

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

# AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA DE PREVISÃO DE VAZÕES EM HORIZONTE SUB SAZONAL UTILIZANDO A PREVISÃO ESTENDIDA DO MODELO ECMWF

*Hugo Bernardo Torraca<sup>1</sup>; Carlo Lucca Coutinho Ungaretti Rossi<sup>1</sup>; Mylena Feitosa Tormam<sup>1</sup>; Frederico Ivanchechen De Mattos<sup>1</sup>; Lilian Marie Tenorio Yamamoto<sup>1</sup>; Ana Paula Krizek Durra<sup>1</sup>; Hélio Camargo Junior<sup>1</sup>; Maria de Jesus Delmiro Rocha<sup>1</sup> & Simone Borim da Silva<sup>1</sup>.*

**Resumo:** Durante muito tempo a previsão de vazões em horizonte sub sazonal era considerada impraticável. Contudo, nos últimos anos, diversos estudos vêm sendo conduzidos tendo como foco esta prática e os resultados obtidos têm indicado grande potencial para auxiliar na tomada de decisão em diversos setores, no gerenciamento de recursos hídricos, assim como no planejamento da operação hidroenergética. Nesse contexto, o presente artigo teve como objetivo a avaliação de uma metodologia de previsão de vazão em horizonte sub sazonal que combina o uso da previsão de precipitação estendida do ECMWF, técnicas de *clusterização* para a seleção dos membros representativos e modelagem hidrológica. Com este fim, a metodologia proposta foi aplicada para diversas bacias hidrográficas que compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN), para 15 eventos da previsão estendida do ECMWF selecionados. Em cada caso foram avaliadas as previsões obtidas através de dois critérios: a taxa de permanência de vazões observadas contidas na faixa entre as previsões de vazão com valor mínimo e o máximo dentre os membros representativos do conjunto; e a evolução do erro relativo da média ponderada entre as previsões de cada membro do conjunto com relação às vazões observadas. Os resultados obtidos indicam potencial da metodologia para uso na programação da operação hidroenergética, com a degradação natural da previsão ao longo do tempo.

**Palavras-Chave:** previsão de vazões; ECMWF; SMAP/ONS.

## 1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é composta majoritariamente por energia de origem hidrelétrica, cerca de 65% (EPE, 2020). Dessa forma, o planejamento, programação e operação dos reservatórios de usinas hidrelétricas que compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN) é fundamental para a manutenção do sistema. Segundo Silva et al. (2019), a previsão de vazões é um dos principais insumos para a execução destas tarefas, auxiliando no despacho otimizado do parque gerador do SIN.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS é responsável pela elaboração da previsão de vazões afluentes naturais médias diárias, semanais e mensais de aproveitamentos hidrelétricos que fazem parte do SIN. Adicionalmente, é responsável pela geração de cenários de afluências naturais mensais a partir do segundo mês, a serem utilizados nos processos de planejamento e programação da operação (SILVA *et al.*, 2019). Atualmente, o Operador utiliza diferentes métodos e modelos conforme o horizonte das previsões e, em função de sua importância, é fundamental que a qualidade das mesmas esteja sempre evoluindo.

A precisão com que as variáveis hidrológicas são estimadas está diretamente ligada ao tempo de antecedência das previsões, sendo que seu grau de confiança decresce conforme o aumento deste período. Neste contexto, aponta-se uma lacuna diferenciando a qualidade das previsões de curto prazo com relação as previsões de longo prazo, assim como uma demanda para a melhoria das previsões

---

1) Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. [prh@ons.org.br](mailto:prh@ons.org.br). (21) 3444-9400.

entre estes horizontes (QUEDI, 2019). Entre as previsões de curto e longo prazo, classificam-se as previsões sub sazonais, que podem fornecer subsídios importantes para os tomadores de decisão, auxiliando-os no gerenciamento otimizado dos recursos hídricos. Nos últimos anos, diversas pesquisas vêm sendo realizadas (QUEDI & FAN, 2020; VITART & ROBERTSON, 2018) abordando este tipo de previsão, possibilitando o seu aprimoramento e expansão do conhecimento.

Adicionalmente, em função do cenário de escassez hídrica vivido no Brasil nos últimos anos, a situação dos armazenamentos dos reservatórios do SIN vem se deteriorando. Entre setembro de 2020 e maio de 2021 foi constatada a pior afluência no SIN de todo o histórico de 90 anos. Assim, o estudo de cenários e condições futuras é essencial para o planejamento e operação do sistema e o uso de previsões com horizontes estendidos surge como uma boa alternativa. Nesse sentido, no presente artigo tem-se como objetivo avaliar uma metodologia para previsão de vazão em horizonte sub sazonal, utilizando o modelo hidrológico SMAP/ONS (ONS, 2020a), as previsões estendidas de chuva do modelo ECMWF (WHITE, 2015) e técnicas de *clusterização* para a escolha de membros representativos.

## 2. PREVISÃO DE VAZÃO

A previsão de variáveis hidrológicas, como precipitação, nível ou vazão, corresponde à um importante instrumento para a gestão de recursos hídricos em diversos setores. Estas previsões podem ser classificadas em função de sua antecedência (QUEDI, 2019; FAN, 2015). Dessa forma, as previsões podem ser de curto a médio prazo, sazonais e sub sazonais. Nas previsões de curto a médio prazo o horizonte pode variar de algumas horas até duas semanas. Já nas previsões sazonais, também conhecidas como de longo prazo, o horizonte é definido em vários meses (QUEDI, 2019). Por último, a previsão sub sazonal possui um horizonte que vai de duas semanas até dois meses (VITART & ROBERTSON, 2018).

Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos métodos para a previsão de vazões. Dependendo das informações disponíveis, Tucci & Collischonn (2003, apud FAN, 2015) sugerem as seguintes alternativas: (I) Propagação de ondas de cheia; (II) Transformação de chuva em vazão; e (III) Transformação de chuva em vazão com informação adicional de previsão quantitativa de precipitação (QPF). Neste estudo, avalia-se o método de transformação de chuva em vazão utilizando-se um modelo hidrológico, juntamente da previsão quantitativa de precipitação para o período sub sazonal. A seguir são descritos o modelo hidrológico utilizado no artigo, que corresponde ao modelo SMAP/ONS, assim como a previsão de precipitação utilizada, correspondendo a previsão estendida do modelo ECMWF.

### 2.1. Modelo SMAP/ONS

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo conceitual de simulação hidrológica, do tipo transformação chuva-vazão semi-distribuído, desenvolvido em 1981 por Lopes, Braga e Conejo. (LOPES et al., 1982 apud SILVA et al., 2019). O modelo particiona a vazão em escoamento superficial e em escoamento subterrâneo. Essa divisão é feita a partir da equação de runoff do *Soil Conservation Service* (SCS), onde cada parcela é armazenada em reservatórios fictícios, responsáveis por descrever a forma e a duração dos escoamentos. Buscando-se um melhor ajuste às características específicas de algumas bacias, o modelo diário SMAP/ONS possui alguns aprimoramentos metodológicos e algumas diferenças de aplicação do original, a saber (ONS, 2020a): (I) Uso de coeficientes de representação temporal da precipitação; (II) Uso de coeficiente de ajuste da evapotranspiração potencial; (III) Criação de um quarto reservatório (reservatório de planície), como possibilidade de evaporação própria; (IV) Possibilidade de utilização de até dois coeficientes de recessão do reservatório de escoamento superficial; e (V) Processo de assimilação de dados e otimização, de forma que, em sua fase operacional, o modelo possa corrigir suas variáveis de estado

com o objetivo de diminuir o desvio entre as vazões calculadas e observadas em um período anterior ao dia da previsão.

## 2.2. Utilização da previsão estendida do modelo ECMWF

O *European Centre For Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) é um centro de pesquisa e operacional que monitora o sistema terrestre e produz previsões numéricas em várias escalas temporais. De interesse particular neste estudo, estão as previsões de precipitação estendidas, que são disponibilizadas duas vezes por semana. Estas previsões, que possuem 51 membros com o horizonte até 46 dias a frente, passaram a ser utilizadas pelo ONS em 2020. Até então, da terceira semana de previsão em diante, o SMAP/ONS gerava cenários com precipitação observada e, dessa forma, não considerava de maneira objetiva as condições meteorológicas consistentes com a realidade. Com o uso da previsão estendida, o modelo hidrológico passa a considerar a escala temporal entre o horizonte coberto pela previsão de tempo de curto e médio prazo e a previsão sazonal, ou entre a influência das condições iniciais e as condições de contorno utilizadas para a integração do modelo. Condições de umidade do solo e a oscilação Madden-Julian entre outras, são fontes de previsibilidade nessa escala temporal (CASSOU 2008, WOOLNOUGH et al. 2003, KOSTER et al. 2010).

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Metodologia de previsão de vazões

#### 3.1.1. Cálculo da precipitação média diária por bacia

A precipitação observada nas bacias corresponde à uma combinação de dados de precipitação de estações meteorológicas convencionais e automáticas, que são recebidas pelo ONS diariamente, e os resultados do algoritmo da versão EARLY do IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM: Global Precipitation Mission*). O algoritmo considera informações de vários instrumentos a bordo da constelação de satélites do GPM para estimar a precipitação para boa parte do planeta, seguindo a metodologia descrita na nota técnica ONS 0076/2020 (ONS, 2020b). Por outro lado, a precipitação prevista é obtida através da média aritmética dos pontos de grade submetida a limites diários e semanais, conforme exposto na metodologia descrita na nota técnica ONS 0075/2020 (ONS, 2020c).

#### 3.1.2. Escolha dos membros representativos do ECMWF estendido

Ao se incorporar um novo dado a um sistema de previsão operacional deve-se buscar o equilíbrio entre a relevância da informação e o tempo computacional para o seu processamento. Apesar de possuir grande relevância para a previsão de vazão, a previsão estendida do ECMWF é, do ponto de vista computacional, extremamente complexa de ser processada devido ao seu grande número de membros. Assim, torna-se necessária a utilização de técnicas de *clusterização* que permitam a escolha de membros representativos de previsão de precipitação a partir da previsão estendida do ECMWF. No presente estudo, foram utilizadas previsões para 86 sub-bacias de 14 bacias hidrográficas do Brasil, abrangendo uma região que se estende da bacia do Jacuí, localizada no sul do país, até a bacia do Xingu, situada ao norte. A região considerada contém, em média, 90% de toda a Energia Natural Afluyente (ENA) do SIN.

A escolha de membros representativos para uma região tão vasta representa um desafio, ainda mais ao se considerar as diferentes capacidades de potência instalada das Usinas Hidrelétricas (UHEs) de cada uma das bacias. Dessa forma, é necessário ponderar não só o volume de precipitação em cada bacia, mas também o potencial da precipitação se transformar em geração de energia. Para realizar essa ponderação foi criado um indicador que permite comparar e agregar a potencial energia que um determinado volume de precipitação em um certo local é capaz de gerar. A equação (1) apresenta o indicador, denominado Energia Natural Afluyente de Precipitação (ENAP), que permite fazer essa

agregação de precipitação de diferentes locais, uma vez que a ENAP de cada sub-bacia pode ser somada e comparada com as demais bacias.

$$ENAP = \frac{I \cdot A \cdot C \cdot \rho}{86,4} \quad (1)$$

Onde:  $I$  é a precipitação média acumulada em um dia na bacia (mm/dia);  $A$  é a área de drenagem da bacia (km<sup>2</sup>);  $C$  é razão entre a vazão média anual e o volume acumulado anual médio da bacia (-);  $\rho$  é produtividade acumulada de todas as UHEs contidas na bacia e a jusante;

É possível notar que a equação se torna uma derivação do método racional, que usualmente não é aconselhado para bacias de grande porte como as em estudo. Contudo, deve-se ressaltar que o objetivo do método nesse ponto não é calcular a vazão propriamente dita, mas sim permitir que se determine um indicador que demonstre o potencial energético de determinado evento de precipitação. Nesse sentido, o fato de toda a energia (vazão) ser apropriada no próprio dia da chuva é uma vantagem, dado que se fossem utilizados outros métodos que consideram o tempo de concentração o índice seria de difícil interpretação em função dos diferentes tempos de concentração das bacias em estudo, que podem variar de algumas horas até mais de uma semana.

A transformação em energia permite a comparação da precipitação entre as sub-bacias. No entanto, esta transformação ainda apresenta uma granularidade demasiada para a *clusterização*. Visando condensar o número de informações trabalhadas, agrega-se os valores de ENAP em duas regiões, definidas conforme o mapa da Figura 1. Essa divisão se deve ao regime pluviométrico distinto de ambas as regiões, com a região 1 (verde) possuindo um clima tipicamente tropical com verão chuvoso e inverno seco, enquanto a região 2 (azul) apresenta precipitação mais contínua ao longo de todo o ano.



Figura 1. Regiões consideradas para agregação espacial.

Além disso, os valores diários de cada região são agregados em valores semanais, o que ajuda a diminuir o número de dimensões a ser analisada e torna a análise mais robusta, dado que para horizontes mais distantes não é esperado que o modelo de precipitação tenha acurácia a nível diário. Portanto, para cada um dos 51 membros do ECMWF estendidos é calculada, para ambas as regiões, a ENAP através da equação (2). A seguir, as energias calculadas são organizadas em uma matriz 51x12, onde as linhas representam os membros do ensemble do ECMWF e as colunas representam as agregações espaço-temporais possíveis entre as 2 regiões e as 6 semanas do horizonte de previsão. Essa matriz é então normalizada por coluna através da equação (3).

$$ENAP_{sem, reg} = \sum_{i=3+7 \cdot (sem-1)}^{9+7 \cdot (sem-1)} \sum_{j=1}^{j=n_{bacias}} ENAP_{i,j} \quad (2)$$

Onde:  $sem$  equivale a semanas previstas (1 até 6);  $reg$  equivale as regiões avaliadas (1 e 2); e  $n_{bacias}$  corresponde ao total de bacias avaliadas.

$$\text{valor ajustado} = \frac{\text{valor} - \mu_{\text{coluna}}}{\sigma_{\text{coluna}}} \quad (3)$$

Onde:  $\mu_{\text{coluna}}$  é a média dos valores por coluna;  $\sigma_{\text{coluna}}$  é o desvio padrão dos valores por coluna.

A matriz normalizada é o dado de entrada para a análise de agrupamento pelo método K-means, no qual procura-se agrupar os membros do ECMWF que geraram previsões de energia similares para as regiões e horizonte considerado. Nesta análise considerou-se que os membros pertencem a um espaço vetorial de dimensão igual ao número de colunas da matriz, onde a dissimilaridade entre os membros pode ser estimada através de uma medida de distância nesse mesmo espaço vetorial. Para o presente estudo, utilizou-se a distância euclidiana, descrita na equação (4).

$$\text{dist}(m_i, m_j) = \sqrt{\sum_{n=1}^d (m(n)_i - m(n)_j)^2} \quad (4)$$

Onde:  $d$  é o número de dimensões do espaço vetorial;  $m_i$  e  $m_j$  são diferentes membros do conjunto.

Como o método proposto é sensível a alocação inicial, o método é repetido 5000 vezes com inicializações aleatórias diferentes e escolhe-se como agrupamento final aquele cuja soma das distâncias dos membros aos seus respectivos centróides é a menor. Por fim, o agrupamento é representado pelo membro com a menor distância ao centróide. Este procedimento é realizado buscando a obtenção de cinco membros considerados representativos do conjunto. Pode-se determinar também a probabilidade de cada membro representativo contabilizando a razão do número de membros atribuídos para cada cluster pelo número de membros totais.

### 3.1.3. Modelagem hidrológica

Nesta etapa, utilizam-se os cinco membros com previsão de precipitação como dados de entrada a serem inseridos em um modelo hidrológico para realizar a transformação de chuva em vazão. No presente estudo, o modelo hidrológico utilizado foi o SMAP/ONS, descrito anteriormente.

## 3.2. Casos avaliados

Conforme apresentado anteriormente, o ECMWF fornece previsões estendidas duas vezes na semana, sendo uma na segunda-feira e outra na quinta-feira. Dessa forma, foram selecionadas uma previsão representando cada mês entre janeiro de 2020 até março de 2021, totalizando 15 casos (Tabela 1) para a análise da previsão de vazão. Para a avaliação da *clusterização* foram utilizadas todas as previsões realizadas nas segundas-feiras entre 06/01/2020 e 15/03/2021, totalizando 63 rodadas.

Tabela 1. Datas das previsões estendidas do ECMWF utilizadas para previsão de vazão.

i	Mês	Data da previsão	i	Mês	Data da previsão
1	Janeiro	06/01/2020	9	Setembro	31/08/2020
2	Fevereiro	03/02/2020	10	Outubro	28/09/2020
3	Março	02/03/2020	11	Novembro	02/11/2020
4	Abril	30/03/2020	12	Dezembro	30/11/2020
5	Maiο	27/04/2020	13	Janeiro	28/12/2020
6	Junho	01/06/2020	14	Fevereiro	01/02/2021
7	Julho	29/06/2020	15	Março	01/03/2021
8	Agosto	03/08/2020			

Cada um dos casos de previsão escolhidos é submetido ao processo de seleção descrito no item 3.1.2, gerando cinco membros representativos por caso a serem utilizados na modelagem hidrológica. De forma representativa, serão apresentadas as análises de previsão de vazão para as bacias dos rios: Paranaíba; Tocantins; Jacuí, Uruguai, Itajaí e Capivari (Subsistema Sul); e a agregação de todas as

14 bacias hidrográficas cujas previsões foram utilizadas no método de *clusterização*. Para a análise da escolha dos membros representativos, serão apresentados resultados para as regiões 1 e 2 já descritas anteriormente.

### 3.3. Avaliação do desempenho da metodologia

Em um primeiro momento, analisou-se a técnica adotada para a escolha dos membros representativos do ECMWF. Para esta etapa de análise da *clusterização*, serão apresentados os boxplots do acumulado de 45 dias para as regiões 1 e 2, o qual compara a média ponderada dos membros selecionados (obtida a partir das probabilidades associadas a cada membro) com a mediana de todos os membros e com o valor observado. Em seguida, para avaliar o desempenho do método com relação as vazões observadas, optou-se pela utilização de intervalos semanais (semanas 1 a 6) e pela média dos 30 primeiros dias de previsão utilizando os critérios de **erro relativo percentual** entre a média ponderada e o observado, além do critério de **permanência na faixa de vazões** previstas pelos membros, definida desde o valor mínimo até o valor máximo vislumbrados pelos cinco membros do conjunto.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Avaliação da escolha dos membros representativos

O objetivo da *clusterização* é agrupar os dados de forma a se perder o menos possível da informação original. Nesse sentido, deve-se analisar se a média ponderada dos membros está próxima da média da distribuição original. Os gráficos apresentados na Figura 2 e na Figura 3, apresentam, respectivamente, o acumulado dos 45 dias de ENAP para as regiões 1 e 2.

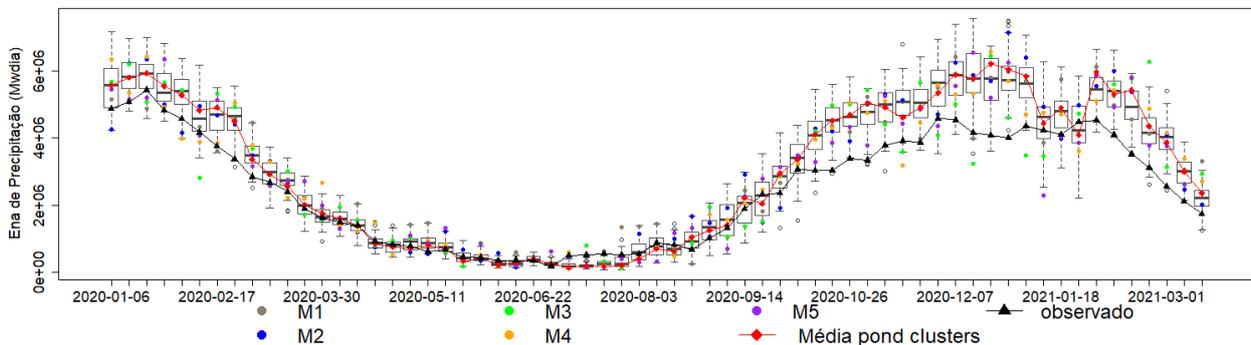


Figura 2. Acumulado de 45 dias de ENAP para a Região 1.

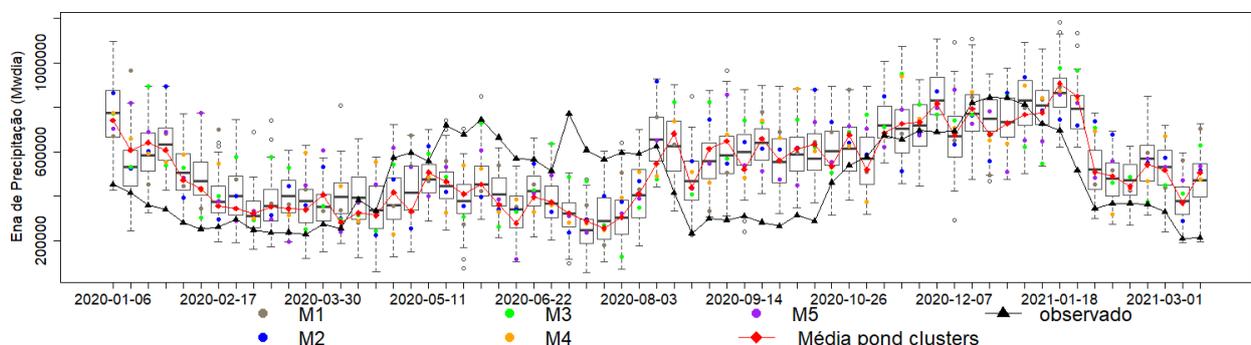


Figura 3. Acumulado de 45 dias de ENAP para a Região 2.

Para ambas as regiões, em geral, a média da ponderação dos grupamentos ficou próxima da mediana da distribuição original e, adicionalmente, são escolhidos membros em ambas as caudas, indicando que não houve perda significativa de informação com a *clusterização*. É possível observar também que no período úmido da região 1 (outubro a março) há um superestimava da previsão, que

pode ocasionar desvios para a previsão de vazão. Para a região 2 não é possível notar nenhum tipo de viés e os erros estão associados a grande variabilidade da precipitação nessa região.

#### 4.2. Análise do desempenho da previsão de vazões

Como discutido anteriormente, serão apresentados resultados da previsão de vazão para as bacias do subsistema sul de forma agregada, para as bacias dos rios Paranaíba e Tocantins, que são representativas da região 1, e para a agregação de todas as 14 bacias. A Figura 4 apresenta os erros relativos de ENA para as bacias do Paranaíba e Tocantins para as seis semanas a frente e para a média dos 30 primeiros dias. Nesta figura, erros positivos (em azul) indicam que a média ponderada prevista dos membros escolhidos foi superior ao observado e erros negativos (em vermelho) indicam que a previsão foi inferior ao observado. Conforme esperado, percebe-se que os maiores erros se encontram nos meses do período úmido, onde há maior incerteza da previsão de precipitação.



Figura 4. Erros relativos obtidos para as bacias dos rios Paranaíba (esq) e Tocantins (dir).

Para **bacia do rio Paranaíba** os erros foram maiores nos meses de novembro e janeiro, com um erro relativo máximo de aproximadamente 200% constatado na quinta semana da previsão de janeiro de 2021. O erro relativo mínimo encontrado nesta bacia, que corresponde a cerca de -50% e indica uma subestimativa das vazões, ocorreu na quarta semana de previsão do mês de fevereiro de 2020. Contudo, pode-se destacar que existe uma predominância de desvios positivos indicando que o viés encontrado na ENAP da região 1 pode estar repercutindo na previsão de vazão da bacia. Na **bacia do rio Tocantins**, o erro foi mais elevado na sexta semana da previsão feita em novembro de 2020, onde o modelo previu um aumento das vazões que não se confirmou, gerando um erro relativo de cerca de 300%. O erro relativo mínimo encontrado, que corresponde a cerca de -40%, ocorreu na quarta semana de previsão do mês de abril de 2020. No verão de 2020, a previsão teve uma tendência clara de ser inferior ao observado, já no verão de 2021 a tendência foi menor, porém persistiu com o valor observado sendo superior ao previsto. Isso indica que o viés apresentado na ENAP da região 1 não é homogêneo na região.

No geral, para ambas bacias, as previsões foram se degradando com o aumento do horizonte de previsão, principalmente no período úmido onde há maior incerteza do volume de precipitação. Em termos mensais a previsão teve uma qualidade satisfatória. Dessa forma, acredita-se que, para estas regiões, a previsão possa ser utilizada para fins da programação da operação energética, auxiliando na otimização dos recursos.

Na Figura 5 são apresentados os erros relativos de ENA da região Sul e do agregado de todas as 14 bacias do estudo. A **região Sul** apresenta os maiores desvios dentre todos os casos avaliados. Este comportamento ocorre pela combinação de dois fatores: a precipitação não possui padrão sazonal marcante e as bacias possuem solos rasos aliados à grandes declividades, que favorecem ao aumento do escoamento superficial. Os erros foram maiores nos meses do verão de 2020 e nos meses de setembro e outubro de 2020, com as vazões observadas inferiores às previstas em todos os casos. Deve-se destacar que nesse período a região Sul vinha sofrendo de uma seca prolongada com poucos eventos de precipitação elevada. A soma da ENA de **todas as bacias** apresenta os menores erros relativos entre os locais estudados. Isto se deve a sua magnitude, que torna os desvios percentuais menores, e a compensação de erros entre as diferentes bacias, pois muitas vezes o modelo acerta os eventos de precipitação, porém erra sua localização. Os maiores erros foram encontrados nos meses de setembro, outubro e novembro, considerados como meses de transição entre o período seco e o período úmido de grande parte do Brasil. Tal comportamento pode ser explicado por dois principais fatores, a própria incerteza do início do período úmido, que depende de diversos climatológicos que interagem entre si, e as baixas vazões desse período, que aumentam o erro relativo percentual. Outro ponto que se deve destacar é a predominância de desvios positivos a partir de setembro no agregado de todas as bacias, o que demonstra a dificuldade do conjunto SMAP/ONS + ECMWF de apontar a criticidade desse período que corresponde ao pior no histórico de 91 anos disponível para o sistema.



Figura 5. Erros relativos obtidos para a Região Sul (esq) e todas as bacias (dir).

Com relação a análise das previsões de vazão para as faixas de máximo e mínimo dos membros representativos, a Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para a bacia do rio Tocantins junto ao Subsistema Sul e a bacia do rio Paranaíba junto da agregação de todas as bacias. Nestas tabelas são apresentadas indicações se as vazões observadas se encontram dentro da faixa de vazões previstas (símbolo em verde), acima da faixa (flecha apontando para cima), abaixo da faixa (flecha apontando para baixo), assim como amplitude da faixa de vazões (denotada pelas barras horizontais).

Na **bacia do rio Tocantins**, há um maior percentual de acerto no período úmido e nos horizontes mais distantes. Isso pode ser explicado pela maior amplitude da faixa nessas etapas, devido à incerteza da precipitação. No período seco e nos horizontes mais próximos, onde ocorrem menores desvios da previsão da precipitação, a acurácia da modelagem hidrológica passa ser preponderante na avaliação da faixa. Contudo, deve-se ressaltar que, nesse trabalho este fator não foi avaliado, o que ocasionou uma subestimativa da amplitude das faixas nesse período. Deve-se destacar que a previsão

dos primeiro 30 dias encontrou-se dentro da faixa de vazões em 60% dos casos, indicando uma boa precisão e reafirmando seu potencial uso para a programação hidroenergética. O **subsistema Sul** não possui período marcante de melhor qualidade fruto da não sazonalidade da sua precipitação. No quesito mensal, o Sul apresentou cerca de 53% dos casos dentro da área denotada pelo máximo e o mínimo dos membros representativos.

Tabela 2. Avaliação do critério de faixa de vazões para as 15 rodadas na bacia do rio Tocantins e no subsistema Sul.

	TOCANTINS							Vazões na faixa	30 dias	SUL							Vazões na faixa	30 dias
	Sem1	Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6	Sem1			Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6				
Rod. 1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↓		
Rod. 2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	33,3%	↓		
Rod. 3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	16,7%	↓		
Rod. 4	↓	↓	↓	↓	↓	↓	16,7%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	33,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑		
Rod. 6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 7	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 8	↑	↑	↑	↑	↑	↑	66,7%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	66,7%	↑		
Rod. 9	↑	↑	↑	↑	↑	↑	16,7%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 10	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0,0%	↓		
Rod. 11	↓	↓	↓	↓	↓	↓	33,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑		
Rod. 12	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑		
Rod. 13	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 14	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 15	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑		
Vazões na faixa	20,0%	53,3%	66,7%	46,7%	46,7%	60,0%		60,0%	53,3%	46,7%	73,3%	40,0%	53,3%	33,3%		53,3%		

Tabela 3. Avaliação do critério de faixa de vazões para as 15 rodadas na bacia do rio Paranaíba e para todas as bacias consideradas na *clusterização*.

	PARANAÍBA							Vazões na faixa	30 dias	TODOS							Vazões na faixa	30 dias
	Sem1	Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6	Sem1			Sem2	Sem3	Sem4	Sem5	Sem6				
Rod. 1	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↓		
Rod. 2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	16,7%	↑		
Rod. 3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	16,7%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑		
Rod. 4	↓	↓	↓	↓	↓	↓	16,7%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	66,7%	↑		
Rod. 7	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	33,3%	↑		
Rod. 8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑		
Rod. 9	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	33,3%	↑		
Rod. 10	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	16,7%	↓		
Rod. 11	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	33,3%	↓		
Rod. 12	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	83,3%	↓		
Rod. 13	↑	↑	↑	↑	↑	↑	66,7%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	66,7%	↓		
Rod. 14	↑	↑	↑	↑	↑	↑	33,3%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	66,7%	↓		
Rod. 15	↑	↑	↑	↑	↑	↑	50,0%	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	33,3%	↓		
Vazões na faixa	26,7%	40,0%	40,0%	26,7%	20,0%	26,7%		33,3%	40,0%	26,7%	26,7%	40,0%	60,0%	100,0%		33,3%		

A **bacia do rio Paranaíba** apresentou resultados semelhantes a bacia do rio Tocantins, com boa representação da variabilidade do período úmido e dificuldade para a representação do período seco. Novamente, isso pode ser creditado a não consideração das imprecisões do modelo hidrológico, que nesse período possui incerteza superior à da previsão de precipitação. Adicionalmente, na avaliação da média dos 30 primeiros dias de previsão, esta bacia apresentou cerca de 30% das vazões na faixa, metade da precisão obtida para a bacia do rio Tocantins. Por último, na **agregação de todas as bacias** consideradas na *clusterização* observa-se, em geral, um melhor desempenho que nos demais casos analisados, com as taxas de vazões variando entre 17% e 83%, ou seja, em todas as previsões, ao menos uma das semanas encontrava-se dentro da área prevista pelos membros do conjunto. Ressalta-se que, diferentemente das demais bacias, a agregação apresentou um indicador extremamente positivo para a sexta semana de previsão, onde todas as vazões encontravam-se na faixa prevista. Isto ocorre em função do aumento das incertezas conforme antecedência das previsões, de forma a aumentar a amplitude da faixa de vazões, e devido à compensação de erros entre as diferentes bacias, conforme destacado anteriormente. Avaliando-se a performance mensal, a precisão ficou em torno de 30% para a agregação total das bacias.

## 5. CONCLUSÕES

O presente artigo teve como principal objetivo a apresentação e avaliação do desempenho de uma metodologia de previsão de vazões em horizonte sub sazonal. O método proposto apresenta as características de um sistema de previsão hidrológica por conjunto (“*Hydrologic Ensemble Prediction System*”), utilizando a previsão de precipitação estendida do ECMWF, junto a técnicas de *clusterização* para a escolha de cinco membros representativos, e uso do modelo hidrológico SMAP/ONS. A metodologia proposta foi aplicada para um conjunto de 14 bacias que representa em média 90% da energia do SIN.

Em termos gerais, a *clusterização* dos 51 membros do ECMWF em 5 membros representativos teve boa qualidade não havendo grandes perdas de informação da distribuição original. A previsão de vazão apresentou aumento gradativo dos erros com o aumento horizonte de precipitação, porém a média dos 30 primeiros dias ainda apresentou qualidade para uso na programação da operação. A análise da permanência na faixa de vazão, apresentou resultados que à primeira vista podem parecer paradoxais com taxa de acerto nas primeiras semanas menor que para horizontes mais longos, porém que podem ser explicados pelo tamanho das faixas de vazão que aumentam ao longo das semanas juntamente com as incertezas inerentes à previsão.

## REFERÊNCIAS

- CASSOU C. (2008). “*Intraseasonal interaction between the Madden–Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation*”. *Nature* 455: 523–527, doi:10.1038/nature07286.
- EPE (2020). “*Balanco Energético Nacional 2020 - ano base 2019*”.
- DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M; COLLISCHONN, W. (2006). “*Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos*”.
- FAN, F. M. (2015). “*Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras*”. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- KOSTER, R.D., S.P.P. MAHANAMA, T.J. YAMADA, *et al.* (2010). “*The contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment*”. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L02402, doi:10.1029/2009GL041677.
- LOPES, J.E., BRAGA, B.F.F., CONEJO, J.L. (1982). “*A Simplified Hydrologic Model in Applied Modeling in Catchment Hydrology*”. Water Resources Publication.
- ONS (2020a). “*Aplicação do modelo SMAP/ONS para previsão de vazões no âmbito do SIN*”. NT 0097/2018, Revisão 7.
- ONS (2020b). “*Precipitação obtida pela combinação entre dados estimados por satélite e dados observados de estações meteorológicas*”. NT0076/2020.
- ONS (2020c). “*Aprimoramento da previsão de precipitação por conjunto e remoção de viés até a segunda semana operativa*”. NT0075/2020.
- QUEDI, E. S. (2019). “*Previsão hidrológica em horizonte sub sazonal*”. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).
- QUEDI, E. S. & FAN, F. M. (2020). “*Sub seasonal streamflow forecast assessment at large-scale basins*”. *Journal of Hydrology*, v. 584, p. 124635, 2020
- SILVA, S. B.; CAMARGO JUNIOR, H.; ROCHA, V. F. & TORRACA, H. B. B. (2019). “*Avaliação do uso de dados de satélite para previsão de vazões utilizando o modelo hidrológico SMAP/ONS*”. Anais XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH).
- VITART, F., & ROBERTSON, A. W. (2018). “*The sub seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events*”. *Climate and Atmospheric Science*, 1-7.
- WHITE, C. J.; FRANKS, S. W.; & MCEVOY, D. (2015). “*Using subseasonal-to-seasonal (S2S) extreme rainfall forecasts for extended-range flood prediction in Australia*”. *Proc. IAHS*, 370, 229–234, <https://doi.org/10.5194/piahs-370-229-2015>.
- WOOLNOUGH, S. J., F. VITART AND M. A, BALMASEDA (2007). “*The role of the ocean in the Madden-Julian Oscillation: Implications for MJO prediction*”. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 117-128.