

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### Potenciais da previsão sazonal de vazões no Brasil

Ingrid Petry<sup>1</sup>; Fernando Fan<sup>2</sup>; Vinicius Siqueira<sup>3</sup>; Rodrigo Paiva<sup>4</sup>; Walter Collischonn<sup>5</sup>; Cássia Aver<sup>6</sup> & Camila Freitas<sup>7</sup>

**Abstract:** The growing demand for water in society has motivated efforts to predict the availability of water resources in the long term. While seasonal climate forecasts are regularly issued by meteorological centers worldwide, the development of seasonal streamflow forecasts is still in its early stages. To address this, Hydrological Ensemble Prediction Systems (H-EPS) rely on the combination of meteorological forecasts and hydrological models, and are considered the state-of-the-art in streamflow forecasting. This study represents an assessment of seasonal streamflow forecasts in Brazil, employing a continental-scale application of a hydrologic-hydrodynamic model and ECMWF's seasonal forecasting system precipitation forecasts with bias correction (SEAS5-SF). The evaluation of seasonal streamflow forecasts was conducted in comparison to observed streamflow from hydropower plants of the *Sistema Interligado Nacional*. The performance of SEAS5-SF is season, basin and forecast dependent, with superior results in the first lead time. The general performance of the seasonal forecasts is superior in the hydropower plants of the Southeast region. These results suggest that seasonal forecasts based on hydrological and climate modeling hold promise for water resources planning, particularly for the large rivers in South America.

**Key-words** – Seasonal streamflow forecast; SIN

**Resumo:** A demanda constante da sociedade por água tem gerado esforços no sentido de prever a disponibilidade de recursos hídricos a longo prazo. Embora as previsões climáticas sazonais sejam rotineiramente emitidas em centros meteorológicos em todo o mundo, as previsões sazonais de vazão estão em um estágio relativamente inicial de desenvolvimento. Sistemas de Previsão Hidrológica por Conjunto (H-EPS), que contam com a combinação de previsão meteorológica e modelos hidrológicos, são considerados o estado da arte na previsão de vazões. Este trabalho representa uma avaliação das previsões de vazões sazonais no Brasil, como foco nas usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional, com base em uma escala aplicação continental de um modelo hidrológico-hidrodinâmico de grande escala e previsões de precipitação do ECMWF (SEAS5) com correção de viés (SEAS5-SF). As previsões de vazão foram avaliadas em relação a dados observados. O desempenho do SEAS5-SF apresentou-se dependente da estação do ano, bacia e antecedência, com resultados superiores no primeiro mês de previsão. O desempenho geral das previsões sazonais é superior nas usinas da região Sudeste. Os resultados sugerem que a sazonalidade previsões baseadas em modelos hidrológicos e climáticos têm potencial para planejamento de recursos em grandes rios do Brasil.

**Palavras-Chave** – Previsões sazonais de vazão; SIN

1) IPH/UFRGS: [ingrid.petry@ufrgs.br](mailto:ingrid.petry@ufrgs.br).

2) IPH/UFRGS: [fernando.fan@ufrgs.br](mailto:fernando.fan@ufrgs.br)

3) [vinisiquera@gmail.com](mailto:vinisiquera@gmail.com)

4) IPH/UFRGS: [rodrigo.paiva@ufrgs.br](mailto:rodrigo.paiva@ufrgs.br)

5) IPH/UFRGS: [collischonn@iph.ufrgs.br](mailto:collischonn@iph.ufrgs.br)

6) COPEL: [cassia.aver@copel.com](mailto:cassia.aver@copel.com)

7) COPEL: [camila.freitas@copel.com](mailto:camila.freitas@copel.com)

## INTRODUÇÃO

Previsões sazonais de vazão dos rios (SSF) fornecem estimativas das vazões dos rios com antecedência de 6 a 9 meses. Essas informações são especialmente importantes no planejamento hidrológico de longo prazo dos recursos hídricos. Por exemplo, elas podem ser utilizadas para melhorar a eficiência da operação de reservatórios (LEE et al., 2020; PEÑUELA; HUTTON; PIANOSI, 2020), auxiliar na tomada de decisões sobre alocação de água (CHIEW; ZHOU; MCMAHON, 2003; CROCHEMORE et al., 2021; KAUNE et al., 2020), criar estratégias de mitigação de enchentes (KOMPOR; YOSHIKAWA; KANAE, 2020; PAIVA et al., 2013) e servir como ferramenta de gerenciamento de secas (CARRÃO et al., 2018; SUTANTO; WETTERHALL; VAN LANEN, 2020).

Um Sistema de Previsão Hidrológica por Conjunto (H-EPS) é considerado o estado da arte em previsão de vazão dos rios (TROIN et al., 2021). Ele combina modelos hidrológicos com previsões quantitativas de precipitação em conjunto (QPF), resultando em estimativas probabilísticas de vazão futura (CLOKE; PAPPENBERGER, 2009). O SEAS5 (ECMWF) é considerado um sistema de previsão meteorológica sazonal de última geração (JOHNSON et al., 2019) e está entre os melhores modelos capazes de prever fenômenos do tipo ENSO (BARNSTON et al., 2012). A detecção desses fenômenos é de suma importância, não só por terem forte influência sobre o clima (MANZANAS et al., 2014; SHIMIZU; AMBRIZZI; LIEBMANN, 2016), mas por ser a maior fonte de previsibilidade em escalas sazonais na América do Sul (WEISHEIMER et al., 2020). Alguns exemplos de utilização dos dados do SEAS5 na previsão sazonal de vazões são os trabalhos de Pechlivanidis (2020) e Arnal (2018).

Na literatura, podem ser encontrados vários estudos que investigam previsões de vazão mensal a sazonal em escala de bacia (COLLISCHONN et al., 2005; COLLISCHONN; TUCCI, 2005; DE PAIVA; MONTENEGRO; CATALDI, 2020; DELORIT et al., 2017; DEMIREL; BOOIJ; HOEKSTRA, 2015; KOMPOR; YOSHIKAWA; KANAE, 2020; MAHANAMA et al., 2012; PEÑUELA; HUTTON; PIANOSI, 2020; TUCCI et al., 2003; VAN HATEREN; SUTANTO; VAN LANEN, 2019). Esses estudos chegaram a conclusões importantes em nível de bacia. No entanto, em nível continental, geralmente representam informações fragmentadas e não permitem uma avaliação abrangente e comparativa do desempenho das previsões, uma vez que eventos hidrológicos nem sempre têm origem dentro dos limites da bacia (EMERTON et al., 2016) e podem impactar várias bacias e locais (FLEISCHMANN et al., 2020). Portanto, é valioso ter uma abordagem de modelagem de várias bacias para obter uma compreensão profunda das dinâmicas dos processos hidrológicos e avaliar a consistência espacial das previsões (PECHLIVANIDIS; ARHEIMER, 2015). Previsões em escala global ou continental podem contribuir para a compreensão espacial das previsibilidades hidrológicas, ao mesmo tempo em que fornecem informações para regiões onde nenhum outro sistema de previsão existe, devido à sua capacidade de abranger diferentes regiões geográficas e climáticas.

Na América do Sul, Siqueira et al. (2018) desenvolveram uma versão em escala continental do modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB (Modelo de Grandes Bacias), que tem sido aplicado e consolidado em grandes bacias tropicais da América do Sul (BRÊDA et al., 2020, 2023; FAN et al., 2016; PETRY et al., 2022; QUEDI; FAN, 2020; SIQUEIRA et al., 2020).

Diante desse cenário e motivado pelos avanços recentes da modelagem hidrometeorológica continental na América do Sul, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho atual das previsões sazonais de vazão produzidas com a versão em escala continental do MGB (MGB-SA) e as previsões de precipitação do SEAS5. Com o MGB-SA, os resultados foram emitidos para rios em grandes bacias (>5000 km<sup>2</sup>) com passos de tempo diários e foram analisados em intervalos de tempo

mensais. As previsões foram avaliadas comparando com as vazões naturais das usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional.

Este trabalho apresenta parte dos resultados obtidos durante a execução de projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, desenvolvido pela Rhama e Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) para a empresa COPEL Geração e Transmissão S.A., no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de código ANEEL PD-06491-0503/2018 e título "PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA COM ABRANGÊNCIA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA".

## MÉTODOS

As previsões sazonais foram geradas a partir de modelagem hidrológica alimentada por dados de modelos meteorológicos. Foram utilizadas as previsões sazonais por conjunto do modelo ECMWF, da quinta geração do sistema de previsão sazonal - SEAS5. Esse sistema é coordenado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), e os dados são disponibilizados pelo *Copernicus Climate Change Service* (C3S), uma plataforma implementada pelo ECMWF, em nome da Comissão Europeia, com o objetivo de fornecer acesso irrestrito a dados controlados e de qualidade, além de gratuitos (BUONTEMPO; THÉPAUT; BERGERON, 2020).

Foram utilizadas as previsões operacionais (*forecast*), rodadas em tempo real com a última versão do modelo. Apresentam horizonte de 215 dias (aproximadamente 7 meses), com início no primeiro dia de cada mês, resolução espacial de aproximadamente 36 km, temporal de 24 horas (acumulada), 51 membros, com dados de 2017 até hoje (JOHNSON et al., 2019). Foram utilizados os dados de precipitação diária (24 horas) com resolução espacial de 0.5° e 1°.

Para a correção de viés da chuva prevista, foram utilizados os dados de previsão retrospectiva (*hindcast*) de 1981 a 2016, e o período de rodada de previsões hidrológicas será de 2017 a 2020. As previsões retrospectivas são previsões rodadas para datas passadas que podem ser comparadas com o registro histórico (JOHNSON et al., 2019). Essas previsões são criadas com uma versão do sistema mais próxima possível da utilizada no sistema operacional e auxiliam na calibração e estimativa do viés do modelo de previsão (ECMWF, 2017). O método de correção de viés utilizado foi o Quantil-Quantil (BÁRDOSSY; PEGRAM, 2011), que utilizou além dos dados de *hindcast*, os dados de precipitação diária observada do (i) *Multi-Source Weighted Ensemble Precipitation v1.1* (MSWEP) (BECK et al., 2017), até o ano de 2014 e (ii) o *Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM – Global Precipitation Measurement* (GPM IMERG, Versão 06, rodada final) de 2015 a 2020.

A correção de viés da chuva prevista foi realizada com 84 conjuntos de parâmetros. Cada conjunto representa um mês do ano (12) e uma determinada antecedência (7). Dessa forma, a correção de viés foi aplicada considerando que existem erros sistemáticos relacionados tanto à antecedência da previsão, quanto à época do ano de cada minibacia do modelo MGB-AS.

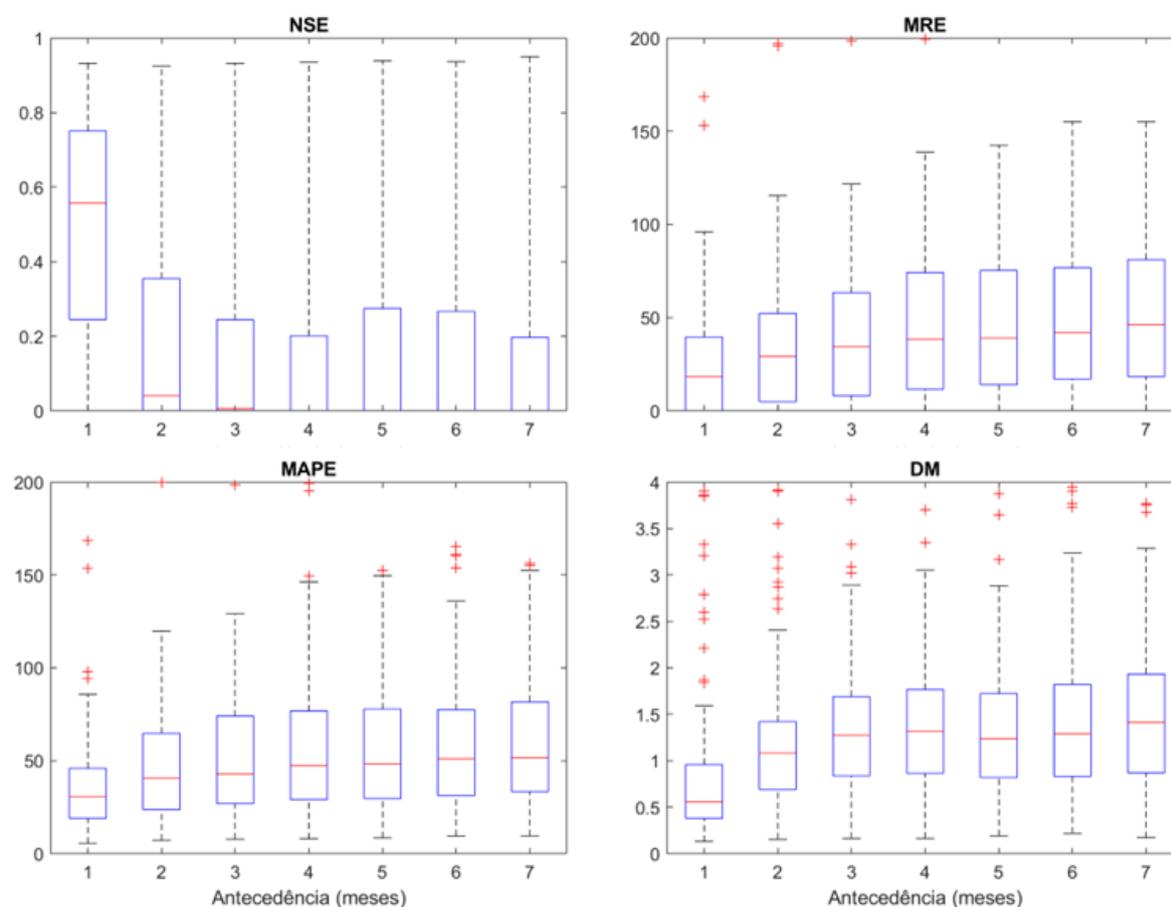
As vazões naturais previstas foram então comparadas com as vazões naturais das usinas hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional. As métricas utilizadas para a verificação da média do conjunto foram Nash Sutcliffe (NSE), Erro Médio Relativo (MRE), Erro Médio Absoluto Percentual (MAPE), e Distância Multicritério (DM). O conjunto foi analisado com a métrica Brier score, para os limiares Q10 e Q95. Os resultados das métricas individuais foram sumarizados em boxplots, que resumem o desempenho geral de todas as UHEs analisadas no projeto. Para geração dos resultados, calculou-se médias mensais a partir das previsões diárias, e o desempenho foi apresentado para a média das antecedências de 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7 meses.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados de análises do desempenho de previsões de vazões para todas as UHEs do SIN.

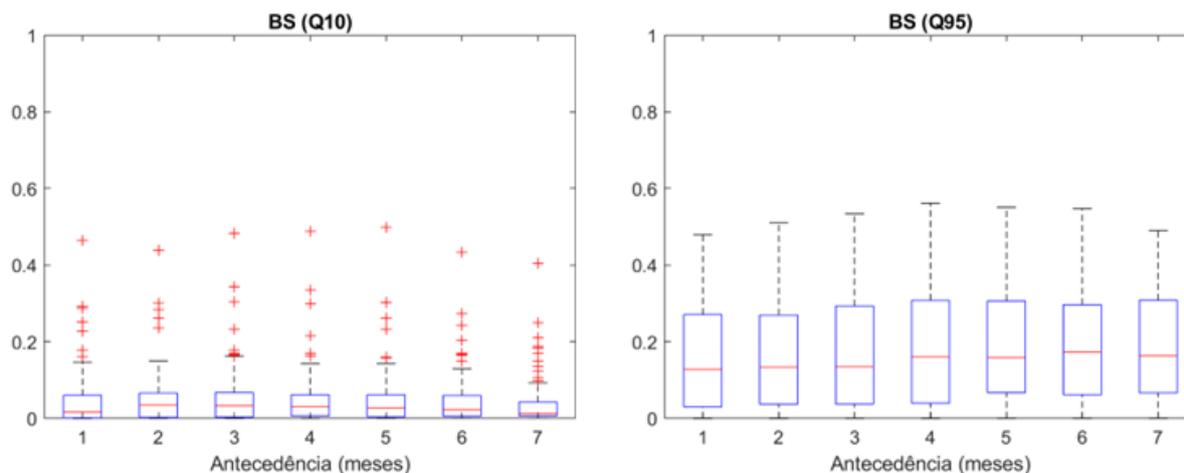
A Figura 1 apresenta o NSE, MRE, MAPE e DM das previsões de vazão por conjunto (média do ensemble). O NSE apresenta os melhores resultados em 1, enquanto os demais indicadores em zero. Na mediana das UHEs, o NSE das previsões apresenta mediana de 0.55 na antecedência de um mês, enquanto para as antecedências mais longas a mediana do NSE foi menor que 0.2. Em geral, as previsões tendem a apresentar um MRE positivo, isto é, com tendência de superestimativa. O MRE possui pequena variação entre as antecedências analisadas, com valores em torno de 20 % para a média das vazões da primeira antecedência e 40 % para os demais horizontes, considerando a mediana das UHEs. 75 % das UHEs tiveram valores abaixo de ~100 % de MRE, indicando que os erros percentuais podem ser bastante expressivos. Em termos medianos o MAPE das previsões atingiu valores de 30 % na primeira antecedência e em torno de 50% nas demais antecedências. Já para o DM, a mediana das UHEs das previsões atingiu 0.5 na primeira antecedência e em torno de 1 nas demais antecedências para a média do conjunto.

Figura 1 – Resultados das previsões de vazão baseadas na chuva prevista do ECMWF com horizonte sazonal, para a métrica NSE, MRE, MAPE e DM



A Figura 2 apresenta os resultados de Brier score das previsões de vazão por conjunto (ensemble) para os limiares de vazões de cheia (Q10) e estiagem (Q95). Os resultados são maximizados em zero. Observa-se que para a maioria das usinas as previsões são melhores em prever as vazões de cheia do que seca, sem variações expressivas com a antecedência.

Figura 2 – Resultados das previsões de vazão baseadas na chuva prevista do ECMWF com horizonte sazonal, para a métrica Brier Score nos limiares Q10 e Q95



A Figura 3 apresentam a distribuição espacial do MAPE para a primeira antecedência. Os melhores valores de MAPE concentram-se na região Sudeste do Brasil para as quatro estações, com demais regiões também apresentando valores próximos de zero. Os piores resultados de MAPE encontram-se no Paraná nas estações JJA e SON, e em Minas Gerais, durante DJF e SON.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial do DM para a primeira antecedência. Os melhores valores de DM também estão concentrados na região Sudeste do Brasil (Paraná nas estações DJF e SON), destoando bastante das demais regiões para todas as estações.

Em relação à distribuição espacial dos resultados de NSE (não apresentados aqui, porém foram gerados), os melhores resultados estão concentrados na região Sudeste do Brasil em todas as estações. Para o MRE, a maioria das usinas apresenta valores positivos, com os valores mais elevados localizados na região Sul e Sudeste/Nordeste do Brasil, principalmente DJF e MAM, e Sudeste/Nordeste nos meses de SON.

Figura 3 - MAPE das previsões de vazão por conjunto baseadas na chuva prevista do ECMWF, considerando vazões médias mensais. Os mapas apresentam os resultados para a vazão média nas antecedências 1-30 dias, para as diferentes estações do ano

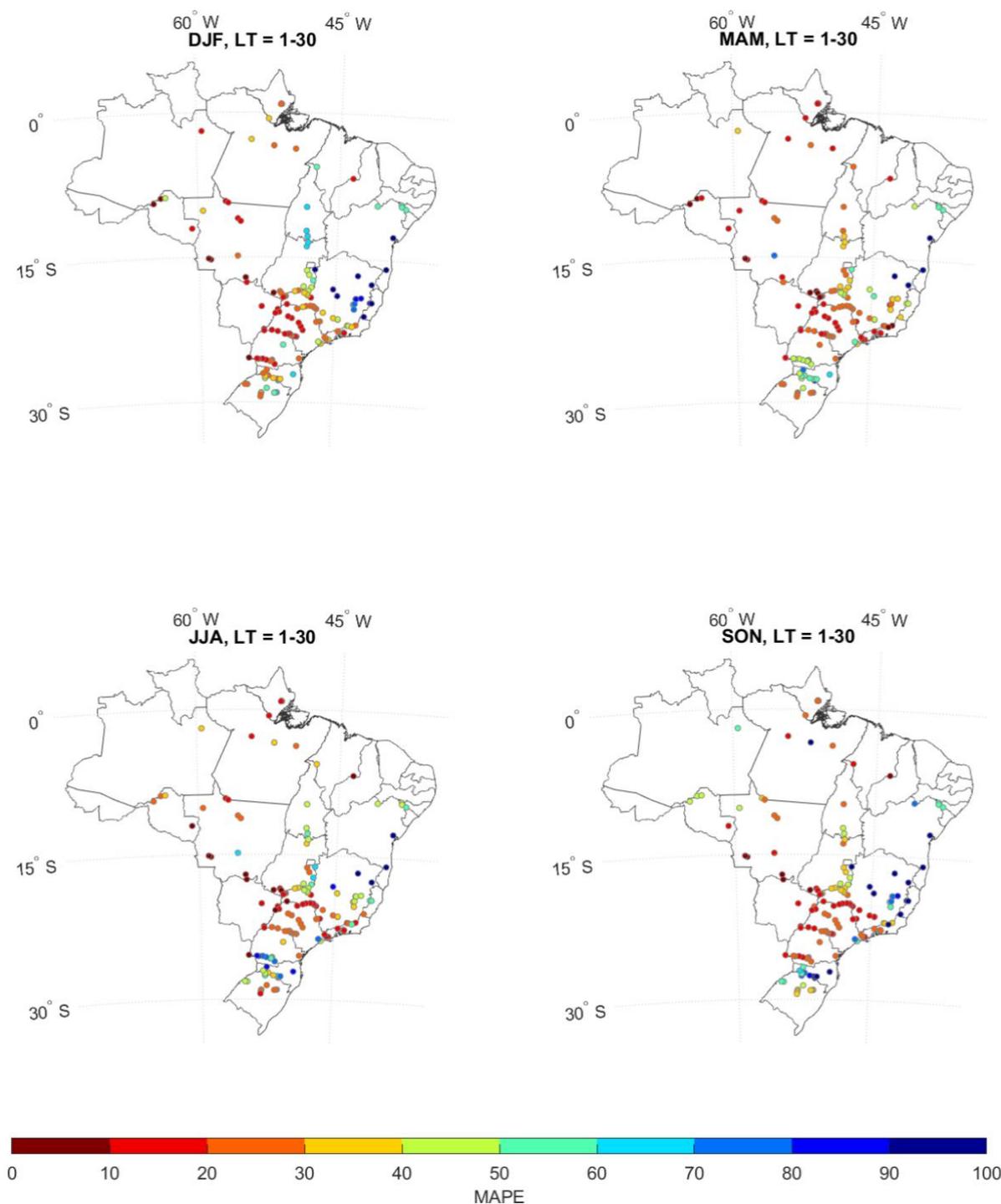
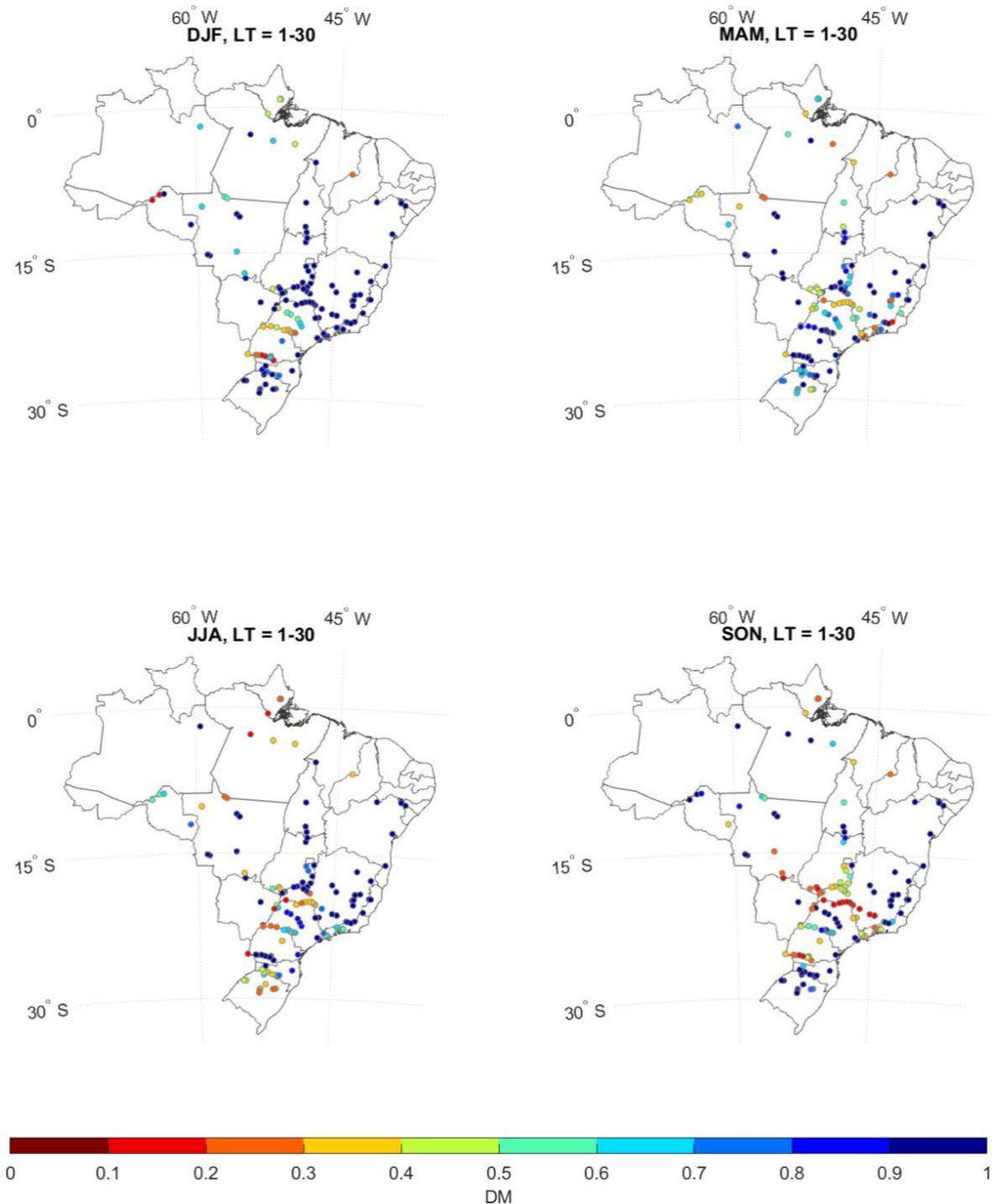


Figura 4 - DM das previsões de vazão por conjunto baseadas na chuva prevista do ECMWF, considerando vazões médias mensais. Os mapas apresentam os resultados para a vazão média nas antecedências 1-30 dias, para as diferentes estações do ano



## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados compreendem uma primeira avaliação das previsões de vazão sazonal em escala nacional para todo o SIN usando uma abordagem hidrológica-hidrodinâmica continental.

A região de melhor desempenho das previsões sazonais baseadas no modelo ECMWF e MGB-AS abrange as UHEs situadas no eixo central brasileiro incluindo muitas usinas na bacia do Rio Paraná. Nas demais regiões as previsões em geral são boas apenas nos primeiros horizontes (1 e 2).

Esses resultados nos motivam a continuar trabalhando na busca das melhores opções para previsão de vazão sazonal na América do Sul. Trabalhos futuros devem abordar a utilização do método Ensemble Prediction System reamostrado.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Capes por conceder uma bolsa de pós-graduação. Os autores são gratos aos *Copernicus Climate Change and Atmosphere Monitoring Services* por fornecerem as previsões sazonais geradas pelos sistemas de previsão sazonal do ECMWF (SEAS5). Os autores também são gratos pela Copel pelo financiamento e apoio à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ARNAL, L. et al. Skilful seasonal forecasts of streamflow over Europe? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 4, p. 2057–2072, 2018.
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, p. 1–18, 2011.
- BARNSTON, A. G. et al. Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002-11: Is our capability increasing? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 5, p. 631–651, 2012.
- BECK, H. E. et al. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 1, p. 589–615, 2017.
- BRÊDA, J. P. L. F. et al. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 503–522, 2020.
- BRÊDA, J. P. L. F. et al. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. **Journal of Hydrology**, v. 619, 1 abr. 2023.
- BUONTEMPO, C.; THÉPAUT, J.; BERGERON, C. Copernicus Climate Change Service. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 509, n. 012005, 2020.
- CARRÃO, H. et al. Seasonal drought forecasting for Latin America using the ECMWF S4 forecast system. **Climate**, v. 6, n. 2, p. 1–26, 2018.
- CHIEW, F. H. S.; ZHOU, S. L.; MCMAHON, T. A. Use of seasonal streamflow forecasts in water resources management. **Journal of Hydrology**, v. 270, n. 1–2, p. 135–144, 2003.
- CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: A review. **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3–4, p. 613–626, 2009.
- COLLISCHONN, W. et al. Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 2: Previsão Climática-Hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 61–72, 2005.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 1: Ajuste e Verificação do Modelo Hidrológico Distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 43–59, 2005.

- CROCHEMORE, L. et al. How Does Seasonal Forecast Performance Influence Decision-Making? ; Insights from a Serious Game. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 102, n. 9, p. E1682–E1699, 2021.
- DE PAIVA, L. F. G.; MONTENEGRO, S. M.; CATALDI, M. Prediction of monthly flows for Três Marias reservoir (São Francisco river basin using the CFS climate forecast model). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, p. 1–18, 2020.
- DELORIT, J. et al. Evaluation of model-based seasonal streamflow and water allocation forecasts for the Elqui Valley , Chile. p. 4711–4725, 2017.
- DEMIREL, M. C.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. The skill of seasonal ensemble low-flow forecasts in the Moselle River for three different hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 275–291, 2015.
- FAN, F. M. et al. Sobre o uso da persistência de previsões determinísticas de vazão para a tomada de decisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 218–228, 2016.
- JOHNSON, S. J. et al. SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 3, p. 1087–1117, 2019.
- KAUNE, A. et al. The benefit of using an ensemble of seasonal streamflow forecasts in water allocation decisions. **The Value of Using Hydrological Datasets for Water Allocation Decisions: Earth Observations, Hydrological Models, and Seasonal Forecasts**, p. 83–113, 2020.
- KOMPOR, W.; YOSHIKAWA, S.; KANAE, S. Use of seasonal streamflow forecasts for flood mitigation with adaptive reservoir operation: A case study of the Chao Phraya river basin, Thailand, in 2011. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 11, p. 1–19, 2020.
- LEE, D. et al. Unfolding the relationship between seasonal forecasts skill and value in hydropower production : A global analysis. n. November, p. 1–31, 2020.
- MAHANAMA, S. et al. Soil Moisture, Snow , and Seasonal Streamflow Forecasts in the United States. **American Meteorological Society**, p. 189–203, 2012.
- MANZANAS, R. et al. Validation of 40 year multimodel seasonal precipitation forecasts : The role of ENSO on the global skill. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, p. 1708–1719, 2014.
- PAIVA, R. C. D. et al. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences**, p. 2929–2946, 2013.
- PECHLIVANIDIS, I. G. et al. What Are the Key Drivers Controlling the Quality of Seasonal Streamflow Forecasts? **Water Resources Research**, v. 56, n. 6, p. 1–19, 2020.
- PECHLIVANIDIS, I. G.; ARHEIMER, B. Large-scale hydrological modelling by using modified PUB recommendations: The India-HYPE case. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 11, p. 4559–4579, 2015.
- PENUELA, A.; HUTTON, C.; PIANOSI, F. Assessing the value of seasonal hydrological forecasts for improving water resource management: Insights from a pilot application in the UK. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 12, p. 6059–6073, 2020.
- PETRY, I. et al. Predictability of daily streamflow for the great rivers of South America based on a simple metric a simple metric. **Hydrological Sciences Journal**, v. 00, n. 00, p. 1–15, 2022.
- QUEDI, E. S.; FAN, F. M. Sub seasonal streamflow forecast assessment at large-scale basins. **Journal of Hydrology**, v. 584, n. July 2019, p. 124635, 2020.
- SHIMIZU, M. H.; AMBRIZZI, T.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events and their relationship with ENSO and MJO phases over northern South America. **International Journal of Climatology**, 2016.
- SIQUEIRA, V. A. et al. Toward continental hydrologic – hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. May, p. 4815–4842, 2018.

SIQUEIRA, V. A. et al. Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America. **Journal of Hydrology**, v. 590, n. February, p. 125430, 2020.

SUTANTO, S. J.; WETTERHALL, F.; VAN LANEN, H. A. J. Hydrological drought forecasts outperform meteorological drought forecasts. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 8, 2020.

TROIN, M. et al. Generating ensemble streamflow forecasts: A review of methods and approaches over the past 40 years Accepted. **Water Resources Research**, 2021.

TUCCI, C. E. M. et al. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. 1–11, 2003.

VAN HATEREN, T. C.; SUTANTO, S. J.; VAN LANEN, H. A. J. Evaluating skill and robustness of seasonal meteorological and hydrological drought forecasts at the catchment scale – Case Catalonia (Spain). **Environment International**, v. 133, n. August, p. 105206, 2019.

WEISHEIMER, A. et al. Seasonal Forecasts of the Twentieth Century. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 101, n. 8, p. E1413–E1426, 2020.