

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO GLOFAS SAZONAL PARA
PREVISÃO DE SECAS NO RIO DO SINOS (RS)

por

Michelle Sieben Franzen

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenharia Civil.

Porto Alegre, Maio de 2022

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO GLOFAS SAZONAL PARA
PREVISÃO DE SECAS NO RIO DO SINOS (RS)

por

Michelle Sieben Franzen

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Aprovado por:

Me. Marianne Bueno dos Passos BrumKISTERS AG

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de PaivaIPH / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Mainardi FanIPH / UFRGS

Prof. Dr. Enio Carlos Mesacasa Júnior
Coordenador da Engenharia Civil

Porto Alegre, 12 de Maio de 2022

APRESENTAÇÃO

Este trabalho intitulado "Avaliação do desempenho do modelo GloFAS sazonal para previsão de secas no Rio dos Sinos (RS)" foi desenvolvido no formato de Artigo de Divulgação Técnico-Científico, no ano de 2022, com a orientação do Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan, conforme as diretrizes da Comissão de Graduação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

All models are wrong, but some are useful.

George Box

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por todo apoio e pela presença ao longo da minha trajetória.

Agradeço aos professores e colegas com quem trabalhei no Necod e no LAC, pelas conversas e ensinamentos que foram essenciais para a minha formação.

Agradeço ao professor Fernando Mainardi Fan pelas boas ideias e pela disposição ao orientar este trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso Bernardo e Helton, obrigada por toda a companhia ao longo dos anos. Os nossos cafés no "Cantônio Clanches" e as nossas piadas tornaram os dias mais divertidos.

Aos meus amigos Pianta, Sari e Carol, obrigada pelas nossas conversas terapêuticas e por se fazerem presentes mesmo quando a vida estava corrida.

Ao meu namorado Augusto, obrigada por toda a parceria e cuidado. Aprendo muito contigo todos os dias.

RESUMO

Eventos extremos como inundações e secas têm ocorrido com maior frequência como consequência das mudanças climáticas. O Rio dos Sinos apresenta eventos de cheias e secas com grande impacto para a população local, gerando problemas de infraestrutura, de abastecimento de água e redução da qualidade da água. O presente trabalho avalia o modelo GloFAS sazonal para a previsão de secas no Rio dos Sinos para eventos ocorridos nos anos de 2012, 2019 e 2020. O GloFAS sazonal é um modelo global de previsão de vazões por conjunto. Suas previsões são iniciadas mensalmente e possuem um horizonte de previsão de 4 meses. Diagramas de déficit hídrico semanal foram gerados para todos os eventos, comparando-os com vazões de referência do rio. O modelo apresenta um grande decaimento da qualidade de previsão com o aumento do horizonte de previsão e obtém melhores resultados para previsões iniciadas após o início do evento de seca. O modelo apresenta melhores resultados para eventos mais extremos, como o ocorrido no ano de 2020, atingindo um CRPSS máximo de 65,25% quando comparado a um modelo de referência que assume o valor de Q_{50} para todo o período. O evento de seca menos extremo e com maior variação de vazão apresentou os piores resultados de previsão, com um CRPSS de -24,38% no seu pior caso.

Palavras-chave: GloFAS; Rio dos Sinos; Previsão de secas; Previsão sazonal

ABSTRACT

The frequency of extreme events such as floods and droughts has increased due to climate change. These events have occurred at Rio dos Sinos and have had a significant impact on the local population, damaging infrastructure and affecting water supply and quality. The present work evaluates the GloFAS seasonal model for drought forecasting at Rio dos Sinos for events in 2012, 2019, and 2020. GloFAS is a global ensemble streamflow forecasting model. Its forecasts are initialized monthly and provide four months of simulated data. Water deficit diagrams were used to compare forecast and threshold discharge values for Rio dos Sinos. The model exhibits a significant decay in forecast quality with lead time increase and presents better results for forecasts initiated after the start of the event. The model presents better results for extreme events, such as the one that occurred in 2020, which reached a maximum CRPSS of 65,25% in comparison to a reference model that assumed a Q_{50} value for the entire time course. GloFAS exhibits poorer results for events that are both mild and unsteady. The worst result offered a CRPSS of -24,38%.

Keywords: GloFAS; Rio dos Sinos; Drought forecasting; Seasonal forecast

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. METODOLOGIA	3
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
4. CONCLUSÕES	21
REFERÊNCIAS	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (RS). Fonte: Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura [2014]	3
Figura 2	Fluxograma da metodologia adotada	4
Figura 3	Série histórica de vazões do Rio dos Sinos na estação São Leopoldo	6
Figura 4	Eventos de seca dos anos de 2012, 2019 e 2020 selecionados para a análise do modelo	7
Figura 5	Curva de permanência do Rio dos Sinos na estação São Leopoldo .	8
Figura 6	Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2012	11
Figura 7	Variação da previsão por conjunto do modelo GloFAS e dados medidos para comparação no ano de 2012.	13
Figura 8	Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2019	14
Figura 9	Variação da previsão por conjunto do modelo GloFAS e dados medidos para comparação no ano de 2019.	16
Figura 10	Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2020	17
Figura 11	Variação da previsão por conjunto do modelo GloFAS e dados medidos para comparação no ano de 2020.	19
Figura 12	Variação dos CRPS em 2012, 2019 e 2020	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Verificação da área de drenagem para as três estações encontradas	5
Tabela 2	Valores dos percentis utilizados	8

1. INTRODUÇÃO

Eventos extremos como inundações, secas e ondas de calor têm ocorrido com maior frequência nos últimos anos. Isso pode ser resultado de mudanças climáticas, da rápida urbanização e da migração de população para os centros urbanos e áreas de risco [Raikes et al., 2019]. Esses eventos causam alterações em ecossistemas, na produção de alimentos e abastecimento de água, danos à infraestrutura e populações, morbidade e mortalidade, impactos na saúde mental e bem-estar das pessoas [Field e Barros, 2014].

Um evento de seca é um fenômeno de escassez hídrica ocorrido durante um extenso período de tempo, que resulta em impactos negativos em ecossistemas e atividades socioeconômicas. [Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017]. Eventos de seca são de grande importância para o planejamento e gestão de recursos hídricos. Portanto, o entendimento de eventos de seca e a modelagem de seus componentes têm chamado a atenção de hidrólogos e meteorologistas [Mishra e Singh, 2011]. O *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) disponibiliza os resultados de um modelo de previsão de vazões em escala global chamado *Global Flood Awareness System* (GloFAS). O GloFAS é um sistema do *Copernicus Emergency Management Service* (CEMS), desenvolvido para prever e monitorar inundações em escala global. Trata-se de um modelo de previsão de vazão por conjunto, com um horizonte de previsão de 4 meses em passos de tempo de 24 horas com uma resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ [Climate Data Store - CDS, 2021].

A geração de resultados envolve a utilização de um modelo hidrológico chamado *LISFLOOD*, e tem como dados de entrada previsões meteorológicas, dados de topografia, de redes fluviais, de solo, entre outros (a lista completa pode ser encontrada em Emerton et al. [2018]). Apesar de ser utilizado para o monitoramento de inundações, o modelo também é capaz de alertar para eventos de seca. O GloFAS estabelece como limiares para a geração de alertas qualquer vazão acima do percentil 80 para inundações, e abaixo do percentil 20, para secas. Esses percentis são calculados a partir dos resultados dos *reforecasts* [Emerton et al., 2018]. *Reforecasts* são previsões retrospectivas geradas com uma versão atual do modelo. Os conjuntos gerados pelos *reforecasts* do GloFAS sazonal no período entre 1981 e 2016 contém 25 membros. A partir de 2017, os conjuntos contém 51 membros.

Para encontrar artigos que tenham relevância para o presente trabalho, foi reali-

zada uma pesquisa na base de dados SCOPUS ¹ utilizando-se o seguinte termo de busca: 'TITLE-ABS-KEY ("Global Flood Awareness System")'. Esta pesquisa retornou 31 documentos, que foram selecionados com a leitura dos títulos e resumos, com os seguintes critérios de inclusão: 1. O artigo utiliza o modelo GloFAS para a previsão de secas em qualquer lugar do mundo. 2. O artigo utiliza o modelo GloFAS para a previsão de vazões na América do Sul. Ao final, foram avaliados 3 trabalhos.

Alfieri et al. [2013] apresentaram o modelo GloFAS e aplicaram-no para um evento de cheia ocorrido no Paquistão em 2010 com um horizonte de previsão de até um mês. Foi relatado que previsões para algumas regiões do Brasil foram afetadas pela regulação das barragens.

Emerton et al. [2019] comparou o modelo GloFAS sazonal com dados estatísticos de probabilidades históricas do (*El Niño Southern Oscillation*) (ENSO) para a previsão de altas e baixas vazões em rios durante o El Niño. Nenhum dos modelos foi capaz de prever baixa vazão (abaixo do vigésimo percentil) durante o El Niño para a região sul do Brasil. Além disso, o modelo GloFAS sazonal apresentou melhor desempenho para previsão de baixa vazão em locais onde o modelo também apresentou bom desempenho para previsão de alta vazão.

Bischiniotis et al. [2019] explora o potencial do modelo GloFAS para previsão de cheias no Peru para os anos de 2009 a 2015 em 10 estações de medição. O modelo foi capaz de prever as cheias em 82% dos casos e apresentou um melhor desempenho para rios com maiores vazões e bacias com maiores áreas de drenagem.

O rio selecionado para estudo neste trabalho é o Rio dos Sinos, que está localizado no estado do Rio Grande do Sul, estado mais ao sul do Brasil. O Rio dos Sinos tem cerca de 190 km de extensão da sua nascente localizada no município de Caraá, à sua foz, localizada no município de Canoas. A Figura 1 apresenta o mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos.

¹<https://www.scopus.com>

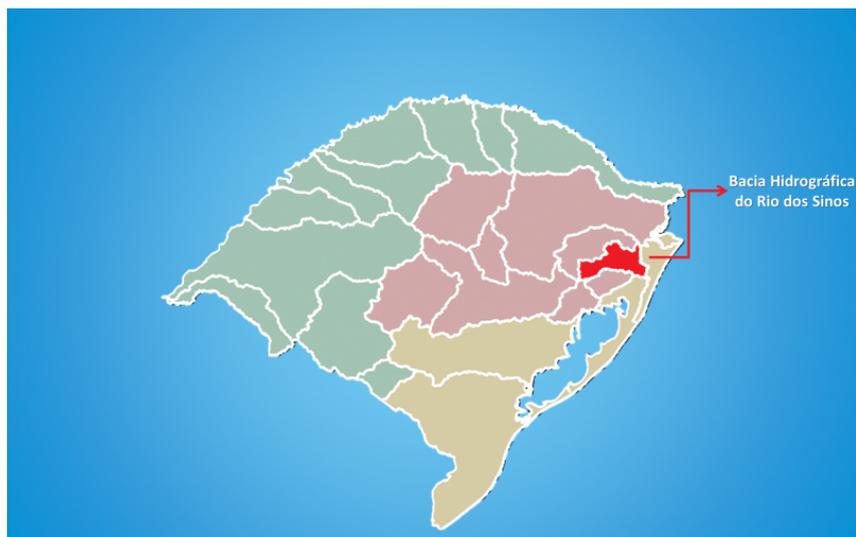


Figura 1 – Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos (RS). Fonte: Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura [2014]

A Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos apresenta graves problemas relacionados aos seus recursos hídricos. Entre eles, está a escassez quantitativa frente às demandas de abastecimento humano e a degradação da qualidade das águas superficiais [Plano Sinos, 2014]. Nos últimos anos, municípios à beira do Rio dos Sinos tiveram grandes dificuldades no tratamento da água justamente por conta do baixo nível do rio. Além disso, em períodos de cheia ocorrem prejuízos provenientes das inundações nas cidades [Revista IHU - Online, 2016].

Nesta linha, o objetivo do presente trabalho é apresentar pela primeira vez a avaliação de resultados do modelo GloFAS Sazonal para uma bacia hidrográfica brasileira. Neste caso, a Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, escolhida pela sua relevância regional para o Estado do Rio Grande do Sul.

2. METODOLOGIA

A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia adotada neste trabalho. Na sequência, foram descritos os passos da metodologia e suas aplicações.

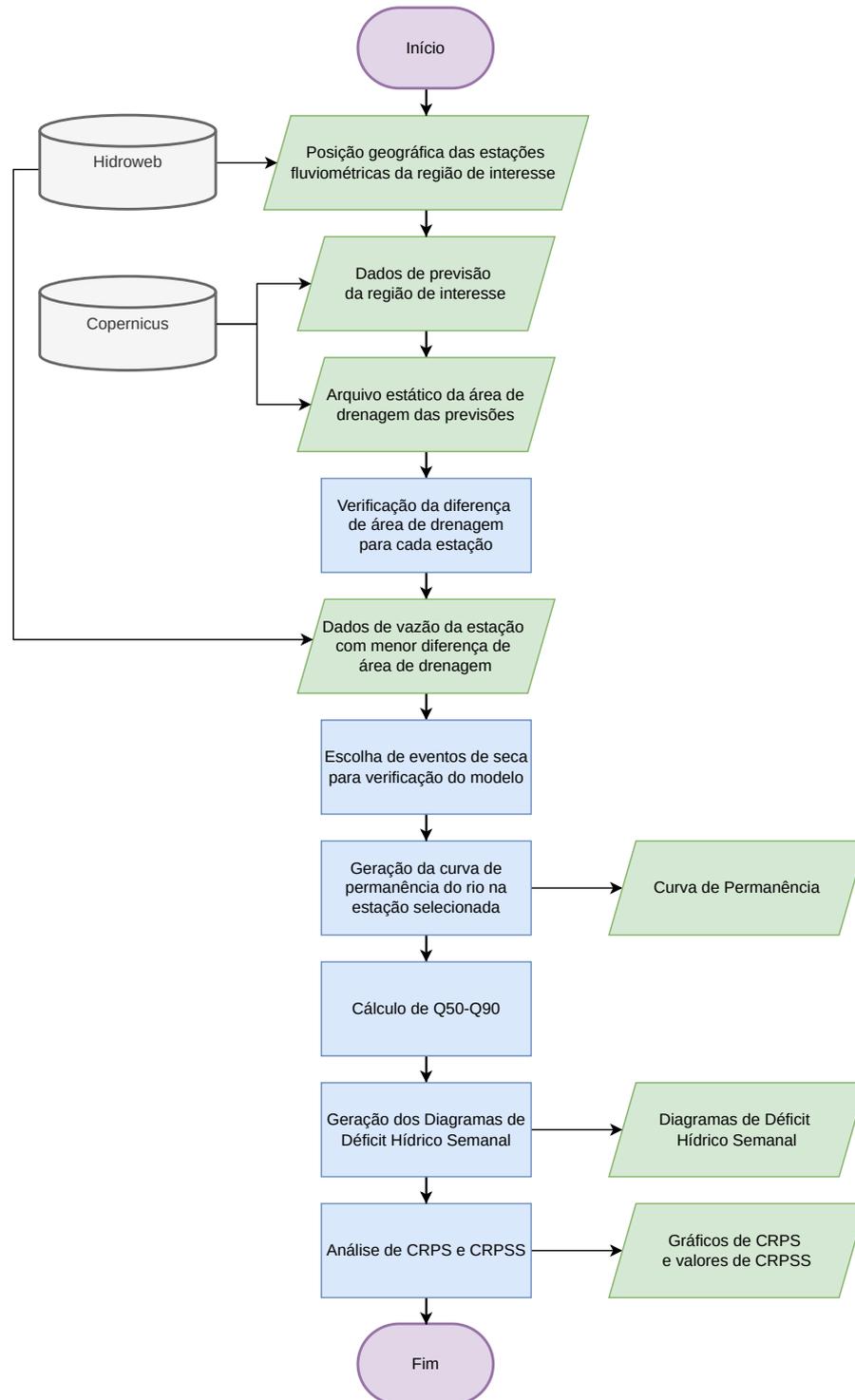


Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada

Inicialmente, foram obtidos os dados de estações fluviométricas no Rio dos Sinos. Uma estação fluviométrica é um posto de observação das variáveis hidrológicas de um rio. Através dela são realizadas medições de nível, vazão e velocidade do escoamento. Há uma variação espacial dessas grandezas, o que exige a distribuição de diversos postos de

medição ao longo do curso de um rio para a melhor caracterização da bacia hidrográfica estudada.

O Portal HidroWeb² mantido pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) disponibiliza os dados de estações fluviométricas a nível nacional. Foram encontradas três estações fluviométricas ativas no Rio dos Sinos com dados de medição de vazão diários. As estações são: Taquara Montante, Campo Bom e São Leopoldo.

Os dados de previsão do modelo GloFAS estão disponíveis na página eletrônica do *Copernicus Climate Data Store* (CDS)³. Junto aos dados de previsão, deve obter-se o arquivo estático de área de drenagem, chamado *UpArea*. Este arquivo relaciona a latitude e longitude do dado de previsão à sua área de drenagem correspondente no modelo. Para a análise de resultados, foi necessário selecionar a estação com menor diferença entre sua área de drenagem informada pelo HidroWeb e a área de drenagem do ponto mais próximo no arquivo estático do GloFAS.

Recomenda-se uma diferença de áreas inferior a 10%. Esta verificação é vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Verificação da área de drenagem para as três estações encontradas

Nome da Estação	Hidroweb		GloFAS		Diferença (%)
	Lat. X Lon (°)	Área de drenagem (km ²)	Lat x Lon (°)	Área de drenagem (km ²)	
Taquara Montante	-29,72 x -50,73	1460	-29,75 x -50,75	99	93,16
Campo Bom	-29,69 x -51,05	2900	-29,65 x -51,05	2700	6,89
São Leopoldo	-29,76 x -51,15	3130	-29,75 x -51,15	2999	4,16

A estação selecionada foi a estação São Leopoldo, de código 87382000. Ela está localizada na latitude $-29,76^\circ$ e longitude $-51,15^\circ$, com uma área de drenagem de 3.130 km². Dentre as três estações avaliadas, ela apresentou a menor diferença na área de drenagem em relação ao arquivo estático. A estação selecionada apresentou uma diferença de apenas 4,16%.

A Figura 3 apresenta a vazão histórica dos Rio dos Sinos na estação São Leopoldo para todo o período disponibilizado pelo Portal HidroWeb. O período compreendido é

²<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>

³<https://cds.climate.copernicus.eu>

de julho de 1973 a agosto de 2021. Em 2018, a estação foi conectada a um sistema de telemetria [Agência Nacional de Águas - ANA, 2005].

O histórico de dados da estação selecionada permite a identificação de períodos de seca que podem ser utilizados para a verificação do desempenho do modelo de previsão. Para este trabalho, foram selecionadas as secas mais severas ocorridas entre os anos de 2010 e 2020. Foram selecionados eventos ocorridos nos anos de 2012, 2019 e 2020. Estas secas estão apresentadas na Figura 4.

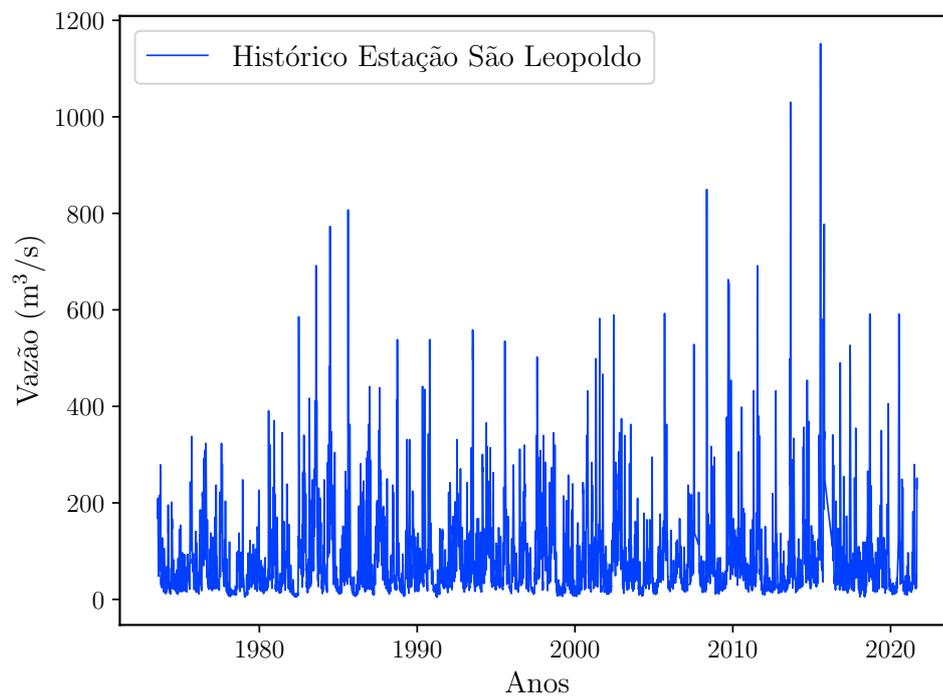


Figura 3 – Série histórica de vazões do Rio dos Sinos na estação São Leopoldo

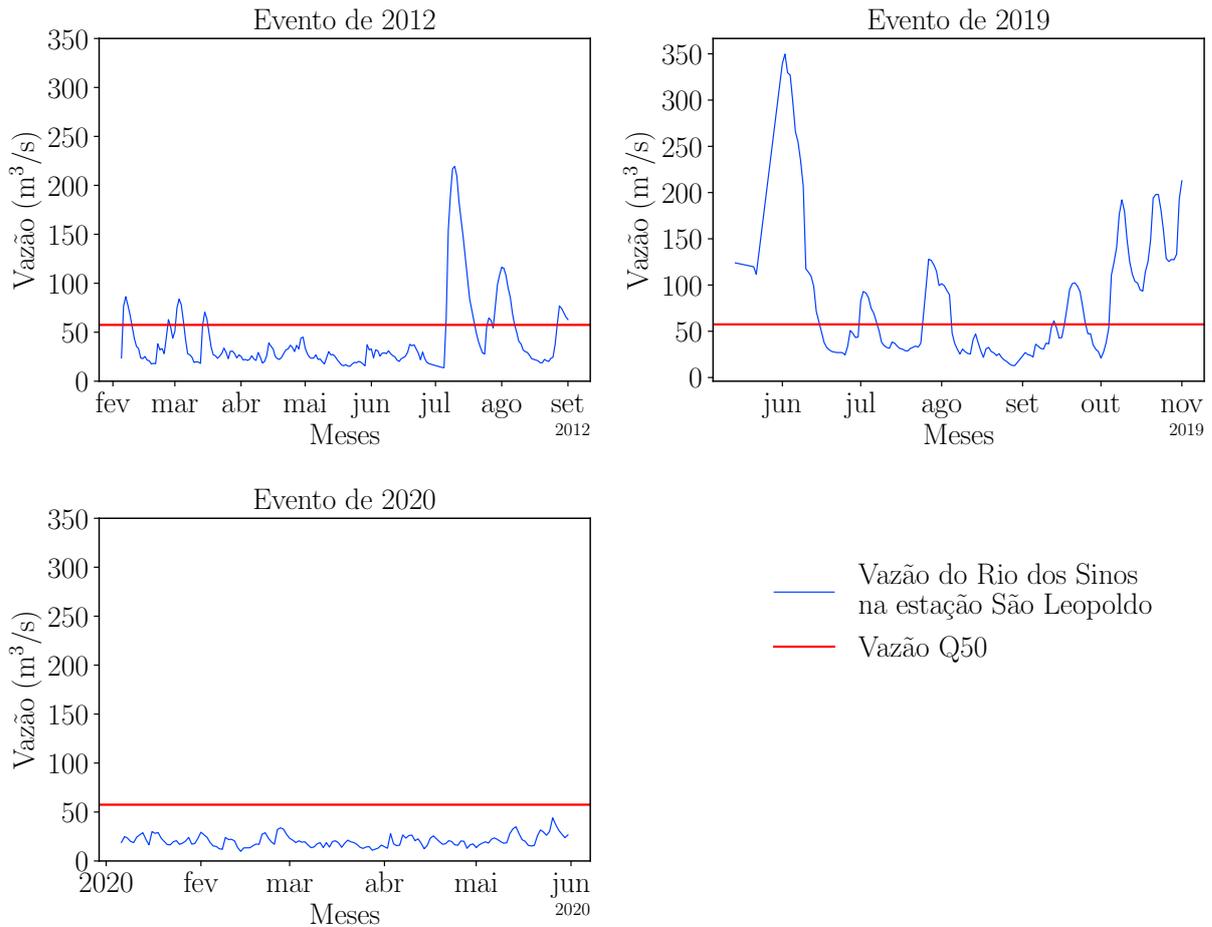


Figura 4 – Eventos de seca dos anos de 2012, 2019 e 2020 selecionados para a análise do modelo

Observa-se que mesmo em períodos de seca o rio apresentou variações abruptas de vazão, com exceção do ano de 2020 quando manteve uma vazão abaixo de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ durante todo o evento de seca.

O passo seguinte da metodologia foi a geração da curva de permanência na estação selecionada. Com os dados de vazão de um rio, a curva de permanência permite uma melhor compreensão do seu comportamento. A curva de permanência expressa a relação entre as vazões atingidas e a frequência com que cada vazão é igualada ou superada [Collischonn e Dornelles, 2013]. Com a curva gerada, podem ser calculadas vazões de referência como os Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} e Q_{80} . Por exemplo, uma vazão igualada ou superada 50% do tempo é chamada de Q_{50} .

A Figura 5 apresenta a curva de permanência gerada com base na série histórica da estação, de 1973 a 2021.

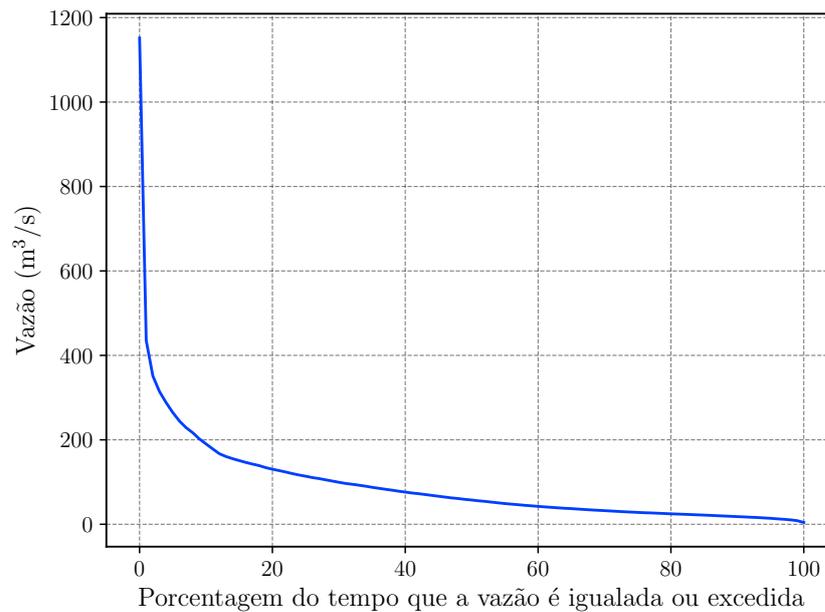


Figura 5 – Curva de permanência do Rio dos Sinos na estação São Leopoldo

Da curva de permanência extraíram-se os valores de vazão de referência Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} e Q_{80} . Na Tabela 2 estão listados os percentis utilizados.

Tabela 2 – Valores dos percentis utilizados

Percentil	Vazão (m³/s)
Q_{50}	57,48
Q_{60}	42,34
Q_{70}	32,28
Q_{80}	24,73

As vazões de referência, juntamente com as previsões do modelo nos períodos de seca, foram utilizadas para a construção dos diagramas de déficit hídrico semanal. Nos diagramas, o déficit hídrico significa uma vazão inferior a um determinado limiar.

Os diagramas de déficit hídrico são uma matriz, em que as linhas representam uma sequência de previsões e as colunas representam o horizonte de previsão. Os diagramas apresentam a porcentagem dos resultados de um conjunto previsto que estão abaixo do limiar selecionado, dentro da semana avaliada. As porcentagens estão associadas a uma escala de cor, como verde (menor probabilidade de ocorrência) a vermelho (alta probabilidade de ocorrência), por exemplo. Os diagramas permitem uma melhor visualização da persistência dos resultados de uma previsão.

Em seguida, a acurácia do modelo foi analisada calculando-se o *Continuous Rank Probability Score* (CRPS). O CRPS é uma medida de desempenho muito utilizada para previsões probabilísticas de uma observação escalar [Wilks, 2011]. É uma medida quadrática da diferença da função distribuição acumulada (FDA) da previsão e da FDA empírica da observação [Zamo e Naveau, 2018]. Neste trabalho, o CRPS foi aplicado aos valores de vazão das previsões. A Equação 1 apresenta o cálculo do CRPS [Wilks, 2011].

$$\text{CRPS} = \int_{-\infty}^{+\infty} [F(y) - F_o(y)]^2 dy \quad (1)$$

onde

$$F_o(y) = \begin{cases} 0, & y < o \\ 1, & y \geq o \end{cases} \quad (2)$$

Em que F é a probabilidade acumulada da previsão, e F_o é a probabilidade acumulada da observação. F_o assume o valor de 0 quando o y é inferior à observação, e 1 quando o y é superior à observação. O CRPS tem uma orientação negativa, o que significa que menores valores de CRPS indicam melhores resultados de previsão.

A avaliação da destreza do modelo pôde ser realizada através do cálculo do *Continuous Ranked Probability Skill Score* (CRPSS). O CRPSS permite a comparação de dois modelos, avaliando percentualmente o quanto um modelo é superior ao outro. A Equação 3 apresenta o cálculo do CRPSS [Alfieri et al., 2013].

$$\text{CRPSS} = \frac{\overline{\text{CRPS}}_{\text{ref}} - \overline{\text{CRPS}}}{\overline{\text{CRPS}}_{\text{ref}}} \times 100 \quad (3)$$

Onde $\overline{\text{CRPS}}$ é a média do CRPS do modelo a ser avaliado e o $\overline{\text{CRPS}}_{\text{ref}}$ é a média do CRPS do modelo de referência. O CRPSS positivo significa que o modelo avaliado apresenta resultados melhores do que o modelo utilizado como referência.

Com as Equações 1 e 3 calculou-se o CRPS e o CRPSS. Para o cálculo do CRPSS neste trabalho, utilizou-se como referência o modelo Q_{50} , que assume uma vazão igual ao Q_{50} durante todo o tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram analisadas as previsões do GloFAS-sazonal para as secas ocorridas no Rio do Sinos durante os anos de 2012, 2019 e 2020. As previsões foram comparadas com as medições disponíveis no Portal HidroWeb da ANA.

Foram desenvolvidos diagramas de déficit hídrico semanal para a avaliação das previsões do modelo. Os números contidos no diagrama representam o percentual de resultados do conjunto de previsão que são inferiores à vazão de referência selecionada para comparação. As linhas intituladas "Observado" indicam se a média semanal das vazões é superior ou inferior à vazão de referência. A cor verde significa uma média superior à vazão de referência, e a cor vermelha significa uma média inferior.

A Figura 6a apresenta os diagramas de déficit hídrico semanal para quatro previsões, iniciadas nos meses de março, abril, maio e junho de 2012, comparando-as aos Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} e Q_{80} do Rio dos Sinos.

Na Figura 6 percebe-se que as previsões apresentaram melhores resultados quando iniciadas após o início do evento da seca. Por exemplo, as previsões iniciadas em abril, maio e junho atingiram um maior percentual do conjunto abaixo dos valores de referência. Isso era esperado uma vez que o modelo possuía a informação do evento já em curso. Os conjuntos previstos apresentaram seus maiores percentuais quando comparados ao Q_{50} , diminuindo progressivamente nos diagramas seguintes - Q_{60} , Q_{70} e Q_{80} . No entanto, o Q_{50} representa a mediana dos valores medidos historicamente pela estação, e as previsões inferiores a ele não significam que houve uma previsão correta do evento.

Observa-se na Figura 6a que o GloFAS não atingiu percentuais acima de 50% durante todo o evento de seca. Dentre as quatro previsões, a iniciada em março apresentou o pior resultado, com apenas 19% do conjunto abaixo do Q_{50} na primeira semana e 41% na segunda semana. As previsões iniciadas em abril, maio e junho iniciaram com 49% do conjunto abaixo do Q_{50} e apresentaram uma tendência de piora na previsão para as semanas seguintes. Observa-se na Figura 6b que as previsões iniciadas em abril, maio e junho iniciaram com o mesmo percentual do conjunto abaixo também do Q_{60} . Porém, na Figura 6c apenas a previsão iniciada no mês de abril apresentou 48% do conjunto da primeira semana abaixo do Q_{70} .

A Figura 7 apresenta as variações das previsões para o ano de 2012 iniciadas em março, abril, maio e junho.

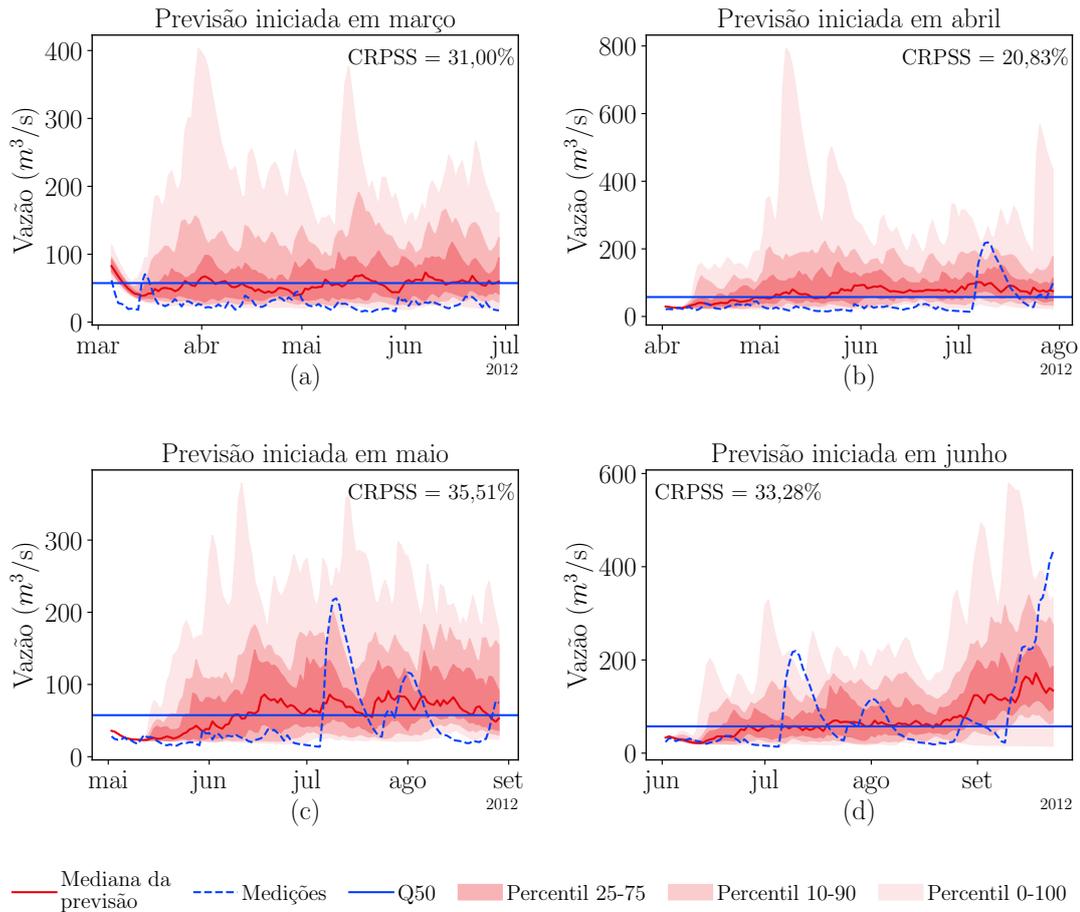


Figura 7 – Variação da previsão por conjunto do modelo GloFAS e dados medidos para comparação no ano de 2012.

Na Figura 7 o início de cada previsão apresentou pouca variação. Esta variação aumentou expressivamente quando o horizonte de previsão ultrapassou duas semanas. Também nota-se uma grande amplitude do Percentil 0 – 100 quando comparado aos outros dois percentis, e variações abruptas de resultados entre períodos próximos. O modelo GLoFAS não apresentou um aumento constante da incerteza à medida em que aumentou-se o horizonte de previsão, como era esperado. Percebe-se, principalmente nas Figuras 7b e 7d, que não houve uma tendência de aumento da amplitude dos percentis com a passagem do tempo. Em relação à destreza do modelo, a Figura 7 apresenta o valor do CRPSS em relação ao Q_{50} . Para esse ano a previsão do GloFAS foi superior a um modelo que assume o valor de Q_{50} para todo o ano em 35,51% no melhor caso e 20,83% no pior.

A seguir, na Figura 8, é apresentada a análise para o ano de 2019.

O evento de seca ocorrido em 2019 foi mais moderado do que o evento de 2012. Novamente, é possível observar os maiores percentuais no diagrama da Figura 8a. As previsões para o evento de 2019 tiveram um pior desempenho quando comparadas às previsões de 2012, atingindo percentuais mais baixos de forma geral. Isso indica que o modelo fornece melhores resultados para eventos mais extremos e contínuos, não prevendo flutuações corretamente. Os percentuais diminuíram abruptamente entre diagramas, como no caso da previsão iniciada em agosto que apresentou 50% do conjunto com vazões abaixo do Q_{50} na sua segunda semana, e que na Figura 8b apresentou uma redução para apenas 6%. As semanas seguintes demonstraram a mesma tendência. Isso significa que uma grande parte dos conjuntos previu vazões entre Q_{50} e Q_{60} , não prevendo a seca. A ineficácia do modelo na previsão do evento de 2019 é confirmada na Figura 8c, cujos percentuais não superaram 10%, mesmo em períodos de três semanas com vazão observada abaixo do Q_{70} . Na Figura 8d nenhuma das previsões atingiu uma vazão inferior ao Q_{80} , observação registrada na semana iniciada no dia 26 de agosto.

A Figura 9 apresenta as variações das previsões para o ano de 2019 iniciadas em maio, junho, julho e agosto.

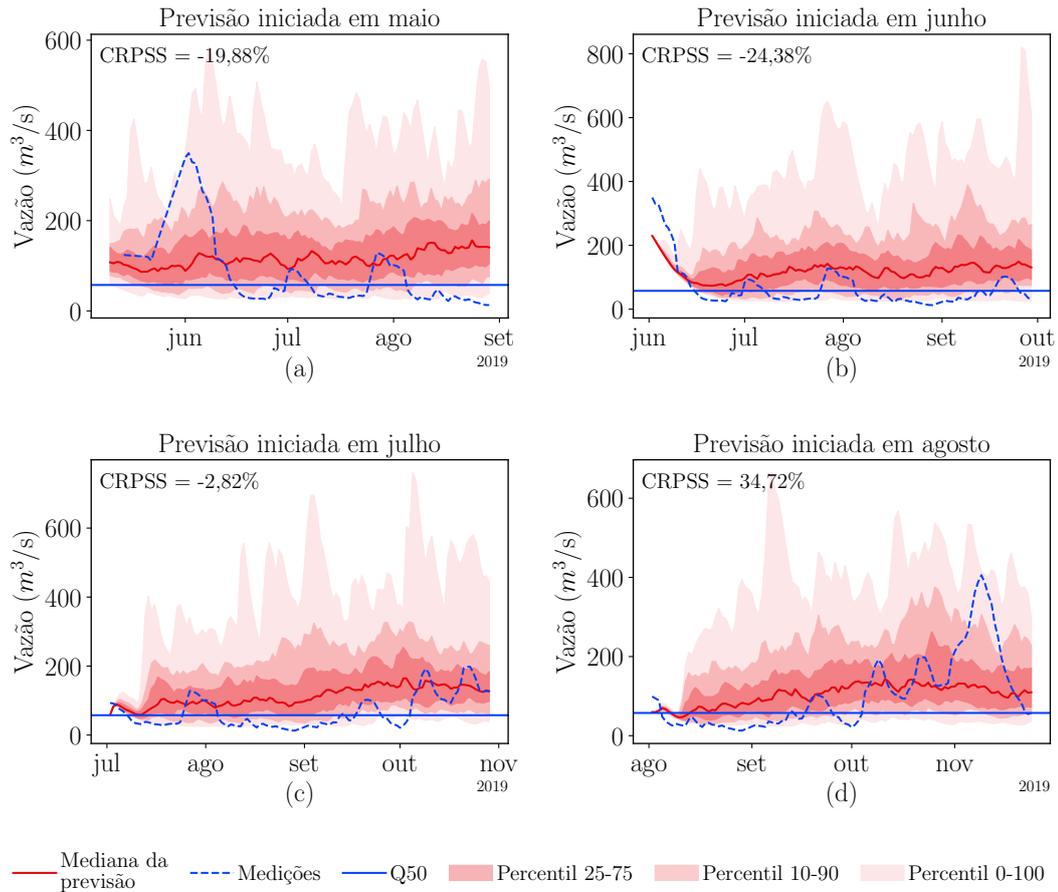
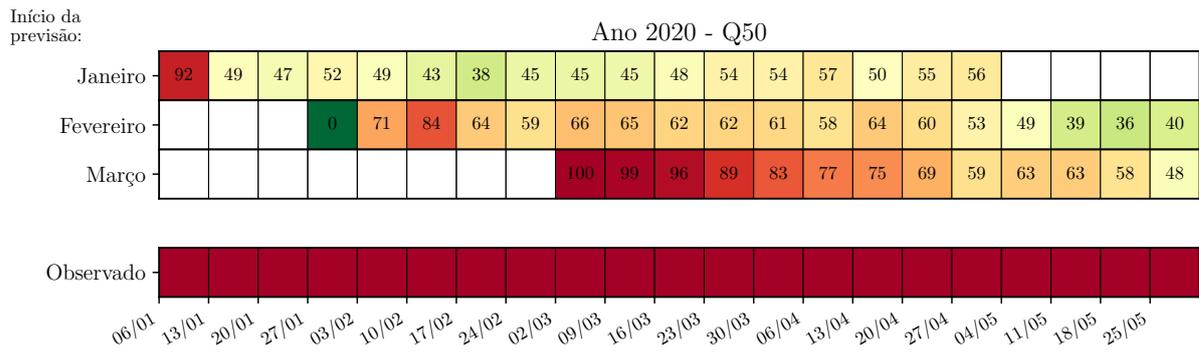


Figura 9 – Variação da previsão por conjunto do modelo GloFAS e dados medidos para comparação no ano de 2019.

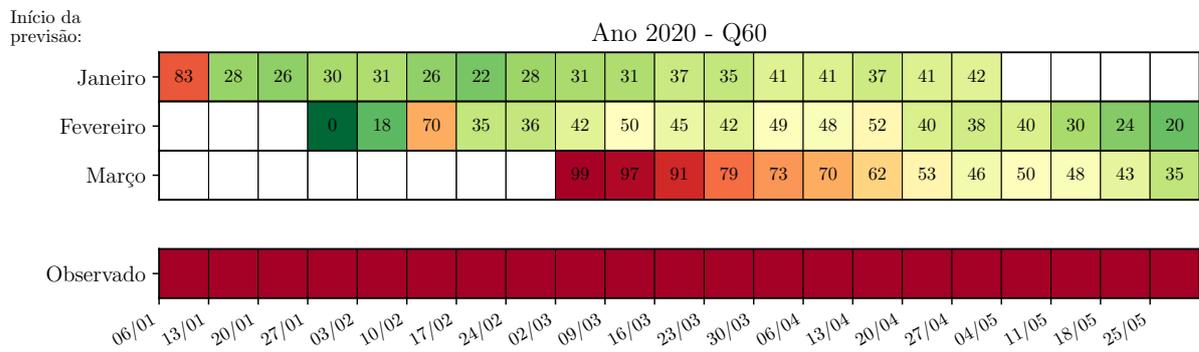
O modelo GloFAS não apresentou um aumento da incerteza à medida em que aumentou-se o horizonte de previsão. Observa-se que as medianas das previsões para todos os meses manteve-se quase inteiramente acima do Q_{50} . O modelo também não foi capaz de prever as flutuações medidas, apresentando flutuações sem sincronia com as das vazões observadas. Na Figura 9a, entre os meses de julho e agosto, as medições apresentaram vazões muito abaixo do Q_{50} , valores que só são atingidos pelo modelo dentro do Percentil 0 – 100. O mesmo é visto nas Figuras 9b, 9c e 9d.

Em relação à destreza do modelo, a Figura 9 apresenta o valor do CRPSS em relação ao Q_{50} . Para esse ano, três previsões do GloFAS obtiveram um resultado pior do que o modelo que assume o valor de Q_{50} para todo o ano. O modelo GloFAS superou em 34,72% o modelo Q_{50} apenas na previsão iniciada em agosto, quando o evento de seca já estava terminando.

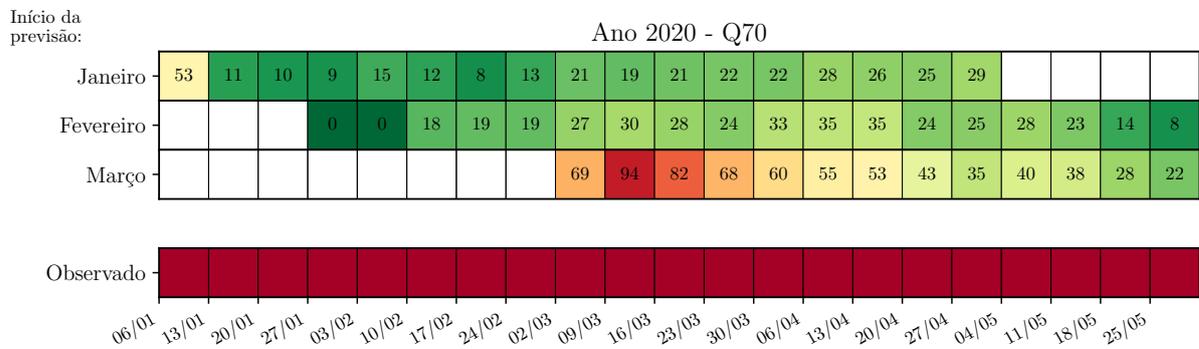
Na Figura 10 abaixo, é apresentada a análise para o ano de 2020.



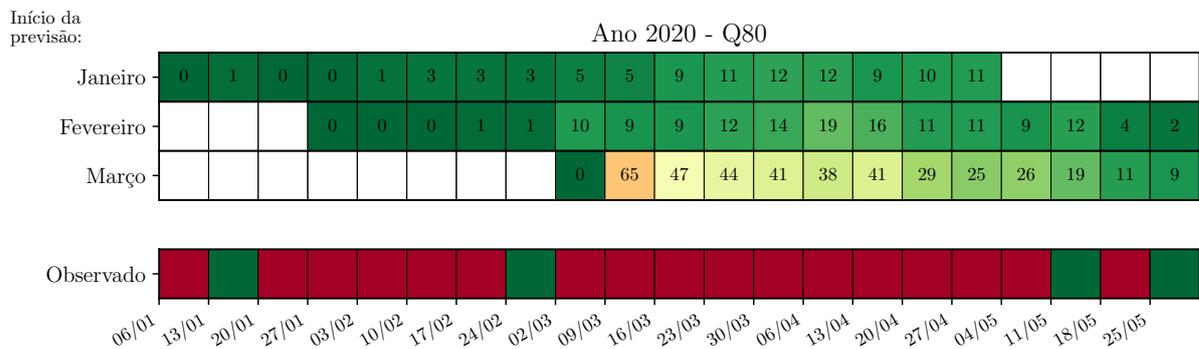
(a) Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2012 em relação ao Q50



(b) Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2012 em relação ao Q60



(c) Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2012 em relação ao Q70



(d) Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2012 em relação ao Q80

Figura 10 – Diagrama de déficit hídrico semanal para o ano de 2020

Em 2020 ocorreu o evento de seca mais extremo dentre os analisados neste trabalho. Observa-se na Figura 10 que todas as vazões medidas neste período são inferiores ao Q_{70} e também são majoritariamente inferiores ao Q_{80} . Neste caso, o modelo previu a seca com maior êxito. Nos anos de 2012 e 2019, o maior percentual encontrado foi de 50%, mas em 2020 os percentuais atingiram 100% e superaram 50% em diversas semanas.

A previsão iniciada em janeiro apresentou seus melhores resultados na sua primeira semana, com percentuais de 92% na Figura 10a, 83% na Figura 10b e 53% na Figura 10c, porém atingiu 0% na Figura 10d. A precisão do modelo reduziu drasticamente quando o horizonte de previsão ultrapassou a primeira semana, e a tendência de previsão de seca não se manteve. A previsão com início em fevereiro não contém as mesmas características da previsão iniciada em janeiro. Ela resultou em maiores erros na sua primeira semana e redução de erros nas semanas seguintes.

A previsão iniciada em março resultou em vazões muito inferiores às previsões anteriores. Ela também difere por apresentar uma variação menos abrupta de percentuais entre semanas consecutivas, o que pode ser visto principalmente nas Figuras 10a e 10b. Esta previsão atingiu os melhores resultados, mantendo percentuais superiores a 40% mesmo quando comparados ao Q_{80} , na Figura 10d. No entanto, deve-se ressaltar que a previsão iniciada em março contém dois meses de seca já ocorrida como informação para a previsão. A divergência de comportamentos nos resultados do GloFAS sugere que o modelo não está apto a prever eventos de seca no Rio dos Sinos de maneira confiável.

A Figura 11 apresenta as variações das previsões para o ano de 2020 iniciadas em janeiro, fevereiro e março.

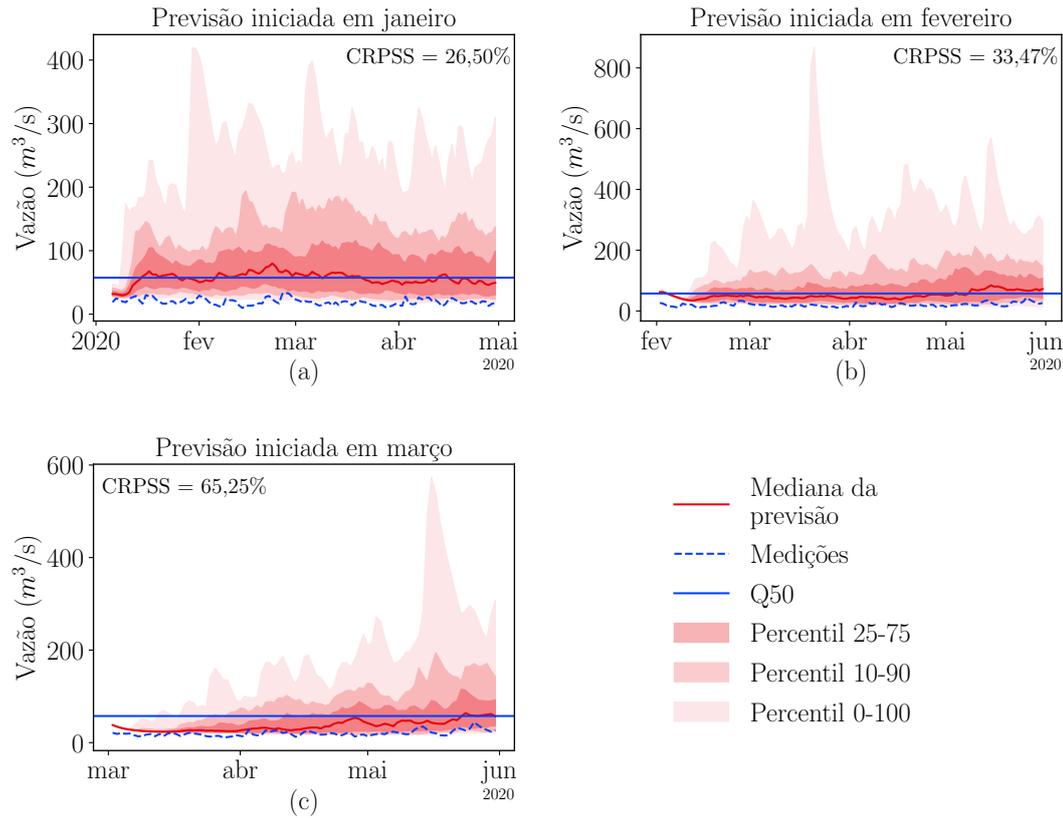
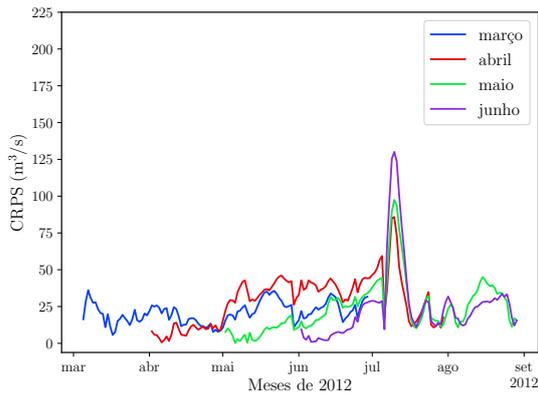


Figura 11 – Variação da previsão por conjunto do modelo GloFAS e dados medidos para comparação no ano de 2020.

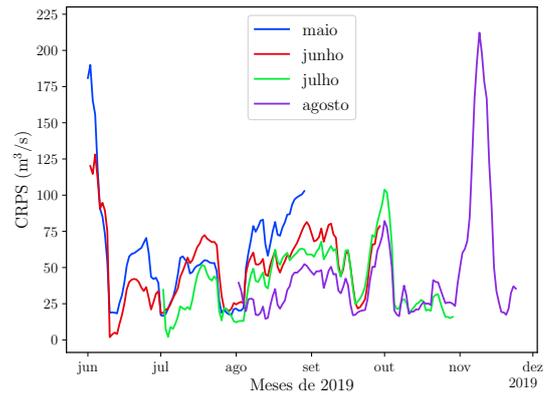
A Figura 11 contém medianas próximas ao Q_{50} . Neste caso, os resultados do modelo tiveram maior proximidade com as vazões observadas no período. A previsão iniciada em março, vista na Figura 11c, foi a única a apresentar um aumento da incerteza com o aumento do horizonte de previsão. Além disso, nas Figuras 11b e 11c, as medianas flutuaram entre o Q_{50} e as vazões medidas. Isso indica que o modelo previu um evento de seca, ainda que parcialmente.

Nesse ano, o modelo GloFAS superou o modelo Q_{50} em todas as suas previsões. O CRPSS atingiu valores de 26,50% no seu pior caso e 65,25% no seu melhor caso. Destaca-se que o melhor resultado em 2020 é consequência da ausência de picos de vazão nesse evento de seca.

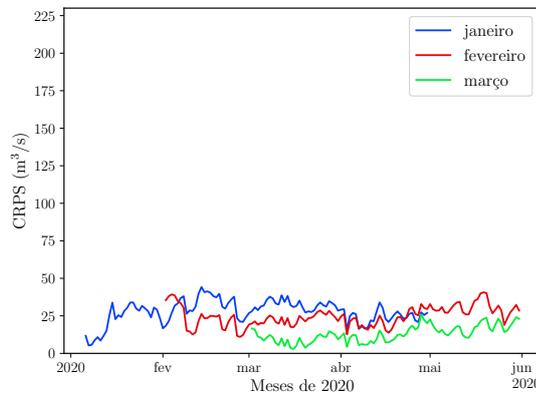
A Figura 12 apresenta o valor do CRPS para as diferentes previsões nos anos de 2012, 2019 e 2020. As três imagens são mantidas com a mesma escala para fins de comparação.



(a) CRPS 2012



(b) CRPS 2019



(c) CRPS 2020

Figura 12 – Variação dos CRPS em 2012, 2019 e 2020

Na Figura 12a percebe-se que as quatro previsões iniciam com um CRPS abaixo de 25 e flutuam em torno deste até a primeira semana de julho, onde nota-se um pico do CRPS para as três previsões contidas neste período. O resultado está de acordo com o observado na Figura 7c, onde o modelo não foi capaz de prever um súbito aumento da vazão ocorrido no início do mês de julho. Na Figura 12b há dois picos do CRPS, no início de junho e início de novembro. Esses picos estão de acordo com os picos de vazão ocorridos no período, observados na Figura 9. As previsões para o ano de 2020 apresentaram os menores valores de CRPS dentre os três anos. Porém, pode-se observar pela Figura 11 que 2020 não apresentou picos na vazão medida como nos anos de 2012 e 2019.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise do modelo GloFAS sazonal para previsão de secas no Rio dos Sinos (RS) com estudos de casos de 2012, 2019 e 2020. Foram coletados dados de vazão do portal Hidroweb para a estação São Leopoldo com amostragem diária. As previsões com horizonte de 4 meses foram comparadas com os percentis Q_{50} , Q_{60} , Q_{70} e Q_{80} através de diagramas de déficit hídrico semanal e gráficos de variação da previsão por conjunto. Para o ano de 2012, o modelo apresentou um CRPSS de 35,51% no melhor caso e 20,83% para o pior caso. Na seca de 2019, mais moderada do que a de 2012, o modelo não foi capaz de prever o evento em nenhum dos percentis, apresentando CRPSS negativo em 3 das 4 previsões analisadas. O ano de 2020 apresentou a seca mais severa entre os três anos avaliados e também o melhor desempenho do modelo GloFAS. No entanto, a capacidade de previsão diminuiu com o aumento de horizonte e o modelo apresentou resultados melhores quando a seca já havia iniciado. Para os anos testados o modelo GloFAS não apresentou uma qualidade de previsão que justifique seu uso para previsão de secas no Rio dos Sinos. Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se explorar o modelo GloFAS em outras bacias do Brasil, preferencialmente com vazões mais altas e maiores áreas de drenagem. Além disso, sugere-se explorar a utilização de percentis calculados independentemente para cada mês a ser avaliado.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas - ANA. **Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas**. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>, 2005.

Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., e Pappenberger, F. GloFAS—global ensemble streamflow forecasting and flood early warning, **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 17(3), p. 1161–1175, 2013.

Bischiniotis, K., van den Hurk, B., Zsoter, E., Coughlan de Perez, E., Grillakis, M., e Aerts, J. C. Evaluation of a global ensemble flood prediction system in Peru, **Hydrological Sciences Journal**, vol. 64(10), p. 1171–1189, 2019.

Climate Data Store - CDS. **Seasonal reforecasts of river discharge and related data by the Global Flood Awareness System, v3.1**. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.0aa9b9dd?tab=overview>, 2021.

Collischonn, W. e Dornelles, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. vol. 1, 2013.

Emerton, R., Zsoter, E., Arnal, L., Cloke, H. L., Muraro, D., Prudhomme, C., Stephens, E. M., Salamon, P., e Pappenberger, F. Developing a global operational seasonal hydro-meteorological forecasting system: GloFAS-Seasonal v1. 0, **Geoscientific Model Development**, vol. 11(8), p. 3327–3346, 2018.

Emerton, R. E., Stephens, E. M., e Cloke, H. L. What is the most useful approach for forecasting hydrological extremes during El Niño?, **Environmental Research Communications**, vol. 1(3), p. 031002, 2019.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Convivência com a seca**. <https://www.embrapa.br/tema-convivencia-com-a-seca/perguntas-e-respostas>, 2017.

Field, C. B. e Barros, V. R. **Climate change 2014—Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects**. Cambridge University Press, 2014.

Mishra, A. K. e Singh, V. P. Drought modeling—A review, **Journal of Hydrology**, vol. 403(1-2), p. 157–175, 2011.

Plano Sinos. **Plano de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. Pró-Sinos**, 2014.

Raikes, J., Smith, T. F., Jacobson, C., e Baldwin, C. Pre-disaster planning and preparedness for floods and droughts: A systematic review, **International Journal of Disaster Risk Reduction**, vol. 38, p. 101207, 2019.

Revista IHU - Online. **Secas e enchentes: dois sintomas da perda de 70úmidas na Bacia do Rio dos Sinos. Entrevista especial com Rafael Gomes de Moura**. <https://www.ihu.unisinos.br/159-noticias/entrevistas/559521-secas-e-enchentes-dois-sintomas-da-perda-de-areas-umidas-na-bacia-do-rio-do> 2016.

Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **G020 - Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos**. <https://sema.rs.gov.br/g020-bh-sinos>, 2014.

Wilks, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. vol. 100. Academic press, 2011.

Zamo, M. e Naveau, P. Estimation of the continuous ranked probability score with limited information and applications to ensemble weather forecasts, **Mathematical Geosciences**, vol. 50(2), p. 209–234, 2018.