuma chuva); clima Tropical de Monção (Am – que é um clima intermediário entre a Floresta Tropical e a Savana); temperado com verão quente (clima Cfa) e moderado (Cfb); Árido desértico e de estepe frios (BWk e BSk, respectivamente) (Peel et al., 2007).

Estudos recentes, indicam que as cheias e secas da bacia do rio Madeira são fortemente correlacionados com esses eventos em outras bacias, principalmente com a bacia do rio Acre (Santos et al., 2020). Essa conexão entre a formação das cheias nessa bacia e em bacias situadas em clima de Monção e Savana indicam também a forte influência que a bacia do rio Madeira pode ter do Sistema de Monção da América do Sul, considerando que o fato meteorológico determinante do fim da estação seca na região e início das chuvosas, é o estabelecimento dos canais de umidade entre a Amazônia e o centro sul do Brasil, típicos desse tipo de clima (Marengo et al., 2012).

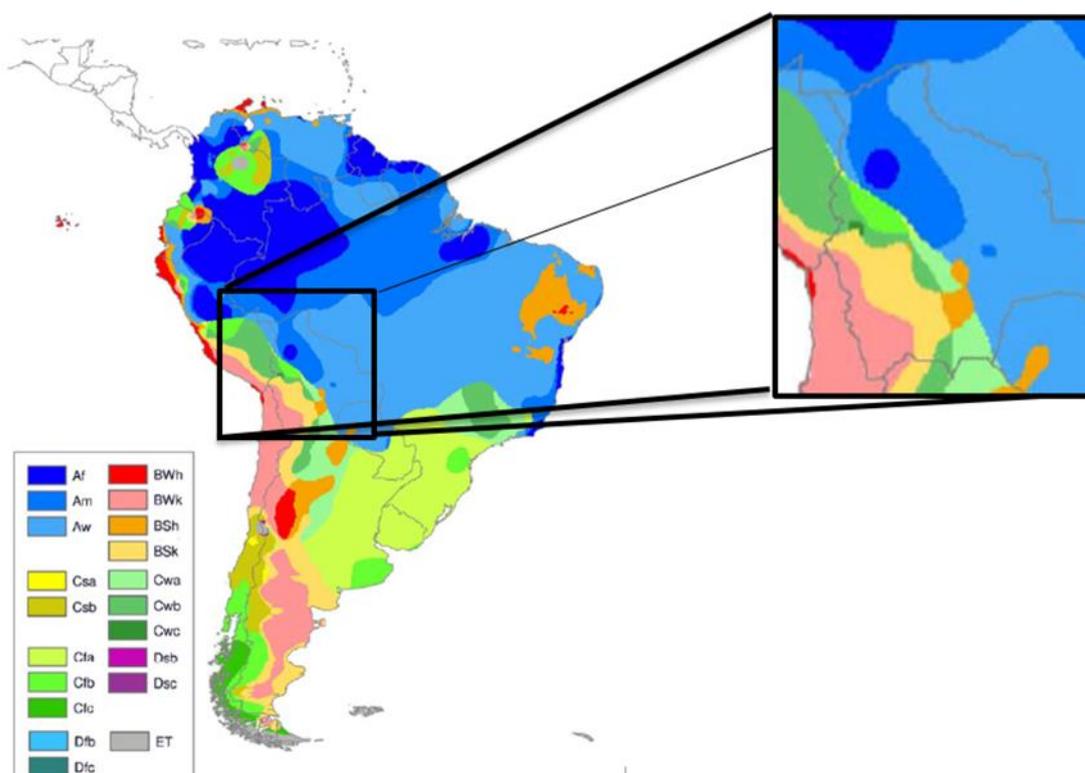


Figura 3: Mapa de climas de acordo com classificação de Köppen-Geiger na América do Sul (Fonte: Peel et al., 2007).

Para estimativa das chuvas sobre a bacia, como a maior parte dela está fora do território brasileiro, é necessário utilizar estimativas de chuvas por sensoriamento remoto, a exemplo das estimativas de precipitações feitas pelo produto MERGE/INPE (Rozante et al., 2010), disponíveis para o período entre 2000 a 2020 (Figura 4). Esse produto combina estimativas de chuvas feitos com o auxílio de satélite e dados de pluviômetros, onde esses dados estão disponíveis. Na bacia do rio Madeira, essas estimativas apontam para chuvas médias anuais na bacia da ordem de 1587 mm ao ano. Os meses mais chuvosos são os meses de janeiro (257 mm), fevereiro (247 mm), dezembro (229 mm) e março (198 mm).

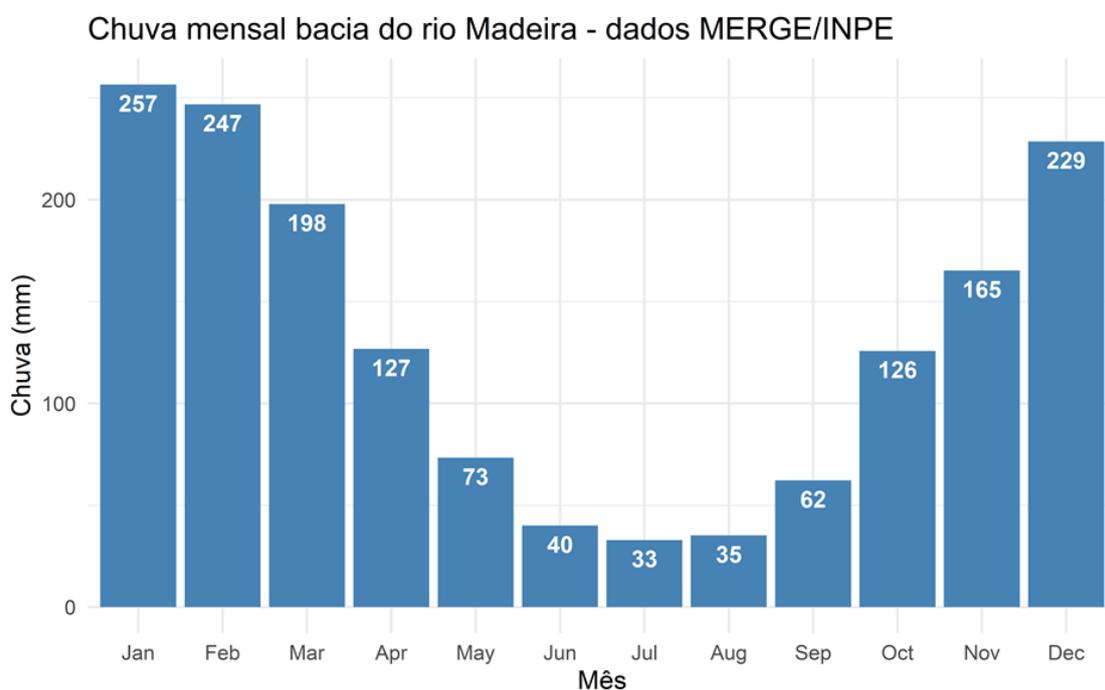


Figura 4: Chuva média mensal – dados MERGE/INPE – período de 2000 a 2020.

## 4.2 REGIME HIDROLÓGICO

Como foi visto anteriormente na breve climatologia descrita acima, o clima da bacia tem características complexas, contudo, do ponto de vista hidrológico, tende a predominar na bacia as características de verão chuvoso e inverno seco. Na Figura 5 e na Figura 6, são apresentadas as variações anuais de níveis nas principais estações fluviométricas instaladas ao longo da calha do rio Madeira, com destaque para a estação de Porto Velho na Figura 5. Em todas elas, a característica de um verão chuvoso, consequência da formação de canais de

umidade conectando a região Amazônica e o Centro-sul do Brasil (Marengo et al., 2012; Santos et al., 2020), se vê refletida na oscilação dos níveis nos rios.

No rio Madeira, o predomínio de níveis elevados dos rios ocorre entre os meses de dezembro a maio, cobrindo o verão e outono na região. Os meses mais frequente para ocorrência de níveis máximos anuais na bacia são fevereiro e março. Nesses meses, as duas principais condições para formação das cheias na bacia estão presentes: umidade suficiente armazenada no solo da bacia; níveis elevados do rio; e possibilidade de chuvas intensas em períodos mais curtos.

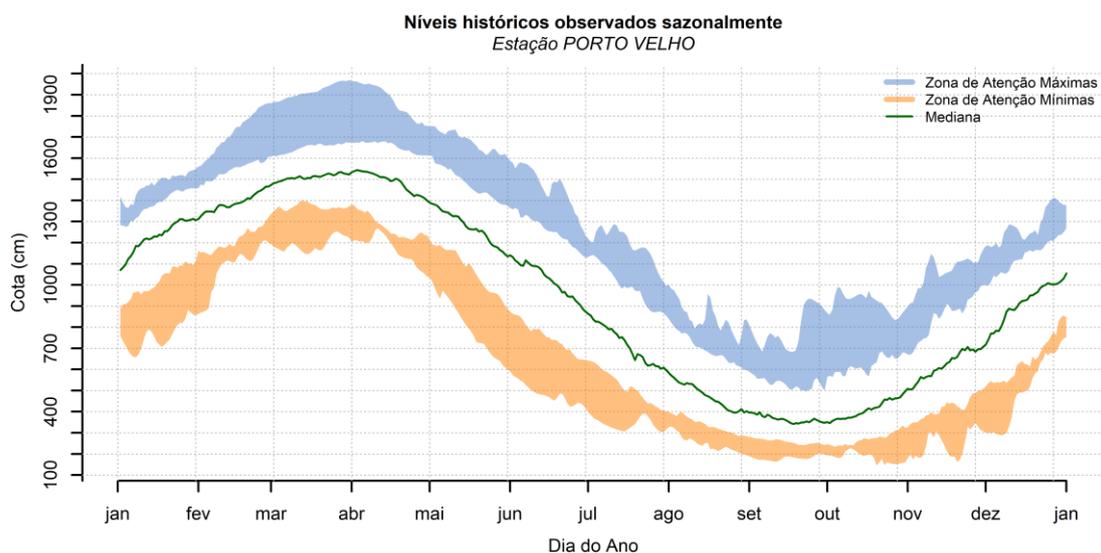
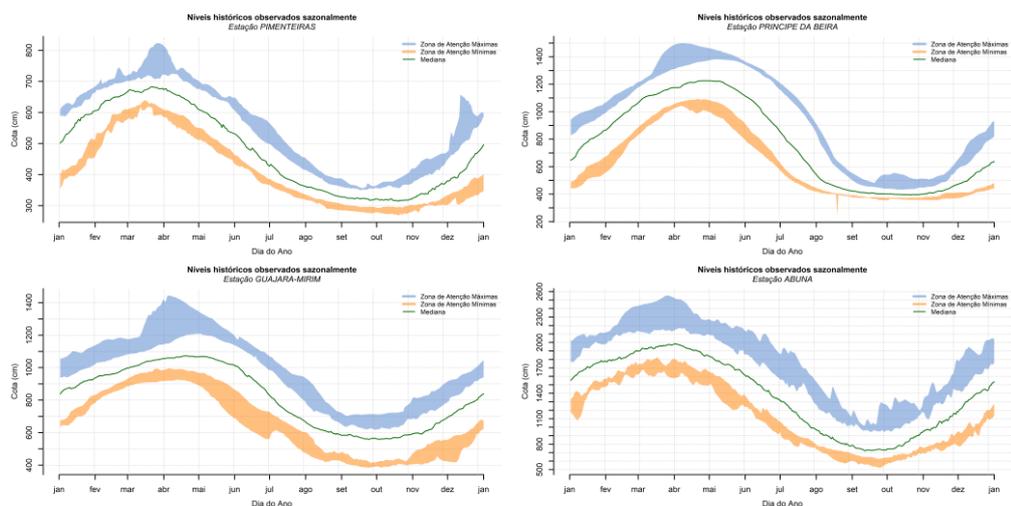


Figura 5: Variação sazonal dos níveis na estação de Porto Velho.



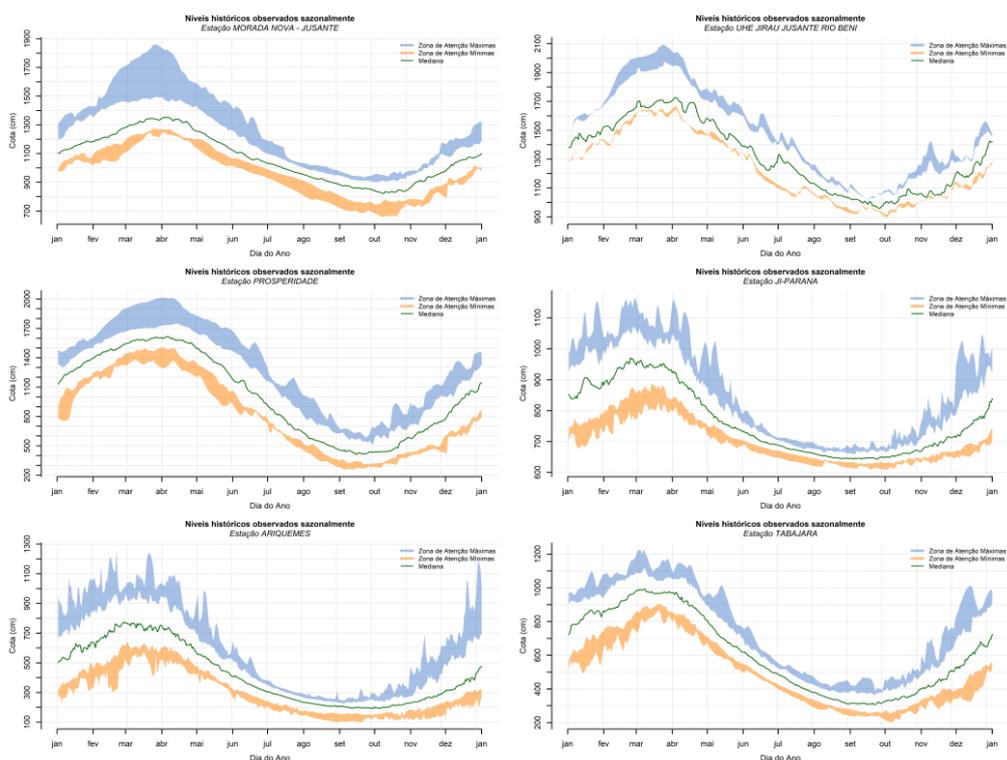


Figura 6: Variação sazonal dos níveis das demais estações do SAH Madeira.

### 4.3 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE CHEIAS

Havendo caracterizado brevemente o clima da bacia, a precipitação e características gerais da hidrologia, serão apresentados os níveis e vazões máximos anuais, bem como será feita uma análise de frequência expedita de vazões extremas, para que se possa ter de referência na análise da cheia de 2021. As vazões e níveis máximos anuais são apresentados na Figura 7. Nessa figura, são apresentados esses valores para as estações localizadas na calha do rio Madeira. A partir desses valores serão feitas as análises de frequência de cheias para esses locais. Na figura, também são apresentadas estimativas de períodos de frequência empírica, estimados pela expressão de Cunnane, que fornece uma forma de se estimar quantis empíricos aproximadamente não-enviesados para quase todas as distribuições de probabilidades (Naghettini e Pinto, 2007; Stedinger et al., 1993).

Vale mencionar que as análises de frequência de valores extremos são feitas com base nas séries de vazões máximas anuais consistidas, disponíveis no banco de dados HidroWeb (ANA, 2017). Devido a eventuais mudanças de posição das estações, bem como devido à geometria não uniforme no trecho superior das

calhas dos rios, quando as vazões extravasam a calha, a análise de frequência de cotas não é recomendável.

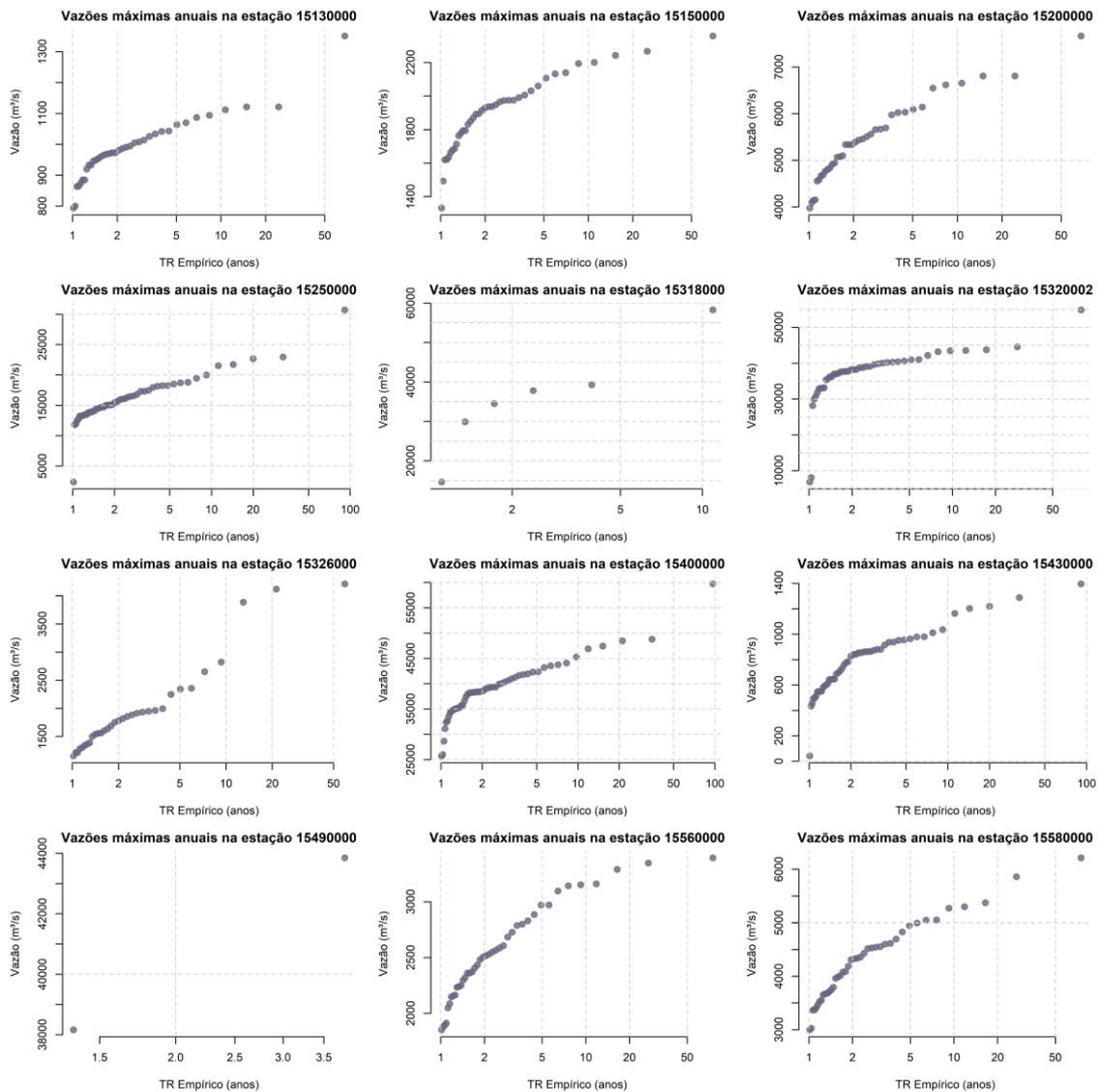


Figura 7: Relação entre períodos de recorrência e vazões máximas anuais nas quatro principais estações na calha do rio Madeira.

Para a análise de frequência, utilizou-se o pacote *extRemes*, disponibilizada para o *software* livre *R* (Gilleland e Katz, 2016). Em todas as estações, foi feita uma análise de frequência independente. Os parâmetros foram estimados utilizando-se o método da Máxima Verossimilhança (Stedinger et al., 1993). Em todos os casos, foi utilizada distribuição de valores extremos de dois parâmetros Gumbel, uma vez que em todas as estações, testes da razão de máxima verossimilhança indicaram que ela é uma distribuição plausível quando comparada com a distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV).

Vale lembrar que a distribuição de probabilidades de Gumbel é um caso específico da distribuição GEV, em que o parâmetro de forma é igual a zero (Naghettini e Pinto, 2007). Como a distribuição GEV necessita de três parâmetros para ser definida e a distribuição de Gumbel de dois; e como, além disso, a estimativa do terceiro parâmetro da distribuição GEV, implica em grandes incertezas, sobretudo utilizando-se a estimativa por máxima verossimilhança com amostras de pequena magnitude (Reis e Stedinger, 2005); assumiu-se a premissa, portanto, de que utilizar a distribuição Gumbel, em princípio seria preferencial em relação à distribuição GEV.

Sendo assim, foi feito o teste de máxima verossimilhança, testando-se a hipótese nula de se utilizar a distribuição GEV (Gilleland e Katz, 2016) e em todas as estações do rio Madeira, o teste resultou que o uso da distribuição Gumbel é plausível. Sendo assim, na Tabela 3 são apresentados os parâmetros ajustados da distribuição de Gumbel para as 4 principais estações localizadas na bacia do rio Madeira obtidos utilizando o método da máxima verossimilhança: Porto Velho, Guajará-Mirim, Ariquemes e Ji-Paraná. Esses parâmetros serão utilizados para as estimativas de tempos de retorno das vazões observadas em 2021 mais adiante neste relatório.

Tabela 3: Parâmetros ajustados da distribuição Gumbel, utilizando o método dos momentos-L aos dados das estações de monitoramento do alerta do Madeira.

Estação	Parâmetro de posição	Parâmetro de escala	Parâmetro de forma
PORTO VELHO	657740	172485	#
GUAJARÁ-MIRIM	407198	84839	#
ARIQUEMES	1518	321	#
JI-PARANÁ	629	633	#

## 5. DESCRIÇÃO DO ANO HIDROLÓGICO DE 2021

Neste capítulo serão descritas as principais características da cheia e da seca de 2021, com destaque a uma descrição geral das precipitações observadas e comparação com a climatologia descrita.

Do ponto de vistas das chuvas, o ano hidrológico de 2020-2021 foi marcado por iniciar em uma condição muito baixa e permanecer nessa condição até o mês de novembro, e após isso observar anomalias positivas de chuvas entre dezembro/2020 até abril/2021. Pela Figura 8, observa-se que os meses de outubro e novembro de 2020 foram caracterizados por chuvas significativamente

abaixo da chuva normal para o período, com 38 mm de anomalia negativa em outubro e 72 mm de anomalia negativa em novembro.

Anomalia de chuva CHIRPS nos últimos 12 meses para PORTO\_VELHO"-15400000

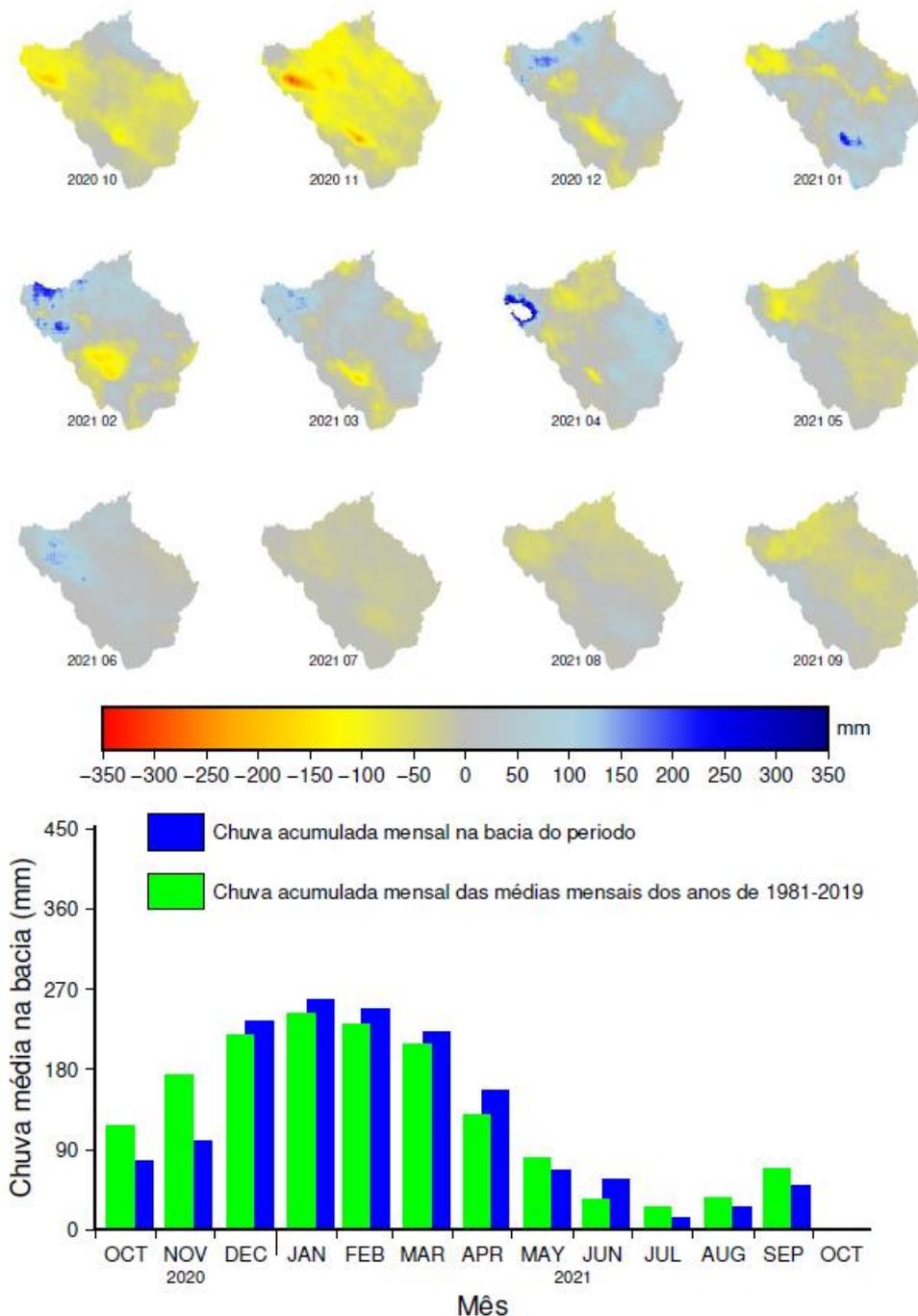


Figura 8: Anomalias de precipitação na bacia do rio Madeira ao longo meses que antecederam as cheias (Fonte do dado: [https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/tifs/p05/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/tifs/p05/), créditos ao analista em geociências pela CPRM Daniel Medeiros Moreira pela geração da figura).

Conforme dados do CHIRPS, após esse período de anomalia bastante negativas acumuladas até novembro, entre dezembro e abril houve 90 mm de anomalias positivas. Essas anomalias foram mais significativas sobre as bacias dos rios Beni e Mamoré. Isso fez com que, ao início da estação chuvosa do rio Madeira, os níveis estivessem muito baixos e as anomalias positivas observadas entre dezembro a abril fizeram com que o rio compensasse as chuvas abaixo da chuva esperada para o início da estação das chuvas, provocando uma cheia pouco acima da média.

Com relação aos níveis e vazões máximas observadas no ano de 2021, da Figura 9 até a Figura 12, são apresentados os cotagramas das cheias de 2021 com a referência histórica para a respectiva estação ao fundo. Nessas figuras, a faixa azul remete a permanências em níveis elevados, onde se situam 10% dos níveis mais elevados dos rios naquele dia, cheias mais altas e a faixa laranja remete a permanências em níveis reduzidos, onde se situam 10% dos níveis mais baixos dos rios naquele dia.

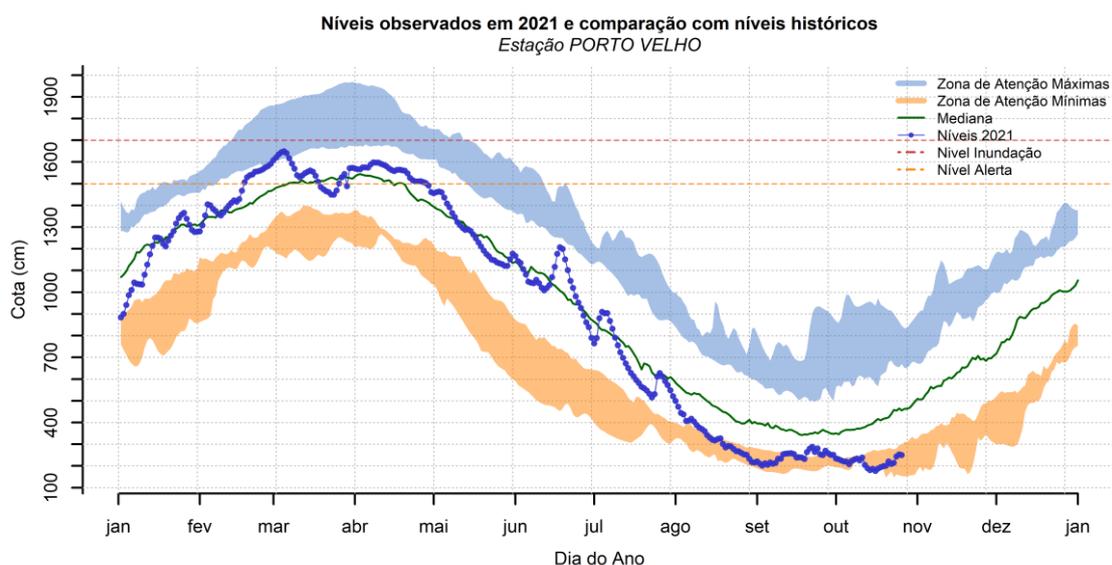


Figura 9: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Porto Velho.

A cheia deste ano no Madeira alcançou a zona de alerta em fevereiro, quando o rio ultrapassou a cota de 15,0 metros. O rio atingiu essa marca após dois meses de acumulados de chuvas acima da média e após episódios de chuvas intensas na primeira quinzena de fevereiro na bacia. Após os episódios mais intensos de chuvas, o rio atingiu a cota máxima deste ano no dia 04 de março, quando alcançou o nível médio diário de 16,66 cm, nível ainda abaixo da cota de inundação de 17,0 metros.

A essa cota de 16,66 cm corresponde a vazão de 40.700 m<sup>3</sup>/s. A essa vazão corresponde um período de retorno de 2,8 anos. Isso significa que, Anualmente, uma cheia dessa magnitude tem a probabilidade de 36% de ser superada. O fato mais atípico da cheia deste ano foi a data de sua ocorrência. Em geral, os picos das cheias no trecho de Porto Velho são observados mais ao final do mês de março. Contudo, este ano, o nível máximo foi observado logo ao início do mês.

Com relação aos níveis mínimos, o nível mínimo observado em 2021 foi a cota de 1,77 m, observada no dia 15 de outubro de 2021. Essa cota corresponde ao terceiro mínimo histórico, nível mais baixo apenas que os anos de 2020 e 2005, quando o rio Madeira atingiu em Porto Velho as cotas de 1,46 e 1,63 metros, respectivamente. Em termos de vazão, o valor observado em 2021 foi de 3.101 m<sup>3</sup>/s, correspondendo à oitava mínima vazão média anual, sendo a vazão observada em 2010 a menor do histórico (2.560 m<sup>3</sup>/s).

Observando-se mais uma vez a Figura 8, entende-se a razão desses níveis mais baixos que o normal neste ano de 2021. Entre maio e outubro, apenas o mês de junho apresentou precipitações pouco acima da média na bacia do rio Madeira. Em todos os demais, as chuvas abaixo de valores normais fizeram com que o processo de vazante tivesse continuidade durante um período prolongado e de modo intenso, acabando por gerar os níveis abaixo da média observados e fazendo com que o rio permanecesse de agosto até novembro com níveis abaixo da cota de 4,0 metros, abaixo da qual restrições à navegação são impostas no rio Madeira pela Delegacia Fluvial de Porto Velho.

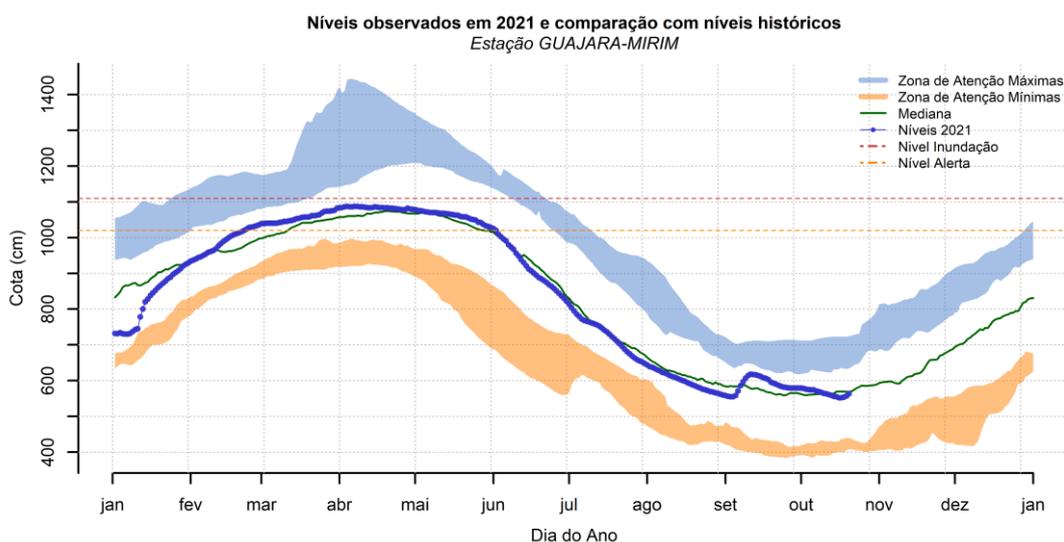


Figura 10: Variação sazonal dos níveis e cotagrama da cheia de 2021 na estação de Guajará Mirim.

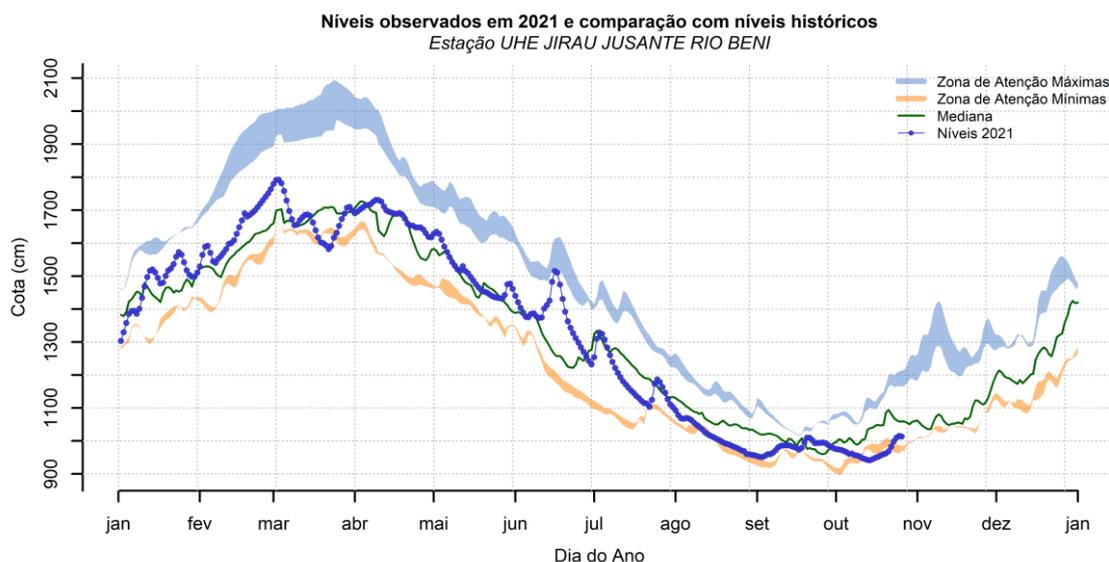


Figura 11: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Jirau Jusante Beni.

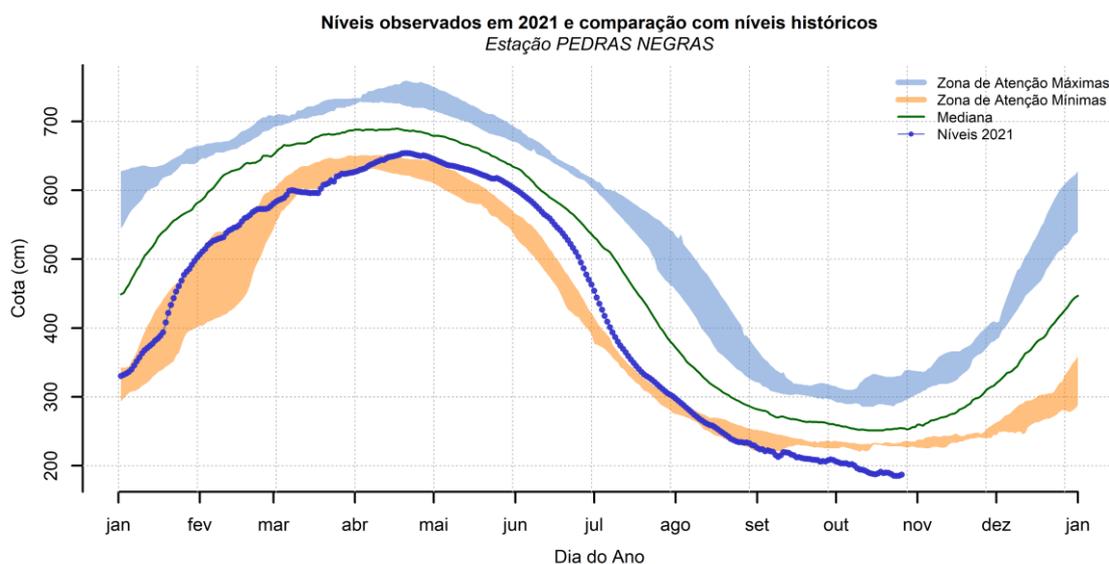


Figura 12: Variação sazonal dos níveis e cotograma da cheia de 2021 na estação de Pedras Negras.

## 5.1 IMPACTOS DA CHEIA NA BACIA

No ano de 2021, não houve danos significativos reportados aos sistemas oficiais de registros de desastres. Apenas o município de Nova Mamoré informou danos no S2ID, ainda que não tenha ocorrido Reconhecimento Federal de Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública (4 desalojados, 12 desabrigados, 52 pessoas afetadas de outras maneiras e R\$ 270.850,00 em prejuízos para a agricultura no município).

## 6. OPERAÇÃO REALIZADA EM 2021

Até a presente data, o SAH Rio Madeira emitiu 31 boletins semanais ao longo de 2021. Além desses, foram emitidos 7 Boletins de Alerta, que apresentam previsões de curto prazo para as estações objeto do alerta. Esses boletins foram emitidos ao longo do período em que os rios apresentaram nível acima da cota de 15,0 metros, ente os dias 23 de fevereiro e 16 de março de 2021.

Os modelos de previsão de curto prazo são modelos de regressão múltipla que estimam os níveis em Porto Velho a partir dos níveis em UHE Jirau Jusante rio Beni. Esses modelos permitem fazer previsões com horizontes de até 3 dias com uma qualidade aceitável. Os parâmetros desses modelos foram calibrados com dados observados até 2019.

Além do modelo de previsão cota-cota, foi utilizado também o modelo hidrológico SMAP, calibrado utilizando-se algoritmo genético MOPSO (Nascimento et al., 2009) na previsão de níveis com horizonte de até 15 dias. Para essa previsão, são utilizados, além dos dados hidrológicos de níveis e vazões, os dados de evapotranspiração SSEBOP (Senay et al., 2013, 2007), estimativas de chuvas utilizando-se o produto MERGE/INPE (Rozante et al., 2010) e previsão de chuvas por Ensemble com modelo meteorológico GEFS (Zhu et al., 2018). Importante lembrar que o modelo de previsão GEFS não fornece apenas uma única saída de previsão de chuvas, mas um conjunto (ou Ensemble) de 20 previsões. Esse conjunto de previsões é importante pois indica as incertezas associadas à previsão meteorológica.

Considerando a quantidade de incertezas aplicada ao modelo de previsão (modelo hidrológico SMAP; estimativa de chuvas por satélite do MERGE/INPE; evapotranspiração SSEBOP; e um conjunto de previsão de chuvas do GEFS), a quantificação dos erros é bastante complexa. Além disso, os prognósticos que resultam dessa análise são voltados mais para estimar a tendência geral do rio para as semanas posteriores, indicado pela tendência geral da nuvem de previsões de chuvas, do que para a preocupação com um valor numérico específico para a previsão. Um exemplo de previsão feita com o modelo SMAP em Porto Velho é apresentada na Figura 13.

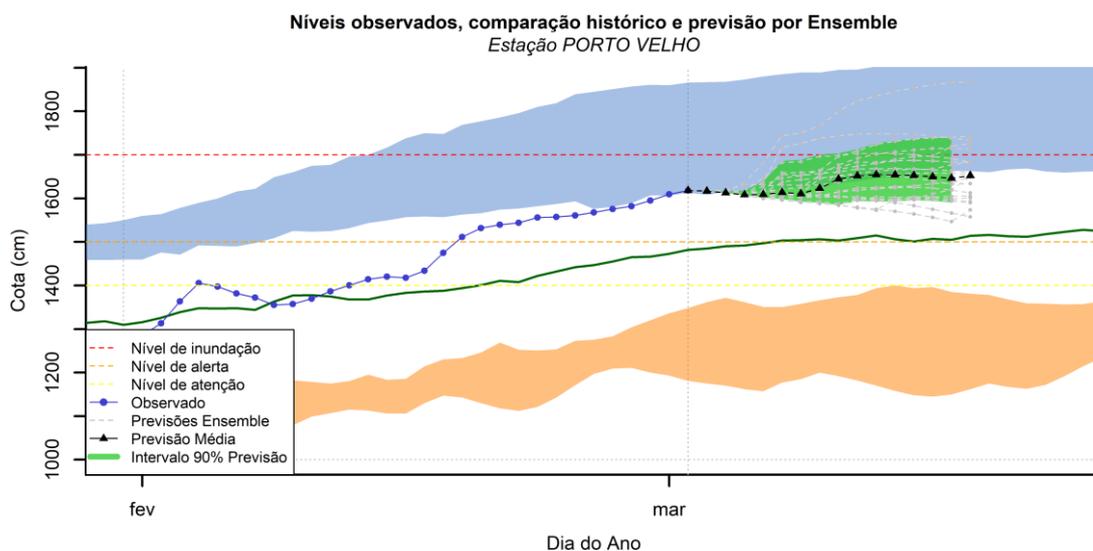


Figura 13: Previsão de níveis em Porto Velho utilizando o modelo SMAP, previsão de precipitação por ensemble a partir do modelo GEFS, evapotranspiração do SSEBOP e chuvas do MERGE/INPE.

Sendo assim, optou-se por uma análise simplificada para análise da previsão com o modelo SMAP, focando apenas no erro do SMAP. Pela Figura 14, observa-se que o SMAP acompanha a tendência geral dos dados, contudo não conseguiu capturar o tempo das cheias e às vezes sub/superestima as vazões de pico. Em especial, a subida que levou à ocorrência da cota máxima do ano de 2021, apesar de ter indicado a subida e a probabilidade de que o rio ultrapassasse a cota de inundação, como pode ser visto na Figura 16. O coeficiente de Nash estimado para o período das cheias foi de 0,96.

Para a estimativa do pico de cheia, vale resgatar que a previsão feita incorpora vários modelos, dentre eles o MERGE/INPE, que é um modelo baseado em satélite, mas que, na medida do possível, incorpora dados de campo coletados por pluviômetros. Já se observou também que existe uma discrepância entre os produtos de satélite (entre o MERGE e CHIRPS, particularmente). Tais discrepâncias levam a crer que parte da razão de o pico de cheia não ter sido previsto deveu-se a uma subestimativa de chuvas de sensoriamento remoto, pois quando os níveis dos rios intensificaram sua subida, as chuvas estimadas por sensoriamento remoto diminuíram sua intensidade.

Essa é apenas uma origem de erro que se propõem neste relatório, mas outras podem e devem ser consideradas em estudos futuros incluindo-se: melhoria da calibração do SMAP em Porto Velho e inclusive a escolha de outro modelo

hidrológico, caso se chegue à conclusão de que há modelos que têm melhor potencial para modelar as cheias na bacia do rio Madeira. Ainda assim, na operação de 2021, a modelagem realizada permitiu mobilizar as defesas civis municipais e estadual, além de outros órgãos ligados ao Governo do Estado do Madeira que de algum modo participaram das ações de resposta.

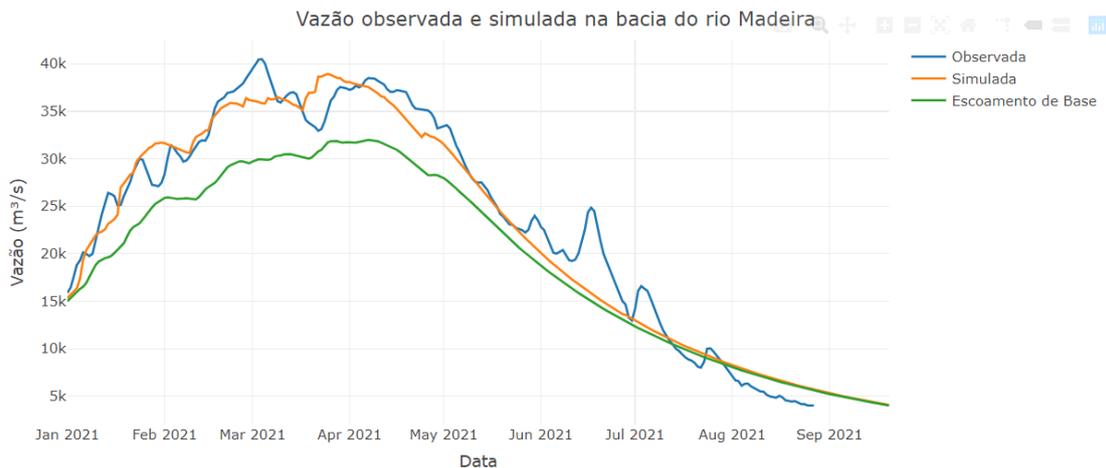


Figura 14: Hidrograma de cheia observado em Porto Velho e desempenho do modelo hidrológico SMAP ao longo da cheia deste ano.

## 7. AGRADECIMENTOS AOS PARCEIROS

Todo o monitoramento feito na bacia do rio Madeira desenvolveu-se ao trabalho em conjunto feito pelo Serviço Geológico do Brasil e a Agência Nacional de Águas para a gestão e operação da Rede Hidrometeorológica Nacional. Além dessa parceria, diversos outros órgãos trabalham no monitoramento hidrometeorológico da região. O Sipam é o órgão regional que fornece grande parte das análises meteorológicas que orientam as ações de monitoramento. Além do SIPAM, também o Cemaden contribui sobremaneira com os alertas de desastres naturais trocando dados e análises com a CPRM. Por fim, o Cenad é órgão que trabalha na articulação de instituições parceiras fomentando a troca de informação entre os órgãos especializados, em especial na região norte do Brasil. Além deles, o INPE, gerador de diversos produtos utilizados por todas as instituições de monitoramento da região, com destaque para o MERGE/INPE, estimador de chuva de grande utilidade para o monitoramento e alerta na bacia do rio Madeira. A todas as instituições a CPRM é enormemente grata.

## 9. CONCLUSÕES

A cheia de 2021 no rio Madeira foi uma cheia com uma probabilidade de ocorrência anual de 36%. Ela foi causada por chuvas acima da média nos meses de dezembro a abril de 2021. Esse período de chuvas acima da média foi sucedido por períodos de meses com chuvas abaixo da média, entre maio e outubro deste ano, o que acabou provocando a terceira seca mais severa no rio, em termos de níveis e a oitava seca mais severa em termos de vazões.

O acompanhamento do ano hidrológico utilizando um conjunto de ferramentas de sensoriamento remoto permitiu ampliar as análises e gerar prognósticos e previsões mais assertivas. O uso do modelo hidrológico SMAP, calibrado utilizando-se algoritmo genético MOPSO na previsão de níveis com horizonte de até 15 dias, utilizando dados de evapotranspiração SSEBOP, estimativas de chuvas utilizando-se o produto MERGE/INPE e previsão de chuvas por Ensemble com modelo meteorológico GEFS gerando um conjunto de previsões, qualificou bastante o acompanhamento das cheias e secas na bacia. Limitações decorrentes tanto da modelagem hidrológica quanto dos dados de entrada são objeto de constantes investigações por parte da CPRM e espera-se que para o período de monitoramento de 2021/2020 avanços ainda mais significativos possam ser produzidos.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, 2017. Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas [WWW Document]. Agência Nac. Águas. URL <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/%5Cnhttp://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>
- Brazil, 2019. Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID [WWW Document]. Sist. Integr. Informações sobre Desastr.
- Ceped, 2013. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012. Relatórios Técnicos. <https://doi.org/978-85-64695-18-4>
- CPRM, 2011. Levantamento da Geodiversidade - Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil - Isoietas Anuais Médias Período 1977 a 2006.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gilleland, E., Katz, R.W., 2016. extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package in R. *J. Stat. Softw.* 72, 1–39. <https://doi.org/10.18637/jss.v072.i08>
- 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., 2012. Recent developments on the South American monsoon system. *Int. J. Climatol.* 32, 1–21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>
- Naghetini, M., Pinto, É.J.D.A., 2007. Hidrologia Estatística.
- Nascimento, L.S. V., Jr Reis, D.S., Martins, E.S.P.R., 2009. Avaliação do Algoritmo Evolutivo Mopso na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 14, 85–97.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 4, 439–473. <https://doi.org/10.5194/hessd-4-439-2007>
- Reis, D.S., Stedinger, J.R., 2005. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information, in: *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.028>
- Rozante, J.R., Moreira, D.S., de Goncalves, L.G.G., Vila, D.A., 2010. Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. *Weather Forecast.* <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222325.1>
- Santos, M.S., Alves, L.G.S., Moreira, D.M., Matos, A., 2020. ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE SECAS E CHEIAS NA FRONTEIRA OESTE DO BRASIL, in:

- Hídricos, A.B. de R. (Org.), Encontro Nacional de Desastres. p. 1–4.
- Senay, G.B., Bohms, S., Singh, R.K., Gowda, P.H., Velpuri, N.M., Alemu, H., Verdin, J.P., 2013. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *J. Am. Water Resour. Assoc.* <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>
- Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P., Melesse, A.M., 2007. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s7060979>
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Foufoula-Georgiou, E., 1993. Frequency analysis of extreme events. *Hydrol. Handb.* <https://doi.org/10.1061/9780784401385>
- Zhu, Y., Zhou, X., Li, W., Hou, D., Melhauser, C., Sinsky, E., Peña, M., Fu, B., Guan, H., Kolczynski, W., Wobus, R., Tallapragada, V., 2018. Toward the Improvement of Subseasonal Prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 6732–6745. <https://doi.org/10.1029/2018JD028506>