

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **GERAÇÃO DE CENÁRIOS SINTÉTICOS DE VAZÃO COM O MODELO GHCEN APLICADO À SECA DE 2024 NO RIO MADEIRA**

*Felipe Treistman<sup>1</sup>; Rafael Barros de Castro Pereira Pinto<sup>2</sup> & William Cossich Marcial de Farias<sup>3</sup>*

**Abstract** – The 2024 drought in the Madeira River posed unprecedented challenges to the operation of the Jirau and Santo Antônio hydropower plants. This work presents the stochastic generation of streamflow scenarios that supported ONS's planning to face the drought. For this purpose, the Hybrid Generator of Synthetic Inflow Scenarios – GHCen was used, which combines a stochastic methodology for precipitation scenario generation with the conceptual rainfall-runoff model SMAP/ONS. Given the low reliability of the observed precipitation series for the region, a historical series optimization procedure was carried out. Additionally, a climatological analysis was conducted, indicating greater similarity with the years 2010 and 2016, which served as the basis for scenario generation. The evaluation indicators considered: (i) probability of violating the minimum flow requirements for power generation at the Santo Antônio (2,650 m<sup>3</sup>/s) and Jirau (2,500 m<sup>3</sup>/s) HPPs; (ii) expected duration of the dry event; (iii) likely start and return dates of the critical flow period; and (iv) severity, measured by the lowest projected daily flow. The model was able to indicate, two months in advance, a high probability of breaching the reference flows, as well as to anticipate the likely duration of this extreme event. It is concluded that the proposed approach provides a robust tool for decision support in extreme drought events. The generation of streamflow scenarios proved to be a crucial tool for planning, enabling more accurate monitoring of the hydrological conditions in the Madeira River basin and the implementation of preventive measures.

**Resumo** – A seca de 2024 no rio Madeira impôs desafios inéditos à operação das usinas hidrelétricas Jirau e Santo Antônio. Este trabalho apresenta a geração estocástica de cenários de vazões que subsidiou o planejamento do ONS para enfrentamento desse evento. Para tal, foi utilizado o Gerador Híbrido de Cenários Sintéticos de Afluências – GHCen, que combina uma metodologia estocástica para geração de cenários de precipitação, acoplado com o modelo conceitual chuva-vazão SMAP/ONS. Dada a baixa confiabilidade da série de precipitação observada para a região, foi realizado um procedimento de otimização da série histórica. Adicionalmente, foi realizada uma análise climatológica, que indicou uma maior semelhança com os anos de 2010 e 2016, servindo como base para a geração de cenários. Os indicadores de avaliação consideraram: (i) probabilidade de violação dos requisitos mínimos de vazão para geração das UHEs Santo Antônio (2.650 m<sup>3</sup>/s) e Jirau (2.500 m<sup>3</sup>/s); (ii) duração esperada do evento; (iii) data provável de início e retorno do período de vazões críticas; e (iv) severidade, medida pelo menor valor diário projetado. O modelo foi capaz de indicar com dois meses de antecedência grande probabilidade de violação das vazões de referência, além de indicar antecipadamente a provável duração desse evento extremo. Conclui-se que a abordagem proposta fornece ferramenta robusta para apoio à decisão em eventos extremos de estiagem. A geração de cenários de vazões provou ser uma ferramenta crucial para o planejamento,

1) Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, rua Júlio do Carmo, 251 – Centro, Rio de Janeiro – RJ. <felipe.treistman@ons.org.br>

2) Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, rua Júlio do Carmo, 251 – Centro, Rio de Janeiro – RJ. <rafael.pinto@ons.org.br>

3) Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, rua Júlio do Carmo, 251 – Centro, Rio de Janeiro – RJ. <william.farias@ons.org.br>

permitindo monitorar com maior precisão as condições hídricas da bacia do rio Madeira, de modo a planejar e implementar ações preventivas.

**Palavras-Chave** – Cenários estocásticos; Escassez hídrica

## INTRODUÇÃO

O rio Madeira, com comportamento hidrológico sazonal marcante, apresenta vazões máximas nos meses de março e abril, enquanto as vazões mínimas ocorrem nos meses de setembro e outubro. Como não possui reservatórios com capacidade para regularização, a geração hidroelétrica em duas das principais hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional – SIN, as UHEs Jirau e Santo Antônio, segue essa sazonalidade, resultando em níveis mínimos de geração justamente no período de máxima demanda nos estados do Acre e Rondônia. Portanto, entre agosto e outubro, o sistema AC/RO opera frequentemente em cenários de importação de energia a partir do Mato Grosso.

Adicionalmente, para vazões extremamente baixas, pode haver o desligamento das unidades geradoras da UHE Santo Antônio, como ocorrido em 2023, ocasião em que foi registrada uma condição crítica de baixas vazões afluentes. Tal condição levou ao desligamento total da UHE Santo Antônio na primeira quinzena de outubro, gerando risco de atendimento ao sistema Acre/Rondônia (AC/RO), já que a geração interna desse sistema, combinada com a importação máxima permitida do SIN, poderia não ser suficiente para atender plenamente à carga do AC/RO. Essa condição exigiu que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) adotasse medidas operativas excepcionais, de modo a permitir o pleno atendimento à carga em determinados períodos do dia.

Em 2024, com a experiência acumulada de 2023 e diante de nova estiagem severa que vinha se anuncianto, foram realizados pelo ONS diversos estudos elétricos, energéticos e hidráulico-hidrológicos, de modo a subsidiar a adoção de novas medidas operativas, cujo objetivo foi aumentar a resiliência e a confiabilidade do atendimento ao sistema AC/RO durante a estiagem de 2024. Para esse fim, foi necessário prospectar a possibilidade de ocorrência de vazões naturais consideradas extremamente críticas, em patamares inferiores aos indicados como requisitos hidráulicos mínimos para as condições operativas nas UHEs Jirau e Santo Antônio. Face à complexidade do problema, foi considerado que seria mais adequado buscar uma abordagem de geração de cenários de vazões, estocástica, de modo a verificar a possibilidade de ocorrência dos diversos limiares de baixas vazões. O uso de cenários sintéticos para avaliação de secas é uma metodologia empregada com sucesso em diferentes contextos na literatura científica (Borgomeo, et al., 2015; Herman et al., 2016; Salas, et al. 2005)

## OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo apresentar os estudos realizados que subsidiaram o planejamento do ONS para enfrentamento da estiagem severa que acometeu o rio Madeira no ano de 2024, com foco na solução para a representação da incerteza hidrológica, através da geração de cenários sintéticos de vazões diárias.

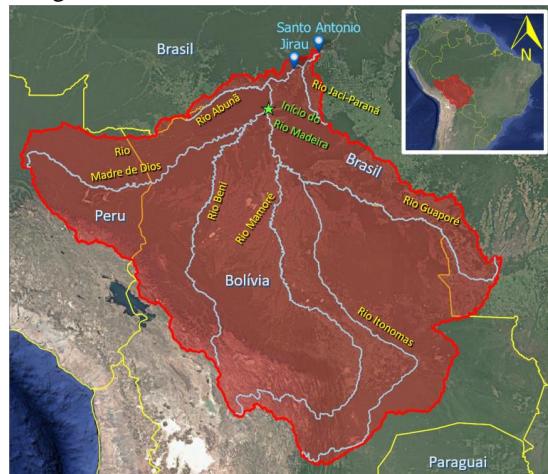
## METODOLOGIA

### Caracterização geral da bacia do rio Madeira

O rio Madeira é um dos principais rios do Brasil e o mais longo e importante afluente do rio Amazonas, recebendo esse nome após a confluência dos rios Beni e Mamoré. Possui dois aproveitamentos hidroelétricos importantes: UHE Jirau e UHE Santo Antônio, com potências instaladas de 3.750 MW e 3.568 MW, respectivamente, e nenhuma possui reservatório com capacidade significativa de regularização, o que faz com que operem em regime a fio d'água. No

trecho de interesse ao SIN, a montante da UHE Santo Antônio, a bacia possui cerca de 989.000 km<sup>2</sup> de área de drenagem, o que faz com que seja a maior bacia hidrográfica do SIN, cuja maior parte se situa em território internacional, com cerca de 12% da área em território Peruano, 72% da área em território Boliviano e apenas 16% em território brasileiro. Possui 6 afluentes que se destacam nesse trecho: rio Abunã, rio Madre de Dios, rio Beni, rio Mamoré, rio Guaporé e rio Itonomas. A Figura 1, a seguir, ilustra o mapa da bacia no trecho a montante da UHE Santo Antônio.

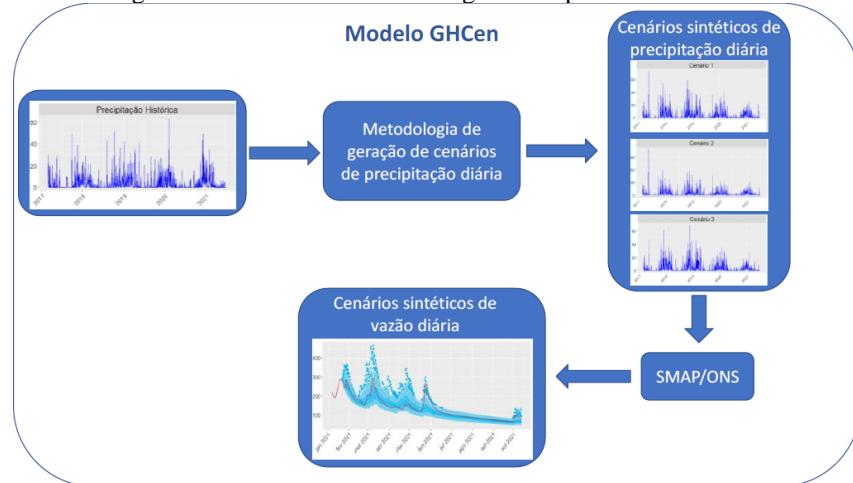
Figura 1 – Bacia hidrográfica do rio Madeira, trecho a montante da UHE Santo Antônio



### Metodologia de geração de cenários de vazões

Para a geração de cenários sintéticos de vazões, o presente estudo utilizou o modelo Gerador Híbrido de Cenários Sintéticos de Afluência – GHCen (Treistman *et al.*, 2023a 2023b). O modelo GHCen combina a modelagem conceitual chuva-vazão do modelo SMAP/ONS (ONS, 2024, Treistman *et al.*, 2023c) com uma metodologia estocástica para a simulação de cenários sintéticos de precipitação diária, conforme ilustrado na Figura 2, a seguir.

Figura 2 – Modelo GHCen – Diagrama esquemático



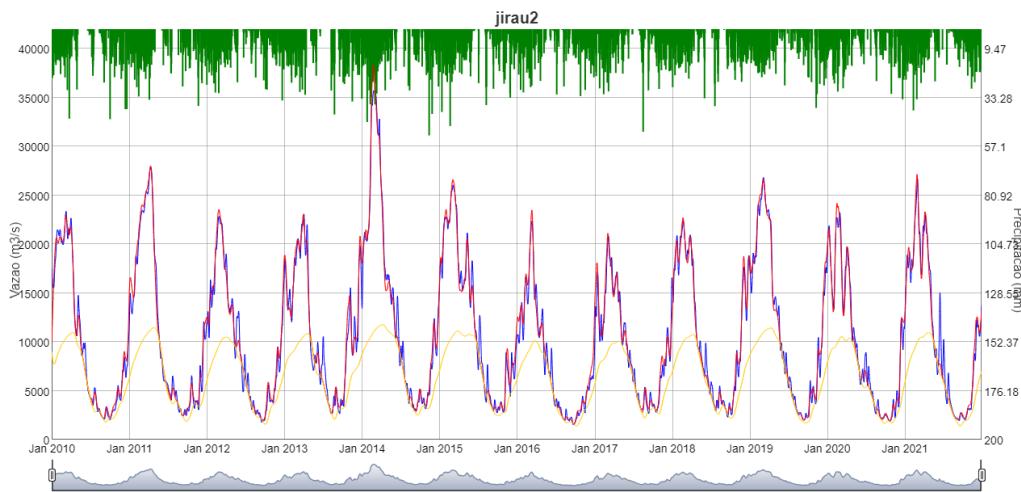
### Processo de otimização da precipitação histórica

A série histórica de precipitação diária é o principal insumo para o modelo GHCen. Tais dados foram obtidos do MERGE (Rozante *et al.*, 2020), um produto que combina dados de precipitação estimada por satélite com dados pluviométricos de superfície, resultando em uma precipitação diária, regularmente espaçada, com resolução horizontal de aproximadamente 10 km.

A disponibilidade de postos pluviométricos na bacia do rio Madeira, em geral, é pequena, não excedendo a 3 postos por ponto de grade. Assim, a precipitação estimada por satélite se torna a principal fonte para obtenção da chuva diária na bacia. Sabe-se, no entanto, que a estimativa de precipitação por satélite apresenta vieses para região amazônica, tendendo a subestimar (superestimar) taxas de chuva fraca durante o período seco (úmido) (Oliveira et al., 2018). Desta forma, buscou-se um processo de “otimização” da precipitação diária, a fim de se obter uma melhor geração de cenários do modelo GHcen. Esse processo de “otimização” partiu do princípio no qual se acredita que as calibrações disponíveis do modelo hidrológico SMAP/ONS são a melhor representação possível para cada sub-bacia, assim como a série histórica de vazão não possui imprecisões. Sendo assim, através da “otimização” da série histórica de precipitação, buscou-se minimizar os erros da simulação obtida com o modelo SMAP/ONS, ano a ano.

A otimização elaborada resulta em uma série de precipitação chamada “chuva calibrada”, que reproduz o mais próximo possível a série histórica de vazão de cada sub-bacia, dado um modelo SMAP/ONS previamente calibrado. É importante ressaltar que, dessa maneira, todos os tipos de incerteza, tanto da série histórica de precipitação e de vazão, quanto a incerteza dos próprios parâmetros do modelo SMAP/ONS, ficam considerados implicitamente na chuva calibrada. A Figura 3, a seguir, ilustra os resultados obtidos para a Incremental Jirau, de 2010 ao final de 2021. Destaca-se a grande aderência das vazões calculadas pelo modelo (curva vermelha) às vazões naturais observadas (curva azul).

Figura 3 – Simulação do SMAP/ONS para a incremental da UHE Jirau obtidos com a chuva calibrada (linha vermelha) em comparação com a vazão observada (linha azul)



## RESULTADOS

Para o acompanhamento da situação hidrológica, foi realizado um acompanhamento diário das condições de vazões naturais aos aproveitamentos das UHEs Jirau e Santo Antônio, bem como foi realizado diariamente uma geração de cenários de vazões para esses aproveitamentos, com o objetivo de identificar, com a maior antecedência possível, a possibilidade de violação dos requisitos hidráulicos mínimos, bem como a partir de que momento a violação poderia ocorrer. A presente seção apresenta os resultados desse acompanhamento, dando destaque para alguns momentos chave desse processo.

Destaca-se que, para geração de cenários de precipitação, foram considerados somente os anos que apresentavam semelhanças climáticas com o ano de 2024. A seleção destes anos considerou a atuação do fenômeno El Niño – Oscilação Sul, onde, em 2024 havia a previsão de transição de um El

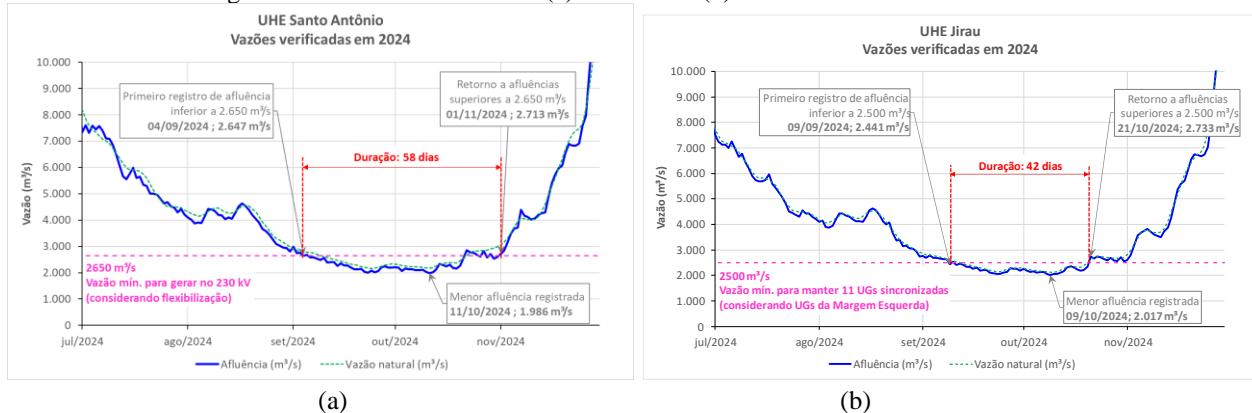
Niño para La Niña. Adicionalmente, foram analisadas as condições de anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico, em especial, nas regiões do Atlântico Norte Tropical (TNA), do Atlântico Sul Tropical (TSA) e do Atlântico Sul Subtropical (STSA), dado que estas regiões podem influenciar a precipitação em toda bacia amazônica, inclusive na bacia do rio Madeira (López, 2020). Com período de precipitação disponível (2010 – 2023), foram selecionados os anos de 2016 e 2010 como aqueles com maior semelhança climática ao que era previsto acontecer no segundo semestre de 2024, por isso, estes foram os anos escolhidos para servir como base para a geração de cenários com o modelo GHcen.

Antes de apresentar os resultados e as análises da geração de cenários de vazões para as UHEs Santo Antônio e Jirau, será apresentada uma análise do que foi verificado em 2024. Embora em 2023 tenha havido a paralisação da geração da UHE Santo Antônio quando as afluências passaram a registrar valores próximos a 3.100 m<sup>3</sup>/s, em 2024 foram realizadas estimativas, tanto pelo ONS, quanto pelo Agente, de que a geração no 230 kV conseguiria ser sustentada enquanto as afluências estivessem superiores a 2.650 m<sup>3</sup>/s, quando, aí sim, devido ao atingimento de limites operacionais flexibilizados das UGs (queda bruta máxima – 26,4 m – e nível de jusante mínimo – 44,0 m), teria de ser interrompida a geração.

A Figura 4 (a) apresenta as vazões verificadas na UHE Santo Antônio entre julho e novembro de 2024. Observa-se que em 04/09/2024 foi registrada pela primeira vez uma afluência inferior a 2.650 m<sup>3</sup>/s, e as vazões persistiram abaixo desse valor por 58 dias não consecutivos. Apesar de, no final de outubro, ter ocorrido uma elevação das vazões acima dessa referência, o retorno definitivo das vazões só ocorreu a partir de 01/11/2024. Nesse período, observa-se também o atingimento do valor mínimo de afluência de 1.986 m<sup>3</sup>/s, um recorde negativo desde que a usina iniciou a operação em 2012. Destaca-se também a vazão natural, que também registrou um mínimo histórico (1968-2023), de 2.170 m<sup>3</sup>/s em 22/09/2024.

A Figura 4 (b) apresenta as vazões verificadas na UHE Jirau entre julho e novembro de 2024. Observa-se que em 09/09/2024 foi registrada pela primeira vez uma afluência inferior a 2.500 m<sup>3</sup>/s, que foi o requisito hidráulico mínimo estimado para sincronizar 11 Unidades Geradoras (na margem esquerda), e as vazões persistiram abaixo desse valor por 42 dias não consecutivos. Apesar de o retorno definitivo ter ocorrido a partir de 21/10/2024, nota-se que as afluências persistiram muito próximas desse valor, com risco de voltarem a ficar abaixo. Somente a partir de 01/11/2024 se observa uma retomada da ascensão das vazões. Observa-se também o atingimento do valor mínimo de afluência de 2.017 m<sup>3</sup>/s em 09/10/2024, um recorde negativo desde que a usina iniciou a operação em 2013. Destaca-se também a vazão natural, que também registrou um mínimo histórico (1968-2022), de 2.126 m<sup>3</sup>/s em 10/10/2024.

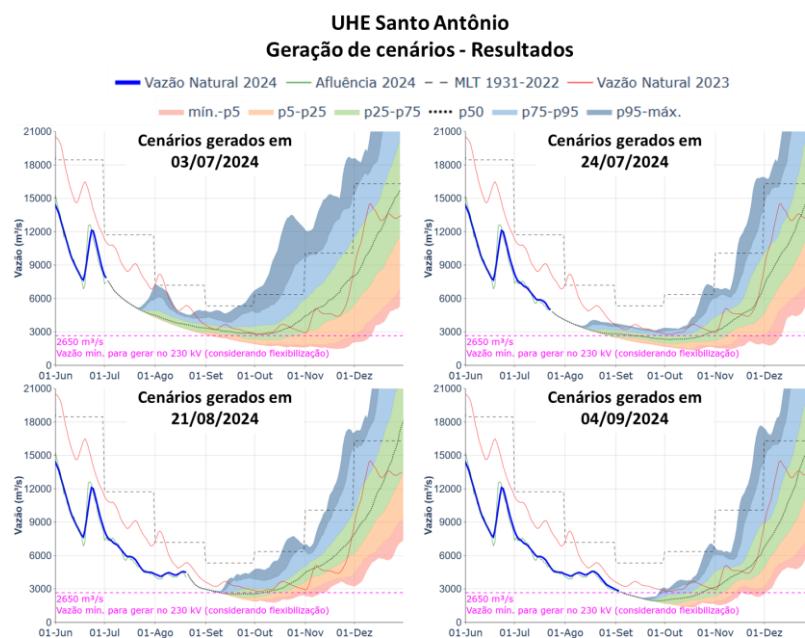
Figura 4 – UHE Santo Antônio (a) UHE Jirau (b) – Vazões verificadas em 2024



A geração de cenários e o acompanhamento da evolução das vazões naturais do rio Madeira durante a recessão de 2024 teve início em julho/2024, considerando um horizonte de 6 meses à frente. A Figura 5 a seguir apresenta quatro resultados representativos das gerações de cenários realizadas para a UHE Santo Antônio, quando se prospectava a possibilidade de as vazões afluentes ficarem menores que o requisito de vazão mínima para sustentar a geração no 230 kV ( $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Para cada ano base selecionado por semelhança climática (2010 e 2016), foram gerados 200 cenários sintéticos, totalizando 400 cenários sintéticos ao todo.

A curva azul representa a vazão natural observada até o dia anterior à data de execução e as áreas hachuradas (vermelho, laranja, verde e azul) representam os percentis dos cenários de vazões afluentes gerados (já descontando os usos consuntivos e a evaporação líquida do reservatório), para cada data do horizonte. São apresentadas também, como referência, o patamar referente à vazão de  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$  (em magenta), bem como as curvas referentes às vazões naturais observadas no ano anterior (2023) e às médias históricas (MLT 1931-2022), evidenciando a criticidade das vazões.

Figura 5 – UHE Santo Antônio – Geração de cenários – resultados



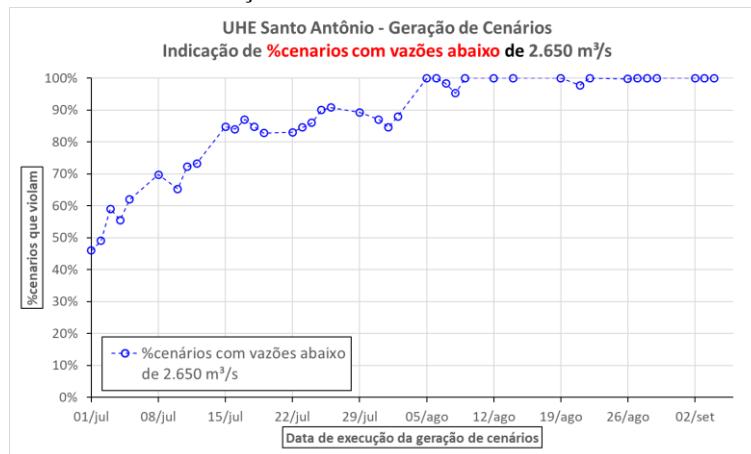
De modo a avaliar a adequação das distribuições preditivas geradas frente às vazões observadas, serão apresentadas algumas medidas que buscam descrever os seguintes aspectos:

- a probabilidade de ocorrer vazões afluentes inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$  em algum momento;
- quando poderia começar a ocorrer vazões inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- a duração e quando poderia retornar a um patamar superior a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ ; e
- a severidade, ou seja, o quanto baixas as vazões poderiam ser.

A Figura 6 traz as informações sobre a probabilidade de ocorrer vazões inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nela é apresentada, para cada geração de cenários realizada, o percentual de cenários que violaram a vazão de  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$  pelo menos uma vez. Nota-se que, desde a primeira geração de cenários, no início de julho, com dois meses de antecedência, já havia uma indicação significativa de violação, com 46% dos cenários gerados registrando afluências inferiores à vazão de referência. Esse percentual aumentou gradativamente nas gerações de cenários seguintes, demonstrando consistência e qualidade

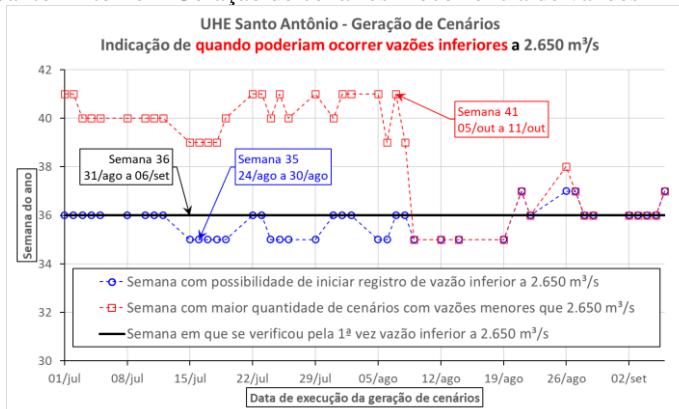
preditiva, e começou a sinalizar, a partir do início de agosto (um mês de antecedência), que 100% dos cenários atingiam vazões inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$  em algum momento.

Figura 6 – UHE Santo Antônio – Geração de cenários – % de cenários com vazões abaixo de  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$



A próxima análise (Figura 7) apresenta evolução similar, mas desta vez com a indicação de em qual semana do ano a violação poderia começar a ocorrer. A primeira curva (azul) corresponde à indicação de a partir de qual momento poderia ocorrer violação e a segunda curva (vermelha) corresponde à indicação do momento em que havia a maior quantidade de cenários concomitantes violando a restrição de  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ . Novamente, observa-se a qualidade da geração de cenários, pois, desde a primeira geração de cenários realizada no início de julho (com 2 meses de antecedência), já havia a sinalização (com menor probabilidade) de que a violação poderia começar a ocorrer a partir da semana 36, semana essa na qual, de fato, foi verificada pela primeira vez a ocorrência de valores inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ . A maior probabilidade de ocorrência estava sendo indicada para em torno da semana 40 (entre final de setembro e início de outubro). Após o dia 8 de agosto, o modelo já indicava com a maior parte dos cenários gerados a possibilidade de se verificar vazões inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$  entre as semanas 35 e 37.

Figura 7 – UHE Santo Antônio – Geração de cenários – ocorrência de vazões inferiores a  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$



A Figura 8 (a) traz informações sobre a duração da violação da vazão de  $2.650 \text{ m}^3/\text{s}$ . A curva representa a quantidade estimada em dias e foi calculada, a cada geração de cenários, considerando somente os cenários que violavam a vazão de referência. Nota-se que, inicialmente, no início de julho, estimou-se que a violação, caso ocorresse, duraria pouco mais de um mês (50% das vezes (a duração real foi de 58 dias)). Entretanto, as condições hidrológicas evoluíram e a geração de cenários ficou

mais assertiva também sobre esse aspecto, de modo que, já na segunda semana de julho, indicava uma duração próxima de 58 dias, com variações pontuais.

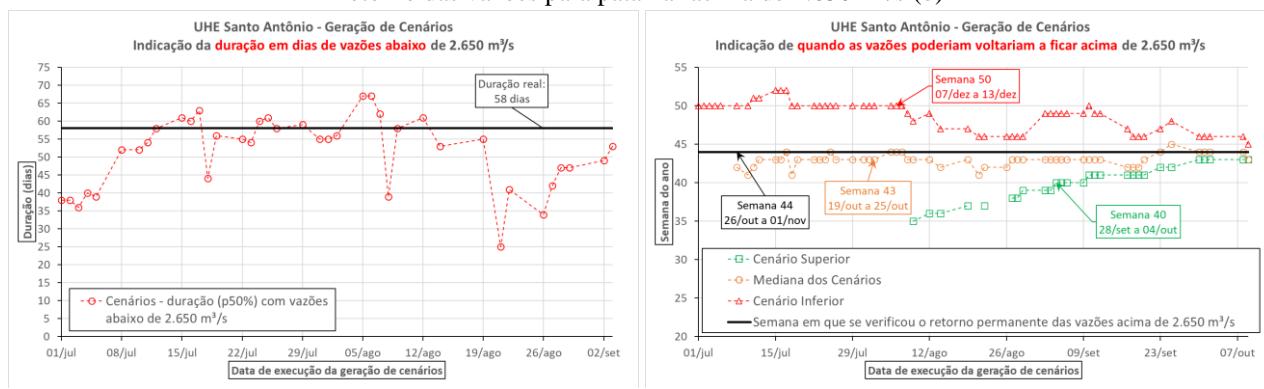
A partir de 21/08/2024 se percebe uma mudança nas indicações, com redução na duração do evento. Em uma análise mais detalhada do momento, atribui-se essa mudança à ocorrência de um “repiquete” (uma rápida elevação seguida por rápida queda da vazão afluente) nas vazões do trecho de Amaru-Mayu, que modificou as condições de partida da geração de cenários. Essa modificação foi notadamente difícil de capturar para dar partida às gerações de cenários subsequentes, considerando que, na época, não havia uma calibração individual do modelo SMAP/ONS para trecho de Amaru-Mayu. Todo o trecho estava implicitamente contido na Incremental de Jirau, uma área que somada possui cerca de 345.000 km<sup>2</sup> com quase nenhum monitoramento hidrometeorológico. A ocorrência desse momento, assim como outros momentos, deixa evidente a importância de se contar com uma modelagem chuva-vazão específica para o trecho de Amaru-Mayu.

Apesar disso, com o passar das rodadas subsequentes e com a evolução das condições hidrológicas, no início de setembro (às vésperas de se verificar vazões abaixo de 2.650 m<sup>3</sup>/s), a geração de cenários voltou a sinalizar, com boa precisão, que a duração do evento seria próxima de dois meses

Já a Figura 8 (b) resume informação análoga, mas sob a ótica da data de retorno das vazões para acima do patamar de 2.650 m<sup>3</sup>/s, onde são apresentadas três curvas. A curva superior (vermelho) é relativa ao cenário inferior, a curva do meio (laranja) é relativa à mediana dos cenários e a curva inferior (verde) é relativa ao cenário superior. O cenário inferior começou indicando, na maior parte das vezes, que o retorno ocorreria por volta da semana 50 (entre 07/12/2024 e 13/12/2024). O cenário superior inicialmente não possui pontos, devido ao fato de que havia cenários que não violavam a vazão de referência. A partir do início de agosto, passou a haver indicação do cenário superior, inicialmente indicando rápido retorno (semana 35) a vazões acima de 2.650 m<sup>3</sup>/s (ou seja, ocorrência de cenário(s) que estavam praticamente tangenciando a vazão de restrição).

Nota-se que a mediana dos cenários com relação ao final do período de violações da vazão de referência indicou com precisão, na maioria das vezes, retorno na semana 43 (entre 19/10/2024 e 25/10/2024), quando o retorno ocorreu, de fato, em 01/11/2024, uma diferença de uma semana apenas. Por fim, observa-se as três curvas convergem para ficarem próximas à semana 44 e, no início de outubro, já havia sinalização consistente de que levaria mais um mês para as vazões retornarem a um patamar acima de 2.650 m<sup>3</sup>/s.

Figura 8 – UHE Santo Antônio – Geração de cenários – duração da violação do requisito hidráulico de 2.650 m<sup>3</sup>/s (a) retorno das vazões para patamar acima de 2.650 m<sup>3</sup>/s (b)

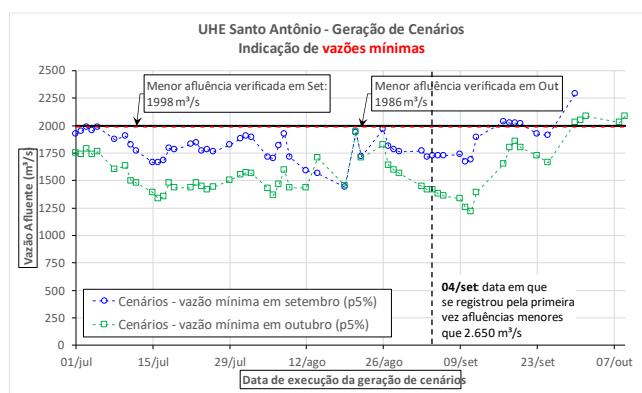


(a) (b)  
A última análise (Figura 9) apresenta informações sobre o quanto severa poderia ser a seca, com foco nos valores mínimos indicados pelas gerações de cenários. São apresentadas duas curvas, uma

representa a evolução do percentil 5% (p5%) para o mês de setembro (curva verde) e outra representa o p5% para o mês de outubro (curva azul).

A geração de cenários indicou correta e consistentemente que o mês de outubro registraria as menores vazões, visto que a menor afluência verificada foi, de fato, em outubro. Nas primeiras gerações de cenários realizadas (início de julho), o p5% indicou vazões entre 1.900 e 2.000 m<sup>3</sup>/s. Considerando que a menor afluência verificada em setembro foi de 1.998 m<sup>3</sup>/s, houve uma excelente precisão nesse momento. Entretanto, à medida que as condições hidrológicas evoluíram, ao longo de julho, agosto e início de setembro, os cenários passaram a enxergar a possibilidade de uma seca mais severa, indicando com frequência a possibilidade de ocorrer vazões em torno de 1.800 m<sup>3</sup>/s. Analogamente, para o mês de outubro, os cenários enxergaram a possibilidade de ocorrer vazões mais baixas, da ordem de 1.500 m<sup>3</sup>/s ou inferiores, em alguns casos. Já quando a execução da geração de cenários se aproxima de meados de setembro, a indicação das vazões mínimas se torna mais assertiva.

Figura 9 – UHE Santo Antônio – Geração de cenários – vazões mínimas



Embora se trate de uma geração de cenários, as vazões mínimas indicadas pelos cenários gerados durante boa parte do trabalho chamam atenção, pois se trata de vazões extremamente baixas, mesmo para um ano tão seco quanto o ano de 2024. Uma análise mais detalhada levantou a hipótese, mais uma vez, de que um fator que possa ter contribuído significativamente para esses resultados foi a não representação individual do trecho de Amaru-Mayu no modelo SMAP/ONS. Embora na época da realização do estudo não se contasse com tal calibração, atualmente, o ONS já realizou oficialmente a recalibração completa das sub-bacias do rio Madeira, inclusive para o trecho de Amaru-Mayu.

## CONCLUSÕES

A geração de cenários de vazões, utilizando o modelo GHcen, provou ser uma ferramenta crucial para o planejamento, permitindo monitorar com maior precisão as condições hídricas da bacia do rio Madeira, de modo a planejar e implementar ações preventivas. Apesar de não ter sido apresentado a comparação da geração de cenários sem a seleção de anos por semelhança climática, o uso dessa metodologia mostrou-se relevante para que os resultados tivessem a qualidade demonstrada. Além disso, o monitoramento contínuo das vazões, o apoio dos Agentes de geração, aliado a medidas operativas excepcionais, como a migração da geração para a margem direita das UHEs Santo Antônio e Jirau e a flexibilização dos limites operacionais das usinas, foram fundamentais para mitigar os impactos da estiagem severa.

No entanto, o estudo também evidenciou a necessidade de aperfeiçoar a modelagem hidrológica na região, principalmente no que tange à calibração individualizada de sub-bacias como Amaru-Mayu, cuja resposta hidrológica é determinante para a previsibilidade de vazões, em todas as épocas do ano. Ressalta-se que a partir de outubro de 2024, através da incorporação de novos dados

hidrometeorológicos foi possível fazer a recalibração dessa sub-bacia. Recomenda-se, portanto, que o desenvolvimento de aprimoramentos dos modelos hidrológicos seja mantido. O aprendizado sobre as secas de 2023 e 2024 na bacia do rio Madeira demonstra que a resiliência do sistema depende não só de ajustes operacionais, mas também de um planejamento hidrológico robusto que possa prover informações relevantes e fundamentais, de modo a mitigar os riscos de futuros eventos extremos.

## REFERÊNCIAS

- BORGOMEO, E., FARMER, C. L., & HALL, J. W. (2015). Numerical rivers: A synthetic streamflow generator for water resources vulnerability assessments. *Water Resources Research*, 51(7), 5382-5405.
- HERMAN, J. D., ZEFF, H. B., LAMONTAGNE, J. R., REED, P. M., & CHARACKLIS, G. W. (2016). Synthetic drought scenario generation to support bottom-up water supply vulnerability assessments. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(11), 04016050.
- López, K. L. C. (2020). *Interannual variability of Tropical Atlantic and its influence on extreme precipitation events: Focus on the Amazon Basin*. Universidade de São Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). DOI: 10.11606/d.14.2020.tde-27072020-135440
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2024). Manual de Metodologia - Modelo SMAP/ONS.
- Oliveira, R., Maggioni, V., Vila, D., Porcacchia, L., (2018). “Using Satellite Error Modeling to Improve GPM-Level 3 Rainfall Estimates over the Central Amazon Region”. *Remote Sensing*, 10(2), 336. DOI: 10.3390/rs10020336
- Rozante, J.R., Gutierrez, E.R., Fernandes, A.A., Vila, D.V., (2020) “Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations”, *International Journal of Remote Sensing*, 41:19, 7585-7604, DOI: 10.1080/01431161.2020.1763504
- SALAS, J. D., FU, C., CANCELLIERE, A., DUSTIN, D., BODE, D., PINEDA, A., & VINCENT, E. (2005). Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(5), 383-393.
- TREISTMAN, F., PENNA, D. D. J., KHENAYFIS, L. D. S., CAVALCANTE, N. B. R., SOUZA FILHO, F. D. A. D., ROCHA, R. V., ... & BESSA, M. R. (2023a). *A framework to evaluate and compare synthetic streamflow scenario generation models*. RBRH, 28, e43.
- TREISTMAN, F., KHENAYFIS, L. D. S., & PENNA, D. D. J. (2023b). *GHCen: a stochastic-conceptual approach for generating synthetic streamflow scenarios*. RBRH, 28, e47.
- TREISTMAN, F., MACIEL, A. BRAGA, R. G. S., BARROS, A. M. DE L., TORRACA, H. B. B., CAMARGO, H. J., (2023c) “Análise do desempenho do modelo SMAP/ONS para a previsão de vazões no 1º mês operativo do programa mensal da operação energética utilizando previsões estendidas do modelo ECMWF” Anais XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, Nov. 2023.