



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**ESTIMATIVA E ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA À VARIAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE MANNING NA PREVISÃO DE AFLUÊNCIA AO  
RESERVATÓRIO DE ITAIPU**

**LAURA JACQUES LINS**

Foz do Iguaçu

2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

**ESTIMATIVA E ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA À VARIAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE MANNING NA PREVISÃO DE AFLUÊNCIA AO  
RESERVATÓRIO DE ITAIPU**

**LAURA JACQUES LINS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

Orientador: Dr. Jiam Pires Frigo.

Foz do Iguaçu

2025

LAURA JACQUES LINS

**ESTIMATIVA E ANÁLISE DA INCERTEZA ASSOCIADA À VARIAÇÃO DO  
COEFICIENTE DE MANNING NA PREVISÃO DE AFLUÊNCIA AO RESERVATÓRIO  
DE ITAIPU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Jiam Pires Frigo  
UNILA

---

Mariana Maria Werlang  
ITAIPU

---

Prof. Mara Rubia Silva  
UNILA

---

Daniel Firmo Kazay  
ITAIPU

Foz do Iguaçu, 14 de março de 2025.

Aos que caminharam comigo nesta jornada, compartilhando desafios e vitórias. Lembrando-me que o esforço vale a pena e que nenhuma conquista é alcançada sozinha.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, meu pai Isaias e minha mãe Silvana por todo o suporte durante minha graduação, compreendendo minha dedicação e os desafios desse percurso. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse concluir esta etapa, e sou grata por todo o incentivo e compreensão ao longo dessa jornada. Agradeço as minhas irmãs Leila e Lívia pela companhia durante esse tempo, a companhia de vocês foi essencial para dias mais leves. Agradeço ao meu companheiro Thiago por todo apoio, incentivo e ajuda durante este período, que foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios diários da universidade.

Quero agradecer aos meus orientadores, Mariana e Daniel, por me darem a oportunidade de estagiar em uma área tão incrível. Ao longo destes dois anos, vocês me ajudaram com muita dedicação e paciência, sempre dispostos a me orientar no que fosse preciso. Sou muito grata pelo conhecimento que compartilharam comigo e pelo apoio ao longo deste trabalho. Sou muito grata por tudo que aprendi com vocês. Gostaria de agradecer ao setor da OPSH.DT por todos os ensinamentos e pelo tempo dedicado durante o meu estágio. Agradeço a todos pela paciência, apoio e pela oportunidade de aprender tanto com todas as atividades realizadas. Sem dúvida, essa vivência foi uma das partes mais enriquecedoras da minha graduação.

Gostaria de agradecer ao meu professor orientador Jiam, pela orientação e apoio ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. E pela constante disposição em escutar e apoiar os alunos, especialmente nos períodos mais difíceis da graduação. Sua disposição para auxiliar e compartilhar conhecimentos foi importante para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu aprendizado durante o curso.

Quero agradecer às amigas que fiz na faculdade, que foram muito importantes para me ajudar a passar por tantas dificuldades durante estes anos. Sou muito grata por poder contar com cada um de vocês, que tornaram essa experiência muito mais leve e significativa. Sem vocês, certamente, essa trajetória teria sido muito mais desafiadora. Quero agradecer também a Michelle, que me acompanhou ao longo de todo o meu curso. Sua ajuda foi essencial para que eu conseguisse lidar com os altos e baixos e para que eu fosse capaz de lidar com todos os profissionais difíceis que cruzei nesta universidade.

*"A maior prova de coragem é suportar as derrotas sem perder o ânimo."*

***Robert Ingersoll***

## RESUMO

Na utilização de modelos matemáticos para o cálculo de afluência é necessário que parâmetros sejam ajustados com as características da área, de modo que incertezas sejam propagadas na estimativa. Sendo assim, torna-se fundamental a análise de parâmetros que não podem ser mensurados, como o coeficiente de Manning. Assim, o objetivo deste estudo é analisar o efeito da oscilação do coeficiente de Manning nas propagações de ondas de cheias, através de um exemplo simplificado, desenvolver uma representação da incerteza na previsão de afluência ao reservatório de Itaipu e avaliar seu desempenho. Para demonstrar esse objetivo, foi realizada uma prova de conceito replicando os fenômenos que foram trabalhados por meio de dois sistemas já implementados: o modelo HEC-RAS, através da rede do rio Paraná calibrada a montante de Itaipu, e o sistema FEWS-Itaipu. Com isso, foi calibrada uma faixa representativa da incerteza e, posteriormente, validados os resultados para diferentes períodos. A faixa calibrada, também, foi implementada na previsão de afluências através de equações lineares, onde foi possível propor uma nova envoltória de previsão, que, em seguida, foi avaliada com métricas de desempenho. A partir disso, a faixa calibrada mostrou maior variabilidade em períodos de cheia, abrangendo melhor o escoamento nestes eventos. A avaliação com as métricas de Brier Score e Brier Skill Score demonstrou que a faixa proposta performou ligeiramente superior ao modelo original. A implementação da faixa utilizando equações lineares apresentou baixa correlação entre o modelo original e as simulações desenvolvidas, devido à complexidade em reescrever o comportamento de modelos hidrodinâmicos de forma linear. As envoltórias propostas mostraram ser mais amplas para os primeiros dias do horizonte de previsão, com relação a envoltória original, e as métricas de Brier Score, Brier Skill Score e Rank Histogram mostraram que os dados observados foram representados com maior frequência nos primeiros dias do horizonte de previsão. Dessa forma, os resultados ressaltam a importância do estudo e análise da incerteza na previsão de afluências, proporcionando uma representação da incerteza na propagação de ondas. Sendo assim, este estudo contribui ao explorar os impactos da variabilidade do coeficiente de Manning e propõe uma metodologia simplificada para incorporar a incerteza na previsão de afluências ao reservatório de Itaipu.

**Palavras-chave:** Coeficiente de Manning; Propagação de Ondas de Cheia; Previsão de Afluências.

## RESUMEN

Al utilizar modelos matemáticos para calcular los caudales de entrada, los parámetros deben ajustarse a las características de la zona, de modo que se propaguen incertidumbres en la estimación. Por lo tanto, se hace imprescindible analizar parámetros que no se pueden medir, como el coeficiente de Manning. Así, el objetivo de este estudio es analizar el efecto de la oscilación del coeficiente de Manning en la propagación de ondas de crecida, a través de un ejemplo simplificado, para desarrollar una representación de la incertidumbre en la predicción del afluente al embalse de Itaipú y evaluar su desempeño. Para demostrar este objetivo, se realizó una prueba de concepto replicando los fenómenos que se trabajaron a través de dos sistemas ya implementados: el modelo HEC-RAS, a través de la red del río Paraná calibrada aguas arriba de Itaipú, y el sistema FEWS-Itaipú. Con ello se calibró un rango representativo de incertidumbre y, posteriormente, se validaron los resultados para diferentes periodos. El rango calibrado también fue implementado en el pronóstico de caudales mediante ecuaciones lineales, donde fue posible proponer una nueva envolvente de pronóstico, que luego fue evaluada con métricas de desempeño. A partir de esto, el rango calibrado mostró mayor variabilidad en los periodos de inundaciones, cubriendo mejor el caudal en estos eventos. La evaluación con las métricas Brier Score y Brier Skill Score demostró que el rango propuesto funcionó ligeramente mejor que el modelo original. La implementación del rango mediante ecuaciones lineales presentó baja correlación entre el modelo original y las simulaciones desarrolladas, debido a la complejidad en reescribir el comportamiento de los modelos hidrodinámicos de forma lineal. Se demostró que las envolventes propuestas eran más amplias durante los primeros días del horizonte de pronóstico, en comparación con la envolvente original, y las métricas Brier Score, Brier Skill Score y Rank Histogram mostraron que los datos observados estaban representados con mayor frecuencia en los primeros días del horizonte de pronóstico. Así, los resultados resaltan la importancia de estudiar y analizar la incertidumbre en la predicción de las entradas, proporcionando una representación de la incertidumbre en la propagación de las olas. Por ello, este estudio contribuye a explorar los impactos de la variabilidad del coeficiente de Manning y propone una metodología simplificada para incorporar la incertidumbre en la previsión de afluencias al embalse de Itaipú.

**Palabras clave:** Coeficiente de Manning; Propagación de ondas de inundación; Previsión de caudales.

## ABSTRACT

When using mathematical models to calculate inflow, parameters must be adjusted to the characteristics of the area, so that uncertainties are propagated in the estimate. Therefore, it is essential to analyze parameters that cannot be measured, such as the Manning coefficient. Thus, the objective of this study is to analyze the effect of the oscillation of the Manning coefficient on the propagation of flood waves, through a simplified example, to develop a representation of the uncertainty in the prediction of inflow to the Itaipu reservoir and to evaluate its performance. To demonstrate this objective, a proof of concept was carried out by replicating the phenomena that were worked on using two systems already implemented: the HEC-RAS model, through the Paraná River network calibrated upstream of Itaipu, and the FEWS-Itaipu system. With this, a representative range of uncertainty was calibrated and, subsequently, the results were validated for different periods. The calibrated range was also implemented in the prediction of inflows through linear equations, where it was possible to propose a new prediction envelope, which was then evaluated with performance metrics. From this, the calibrated range showed greater variability in flood periods, better covering the flow in these events. The evaluation with the Brier Score and Brier Skill Score metrics demonstrated that the proposed range performed slightly better than the original model. The implementation of the range using linear equations showed low correlation between the original model and the simulations developed, due to the complexity of rewriting the behavior of hydrodynamic models in a linear way. The proposed envelopes proved to be wider for the first days of the forecast horizon, in relation to the original envelope, and the Brier Score, Brier Skill Score and Rank Histogram metrics showed that the observed data were represented more frequently in the first days of the forecast horizon. Thus, the results highlight the importance of studying and analyzing uncertainty in inflow forecasting, providing a representation of the uncertainty in wave propagation. Therefore, this study contributes by exploring the impacts of the variability of the Manning coefficient and proposes a simplified methodology to incorporate uncertainty in the forecasting of inflows to the Itaipu reservoir.

**Key words:** Manning Coefficient; Flood Wave Propagation; Inflow Forecast.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo conceitual de uma previsão por conjunto. ....	24
Figura 2 - Exemplo de previsões por conjunto na forma de probabilidades. ....	25
Figura 3 - Comportamentos de Rank Histograms. ....	29
Figura 4 - Geometria da seção. ....	30
Figura 5 - Variações observadas na vazão. ....	31
Figura 6 - Variações observadas no nível. ....	32
Figura 7 - Rede HEC-RAS. ....	33
Figura 8 - Fluxo do método. ....	34
Figura 9 - Fluxograma implementação. ....	35
Figura 10 - Resultados obtidos para o período analisado. ....	37
Figura 11 - Evento de cheia. ....	38
Figura 12 – Gráfico de dispersão entre o modelo 1.0 e 0.8. ....	40
Figura 13 – Gráfico de dispersão entre o modelo 1.0 e 1.2. ....	40
Figura 14 – Faixa de previsão proposta. ....	41
Figura 15 – Comparativo entre envoltórias. ....	41
Figura 16 – Frequência de ocorrência. ....	42
Figura 17 - Resultados Brier Score. ....	44
Figura 18 - Resultado Brier Skill Score. ....	45
Figura 19 - Resultados Rank Histogram. ....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BS	Brier Score
BSS	Brier Skill Score
EVS	Ensemble Verification Service
GLUE	Generalized likelihood Uncertainty Estimation
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MGB	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
ONS	Operador Nacional Sistema Elétrico
OPSH.DT	Divisão de estudos hidrológicos e energéticos
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1.	Objetivo Geral.....	15
2.2.	Objetivos Específicos .....	15
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1.	Coeficiente de Manning .....	16
3.2.	Modelagem Hidrodinâmica .....	18
3.2.1.	HEC-RAS.....	19
3.3.	Modelagem Hidrológica .....	20
3.3.1.	Modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH).....	21
3.4.	Previsão Hidrológica.....	22
3.4.1.	Previsão por ensemble .....	23
3.4.2.	Previsão de Afluências ao reservatório de Itaipu.....	25
3.4.3.	Incertezas na Previsão Hidrológica .....	26
3.5.	Desempenho de previsões .....	27
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>30</b>
4.1.	Prova de conceito.....	30
4.2.	Área de estudo .....	32
<b>5.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
5.1.	Calibração e validação da faixa representativa .....	34
5.2.	Implementação das Faixas.....	35
5.2.1.	Desempenho da envoltória .....	36
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>37</b>
6.1.	Calibração da faixa representativa .....	37
6.1.1.	Desempenho da faixa calibrada .....	38
6.2.	Implementação das faixas .....	39
6.2.1.	Desempenho das envoltórias de previsão .....	42
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica no país ocorre pelo sistema hidro-termo-eólico de grande porte, sendo predominante a geração por usinas hidrelétricas (ONS, 2025), representando 58,9% da geração total no ano de 2023 (EPE, 2024). O conjunto de aproveitamentos hidrelétricos compõe o Sistema Interligado Nacional (SIN), coordenado pelo Operador Nacional do Serviço Elétrico (ONS), cuja fiscalização é realizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANA, 2025; ONS, 2025).

A programação de operação das usinas integrantes do SIN é efetuada considerando a capacidade de armazenamento dos reservatórios (ANA, 2025) e das condições atuais da bacia (Costa; Maceira; Damázio, 2007; Oliveira; Lima, 2016; ONS, 2025). Com o propósito de atender a demanda, otimizar a produção energética diminuindo perdas por vertimentos e reduzir os gastos relacionados à geração térmica suplementar, além de, auxiliar no controle e prevenção de cheias a jusante e à montante das usinas (ANA, 2025; Brianezi, 2015; Fan, 2015; Hidalgo, 2009; Oliveira; Lima, 2016).

A estimativa da vazão afluyente nas usinas integrantes do SIN possui papel importante, para o planejamento da operação e funcionamento eficiente do sistema elétrico brasileiro (Brianezi, 2015; Guilhon; Moreira; Rocha, 2007). Para a previsão de afluência são utilizados modelos matemáticos para caracterizar o comportamento natural de um curso d'água, buscando estimar previsões de vazão para horizontes futuros. Estes modelos, porém, são simplificados e necessitam que parâmetros sejam previamente ajustados com as particularidades de cada bacia (Jardim, 2018; Tucci, 2009).

Os modelos hidrológicos simulam a entrada do escoamento no curso d'água, através de equações simplificadas dos processos do ciclo hidrológico. O modelo hidrodinâmico representa a propagação do escoamento ao longo dos rios e canais, e se dá pelas equações de Saint-Venant, as quais consideram as características geométricas da calha dos rios (Collischonn, 2001; Pontes, 2011; Siqueira, 2022). O conjunto de modelos integra o processo de previsão de afluência, entretanto, um dos desafios encontrados reside na obtenção adequada dos dados de entrada e parâmetros do modelo, bem como a capacidade do mesmo refletir a complexidade dos fenômenos (Fan, 2015; Jardim, 2018).

Dessa forma, torna-se fundamental a análise de parâmetros que não podem ser mensurados, como o coeficiente de Manning. O estudo deste parâmetro permite estimar como ocorrerá a velocidade do escoamento em um canal fluvial, amplamente empregado na calibração de modelagens numéricas (Pappenberger *et al.*, 2005; Teixeira *et al.*, 2018), permitindo maior representatividade e compreensão dos fenômenos durante a estimativa de vazão afluente. No entanto, a calibração deste coeficiente pode ser complexa, uma vez que há influência de vários fatores de acordo com as condições adversas do fluxo (Teixeira *et al.*, 2018).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo analisar os impactos decorrentes da variação do coeficiente de Manning nas propagações de ondas de cheias, visando desenvolver, a partir de uma rede hidráulica pré-determinada, uma representação da incerteza associada a essa propagação na previsão de afluência ao reservatório de Itaipu, através de variações do coeficiente de Manning previamente calibrado.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- a) Analisar, através de um exemplo simplificado, os impactos da variação do coeficiente de Manning na propagação de ondas de cheia.
- b) Desenvolver uma faixa representativa para os diferentes cenários de escoamento que ocorrem ao alterar-se o coeficiente.
- c) Avaliar a confiabilidade da faixa desenvolvida na representação dos fenômenos hidráulicos associados à propagação da afluência.
- d) Melhorar a representatividade da faixa de incertezas da previsão de afluências ao reservatório de Itaipu para os primeiros dias do horizonte de previsão.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Coeficiente de Manning

O coeficiente de Manning é definido por Chow (1959) como um parâmetro que descreve a resistência ao escoamento em canais abertos, devido à rugosidade presente na superfície do canal. Diversos fatores têm influência sobre o parâmetro, como o material que compõe o perímetro do canal, vegetação, irregularidades e alinhamento do canal, obstruções como construções e materiais suspensos, assoreamentos e erosões. O autor argumenta que variações no valor do coeficiente provocam modificações na velocidade do fluxo, especificamente observa-se que valores maiores do coeficiente retardam a velocidade do escoamento.

Para a determinação do parâmetro considera-se que o canal é dividido em seções transversais, adotando um valor uniforme para cada trecho com base em suas características geométricas. Porém, estipular um coeficiente é uma das grandes dificuldades, já que não existe um método exato para escolhê-lo. Chow discute quatro abordagens que auxiliam na definição, como, por exemplo: compreender os fatores que afetam o valor do coeficiente; consultar tabelas da literatura; utilizar parâmetros de canais cujos coeficientes já foram estipulados e definir com procedimentos analíticos através de dados de medições de velocidade ou rugosidade.

Visto a importância do parâmetro na resistência ao escoamento, sua aplicação se dá através da fórmula de Manning, apresentada na equação 1, a qual calcula a velocidade média de escoamento em função das características geométricas do canal (Chow, 1959). A equação empregada de forma indireta em métodos computacionais para análise do escoamento superficial mostra a importância da rugosidade e das propriedades geométricas (Arcement; Schneider, 1989; Chow, 1959; Limerinos, 1970).

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

Onde:

$V$  – Velocidade média do escoamento (m/s);

$n$  – Coeficiente de Manning ( $s \cdot m^{-1/3}$ )

$R_h$  - Raio Hidráulico (m);

$S$  – Declividade (m/m).

O coeficiente tem impacto no tempo de propagação de ondas de cheia e no nível d'água, de modo que quanto maior for a rugosidade do leito e das margens, maior será a dissipação de energia ocasionada pelo atrito (Collischonn, 1997), provocando um escoamento prolongado, com menor velocidade média, e nível d'água elevado. Dessa forma, com o aumento da resistência ao fluxo ocorre o amortecimento e retardo da onda de cheia (Collischonn, 1997), diminuindo a altura máxima da onda no hidrograma e aumentando o tempo de propagação (Cunha; Bezerra; Eleutério, 2023).

O trabalho desenvolvido por Grison *et al.* (2013) analisa dois métodos para estimar o coeficiente de Manning e estudar a variabilidade com a vazão, para a bacia hidrográfica do rio Bugres, no município de Rio Negrinho em Santa Catarina. O primeiro método mencionado, onde foram estimados valores do coeficiente para cada faixa de cota do canal, representou com maior proximidade os valores de vazões medidos em campo. Em contrapartida, o segundo método utilizado, onde foi adotado um único valor do parâmetro, os resultados de vazão foram superestimados. Isso mostra como alterações mínimas nos valores do coeficiente tem impacto no nível e na vazão.

A pesquisa realizada por Alves *et al.* (2017) avaliou a determinação do coeficiente de Manning quando variado com base no nível d'água, comparando com a adoção de um único valor, para a seção de uma estação fluviométrica de Manacapuru, no Rio Solimões no Amazonas. Os resultados obtidos pelo autor apontaram que adotar o parâmetro variando conforme o nível resultou no melhor ajuste aos dados medidos, uma vez que os resultados de vazão obtidos com o coeficiente médio de rugosidade tenderam a indicar eventos mais extremos do que os observados. Esse fato evidencia que a adoção do coeficiente de Manning de forma variável melhora a estimativa de vazão em função do nível.

Dessa forma, o parâmetro de rugosidade desempenha um papel muito importante no estudo do comportamento hidráulico, sendo essencial em modelagens numéricas (Kim *et al.*, 2013). Todo modelo hidráulico deve conter valores calibrados para tal parâmetro, para que seja possível representar as elevações da superfície da água (Kopecki; Schneider; Tuhtan, 2017). É necessário cautela na seleção do parâmetro. Embora o coeficiente seja representativo, não é recomendável utilizar

valores fixos, devido a sua variação de acordo com o nível e a vazão (Grison *et al.*, 2013).

### 3.2. Modelagem Hidrodinâmica

Os modelos hidrodinâmicos representam os principais componentes do escoamento não permanente em rios e canais, fornecendo sua variação no tempo e no espaço, causada pelos processos de translação de onda de cheia, amortecimento e efeitos de jusante (Paiva, 2009). O escoamento pode ser descrito através do conjunto de equações de Saint-Venant, o qual inclui a equação da continuidade (2) e a equação do movimento (3), podendo ser utilizada de maneira completa ou na forma simplificada (Pontes, 2011).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_0 - S_f) \quad (3)$$

Onde;

$A$  - Área (m<sup>2</sup>);

$Q$  - Vazão (m<sup>3</sup>/s);

$ql$  - Vazão de contribuição lateral (m<sup>2</sup>/s);

$t$  - Tempo (s);

$x$  - Distância longitudinal (m);

$g$  - Aceleração da gravidade (m<sup>2</sup>/s);

$S_0$  - Declividade do fundo do rio (m/m);

$S_f$  - Declividade da linha de energia (m/m);

$h$  - Profundidade da linha d'água (m).

$$S_f = \frac{|Q| \cdot Q \cdot n^2}{A^2 \cdot R^{4/3}} \quad (4)$$

Onde;

$n$  - Coeficiente de Manning (s.m<sup>-1/3</sup>);

$R$  - Raio Hidráulico (m);

As equações expostas estão formuladas em função da vazão e da profundidade, sendo possível formular em função da velocidade e profundidade, ou

ainda à vazão e nível (Pontes, 2011). Para o desenvolvimento das equações de Saint-Venant foram consideradas hipóteses, válidas para um canal subdividido em seções transversais (Chow; Maidment; Mays, 1994):

- O escoamento é unidimensional, a profundidade e a velocidade variam somente na direção longitudinal do canal, com velocidade uniforme e igual à média e o nível de água é horizontal na seção transversal;
- Fluido incompressível e de densidade constante;
- As variáveis devem ser representadas por funções contínuas;
- A pressão é hidrostática, ou seja, depende apenas da profundidade;
- É possível utilizar equações para perda de carga, semelhantes às usadas em escoamento permanente, como a equação de Manning;
- A declividade do canal é baixa e o leito é fixo, ou seja, os efeitos de erosão e deposição são desprezíveis.

O conjunto expresso na sua forma completa compõe um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, que não apresenta solução, sendo necessária a utilização de técnicas numéricas (Pontes, 2011). Muitos métodos numéricos podem ser empregados no estudo das equações; um deles é o esquema de quatro pontos de Preissmann, aplicado no programa HEC-RAS 5.0.7 (Brunner, 2016), o qual foi utilizado nesta pesquisa.

### 3.2.1. HEC-RAS

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), desenvolvido pelo U.S Army Corps of Engineers, é um software de modelagem hidráulica empregado para simulações de canais naturais e artificiais. O programa faz análise para escoamento permanente e variado unidimensional (1D) e bidimensional (2D), transporte de sedimentos, temperatura da água, qualidade da água e mapeamento espacial de parâmetros computados como profundidade, nível, velocidade entre outros (Brunner, 2016; USACE, 2025).

No HEC-RAS define-se a geometria do canal e das margens subdividindo em seções transversais, onde também é possível calibrar coeficientes de rugosidade para cada seção de forma uniforme ou variada (Pontes, 2011). O software permite ajustes interativos desse parâmetro, auxiliando na análise e validação do modelo (Brunner, 2016).

### 3.3. Modelagem Hidrológica

Os modelos hidrológicos retratam através de expressões matemáticas o comportamento dos processos do ciclo hidrológico, e antecipam cenários de condições observadas ou simuladas (Fan, 2015; Jardim, 2018; Lopes, 2017; Meira Neto, 2013). Depois de simular a entrada do escoamento na bacia hidrográfica, são incorporados módulos hidráulicos para reproduzir a propagação de vazão ao longo do canal (Jardim, 2018; Lopes, 2017). Além disso, algumas abordagens integram modelos hidrodinâmicos aos modelos hidrológicos, para melhorar a representação do escoamento em casos de cheia (Jardim, 2018; Laganier *et al.*, 2014; Lerat *et al.*, 2012).

Os modelos hidrológicos têm como principais componentes de entrada dados de precipitação ao longo do tempo, temperatura, tipo e uso do solo, radiação solar e têm como variáveis de estado o nível d'água, umidade do solo, entre outros. Além disso, também devem ser ajustados dados relacionados à condutividade hidráulica do solo, índice de área foliar, rugosidade dos cursos d'água, entre outros. Como resultado do modelo são obtidas informações hidrológicas como vazão em canais, balanços de água no solo e dados de evapotranspiração (Fan, 2015; Meira Neto, 2013).

Os modelos hidrológicos podem ser agrupados entre estocásticos ou determinísticos, pelas características espaciais ou pela existência de dependência temporal (Meira Neto, 2013). Os modelos estocásticos levam em consideração a incerteza dos parâmetros e das variáveis de entrada, quando uma ou mais variáveis tem comportamento aleatório, resultando em múltiplas saídas. Os modelos determinísticos, por outro lado, consideram que para um conjunto de entradas e parâmetros o resultado será sempre o mesmo, sem variações. Ainda, pode-se dividir os modelos determinísticos em: conceituais, físicos e empíricos (Almeida; Serra, 2017; Meira Neto, 2013).

Os modelos conceituais utilizam uma base física simplificada, contendo parâmetros de complexa obtenção, sendo necessária uma etapa de calibração e ajuste (Almeida; Serra, 2017; Collischonn, 2001; Lopes, 2017; Pontes, 2011). Modelos de base física são aqueles que adotam as principais equações que descrevem os processos físicos (Lopes, 2017), e quais quer dos parâmetros podem ser estimados ou podem ser obtidos através de medições (Collischonn, 2001). Modelos empíricos

têm pouca ou nenhuma base física, ou seja, não representam de forma explícita os processos da bacia hidrográfica (Almeida; Serra, 2017; Lopes, 2017; Pontes, 2011).

Os modelos hidrológicos organizados de acordo com a variabilidade espacial da bacia são divididos em: distribuídos, semi-distribuídos e concentrados. Modelos distribuídos separam a bacia hidrográfica em regiões menores de modo a considerar parâmetros e variáveis específicas com cada unidade (Lopes, 2017; Meira Neto, 2013; Pontes, 2011). Modelos semi-distribuídos dividem a bacia hidrográfica em sub-bacias, configurando parâmetros para cada uma (Lopes, 2017). Modelos concentrados não consideram a variabilidade espacial da área, configurando parâmetros de forma homogênea para a bacia (Meira Neto, 2013; Pontes, 2011).

Os modelos classificados com base na temporalidade são divididos em contínuos e baseados em eventos. Modelos contínuos simulam os fenômenos sem variar os parâmetros com o tempo. Modelos baseados em eventos calibram os parâmetros em função do tempo, permitindo configurar para momentos específicos (Marinho Filho, 2012; Meira Neto, 2013).

### 3.3.1. Modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH)

O modelo hidrológico de grandes bacias desenvolvido por Collischonn (2001) é um modelo distribuído de base conceitual, que estima a vazão em rios a partir de dados de precipitação e outras variáveis climáticas. É composto por módulos de balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo na célula e escoamento na rede de drenagem (Fan, 2015; Pontes, 2011). O modelo foi desenvolvido para bacias de larga escala, com áreas maiores ou iguais a 10.000 km<sup>2</sup>. A divisão da área em sub-bacias permite a calibração de parâmetros e variáveis para cada região com comportamento hidrológico similar, onde os módulos são simulados individualmente para cada minibacia (Paiva, 2009; Siqueira, 2022).

O MGB foi calibrado para a bacia hidrográfica de Itaipu utilizando dados de precipitação e vazão das estações automáticas de Itaipu, somado a dados de precipitação das estações do Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), da Agência nacional de águas (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Para modelar a propagação de vazões no trecho da bacia incremental, foi adotado o modelo inercial, o qual se baseia em uma versão simplificada das equações de Saint-

Venant. Para estimar a propagação nos afluentes da bacia, utilizou-se o modelo de Muskingun-Cunge (Lisboa *et al.*, 2017).

Uma vez calibrado, o modelo MGB pode ser utilizado para a previsão de vazões na bacia de Itaipu utilizando dados observados e de previsões numéricas de chuva de diferentes centros de meteorologia.

### **3.4. Previsão Hidrológica**

A previsão hidrológica consiste na estimativa da disponibilidade hídrica em uma seção de um curso natural d'água, incorporando condições meteorológicas observadas e os processos físicos do ciclo hidrológico, para um intervalo de tempo futuro (Brianezi, 2015; Lisboa *et al.*, 2017; Sene, 2010; Silva; Tucci; Collischonn, 2006). As previsões são empregadas em atividades como geração energética, abastecimento de água, irrigação, avaliação de eventos extremos como secas e inundações, navegação, entre outros (Silva; Tucci; Collischonn, 2006).

As previsões podem ser realizadas para os horizontes de curto prazo e médio prazo, cujo tempo compreende de algumas horas até duas semanas, onde são fundamentais para sistemas de alertas em prevenção de cheias e para planejamento e tomadas de decisões em usinas hidrelétricas. As previsões de longo prazo, com meses à frente, são adotadas para o planejamento e operação de recursos hídricos, tais como alocação de água para irrigação na agricultura, em períodos de secas e inundações, entre outros (Quedi, 2019; Silva; Tucci; Collischonn, 2006; Siqueira, 2022).

Para estimar previsões de curto e médio prazo com tempo superior ao tempo de concentração da bacia, adotam-se modelos hidrológicos com a incorporação de previsões de precipitação. Dessa forma, as previsões são baseadas três abordagens: propagação de ondas de cheia; transformação de chuva em vazão e transformação de chuva em vazão com informação adicional de previsão quantitativa de precipitação (Fan, 2015).

Previsões baseadas na propagação de ondas de cheia adotam informações de variáveis hidrológicas que podem ser medidas como nível ou vazão, estimando através de modelos de propagação simples ou baseados nas equações de Saint-Venant. Porém este método permite obter previsões com antecedência limitada ao tempo de deslocamento da onda de cheia na bacia hidrográfica (Fan, 2015).

Previsões baseadas em modelos de transformação de chuva em vazão adotam dados de precipitação, medidos em estações pluviométricas ou estimados por satélite ou radar. A utilização de modelos chuva-vazão permite ampliar o horizonte de previsão para além dos dados observados, contudo, devido a pequena quantidade de postos pluviométricos e pouca disponibilidade de radares este método acaba por não ser o mais utilizado (Andreolli; Collischonn; Tucci, 2006; Fan, 2015; Quedi, 2019).

As previsões quantitativas de precipitação são fundamentadas nos modelos de transformação chuva-vazão, porém levam em consideração dados de precipitação observados até o momento em que se realiza a previsão, e dados de precipitação previstas do momento atual até o último dia do horizonte de previsão planejado estimando o comportamento da bacia em relação a precipitações que já ocorreram e precipitações para dias que ainda irão ocorrer (Fan, 2015; Werlang, 2021).

#### 3.4.1. Previsão por ensemble

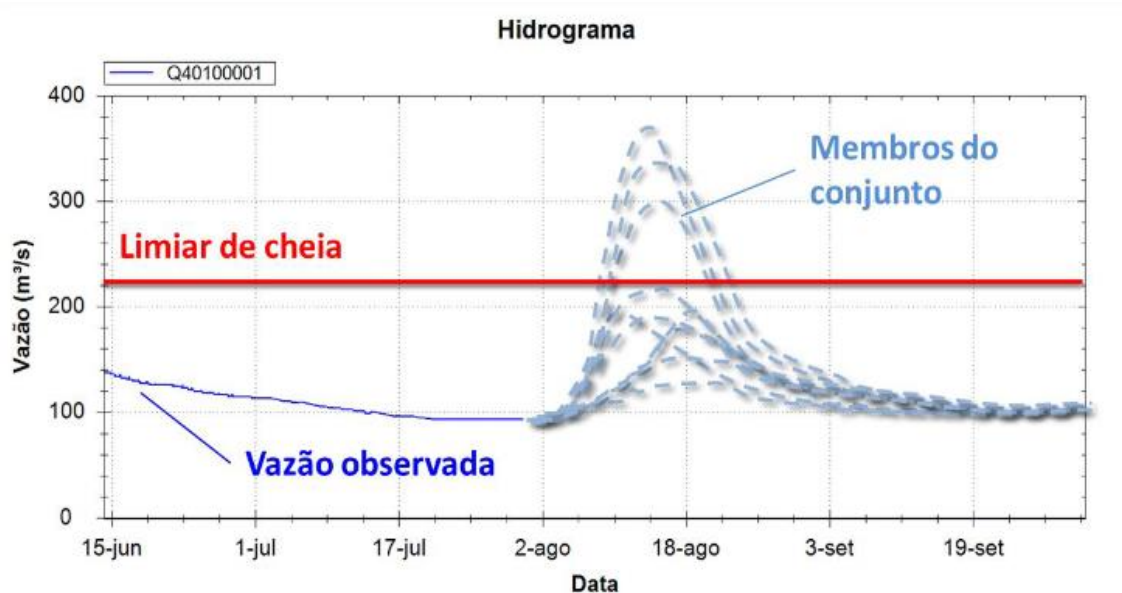
O processo de geração de previsões hidrológicas possui muitas incertezas que são propagadas pelo sistema, como, por exemplo: dados hidrológicos e meteorológicos fornecidos em tempo real, limitações dos modelos disponíveis em representar os processos físicos, equacionamento e calibração do modelo hidrológico, condições iniciais no momento da previsão e informações de previsões meteorológicas (Cloke; Pappenberger, 2009; Fan; Ramos; Collischonn, 2015).

Contudo, uma das principais dificuldades em previsões de vazão é a incerteza existente nas previsões do tempo (Cloke; Pappenberger, 2009; Cuo; Pagano; Wang, 2011), pois os sistemas de equações que compõe os modelos meteorológicos são muito sensíveis às condições iniciais fornecidas para os cálculos. Caso sejam fornecidos para o modelo dados iniciais ligeiramente diferentes, as respostas da simulação serão diferentes (Cuo; Pagano; Wang, 2011; Meller, 2012; Mendonça; Bonatti, 2002).

Em vista das incertezas geradas pelas previsões meteorológicas e climáticas adota-se previsões por *ensemble* ou por conjunto. Esta abordagem procura explorar diferentes modelos meteorológicos, parametrizações e condições iniciais para gerar previsões distintas, onde cada cenário representa um membro do conjunto. Dessa forma, a estimativa de previsão pode ser expressa em probabilidade, e o horizonte de previsão pode ser ampliado (Fan; Ramos; Collischonn, 2015; Quedi, 2019; Silveira *et*

al., 2014). Na Figura 1, observa-se as trajetórias formadas com base em previsões meteorológicas diferentes.

**Figura 1** - Exemplo conceitual de uma previsão por conjunto.

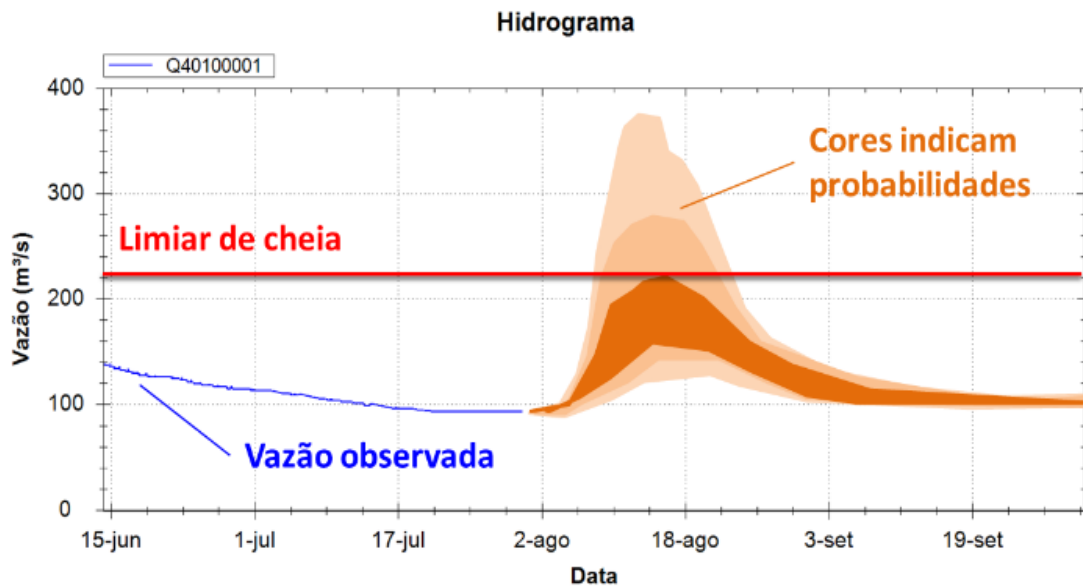


Fonte: Fan, 2015.

Com as previsões por conjunto, é possível fazer inferências sobre quais trajetórias são mais prováveis a partir da maior concentração de membros, estimando a probabilidade de ocorrência de eventos hidrológicos específicos (Fan, 2015). Dessa forma, o conjunto deve possuir um grau de espalhamento o suficiente para ser capaz de representar a realidade, sem diminuir a confiabilidade da previsão (Meller, 2012).

Quando o número de membros é elevado, torna-se difícil a análise detalhada das trajetórias, assim, outras formas de visualização como o uso de percentis e escala de cores podem auxiliar na interpretação das previsões por conjunto (Fan, 2015). Apresenta-se na Figura 2 um exemplo conceitual de previsão por conjunto representada por probabilidades de ocorrência dos valores de vazão. Nas Figura 1 e Figura 2 observa-se que nem todos os membros indicam a ocorrência do limiar de cheia, apenas alguns sugerem a ocorrência do evento, diante disso, é possível considerar os riscos envolvidos (Fan; Ramos; Collischonn, 2015).

**Figura 2** - Exemplo de previsões por conjunto na forma de probabilidades.



Fonte: Fan, 2015.

### 3.4.2. Previsão de Afluências ao reservatório de Itaipu

A previsão de vazões é realizada pela Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos (OPSH.DT), da Superintendência de Operação de Itaipu. A rotina de previsões é feita 365 dias por ano, estimando a previsão para o dia em que é realizada (dia D, ou 1º dia) até 9 dias a frente (dia D+9, ou 10º dia) (Abrantes; Sosa, 2013). Os dados recebidos das estações meteorológicas são consistidos e armazenados no Banco de dados Hidrológicos (BDH). E os dados de previsões meteorológicas também são importados, sendo ao todo 8 previsões que juntas somam 91 membros, conforme Tabela 1 (Quevedo *et al.*, 2024).

**Tabela 1** - Previsões Meteorológicas utilizadas

Previsão	Membros
SIMEPAR	5
WRF MARR.CD	1
DINAC	1
COSMO-INMET	1
ECMWF ENSEMBLE	51
ECMWF HIRES	1
GFS	1
GEFS	31

Fonte: Quevedo *et al.*, 2024.

Estes dados são importados pelo sistema FEWS-Itaipu, onde importam-se os resultados dos modelos meteorológicos e na sequência executa-se os modelos hidrológicos MGB e HEC-HMS, logo, somam-se as saídas dos modelos hidrológicos às vazões defluentes das usinas Primavera e Rosana e executa-se o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Como são utilizados dois modelos hidrológicos (MGB e HEC-HMS) somam-se 182 cenários de previsão, com esses dados é possível definir as faixas de valores mais prováveis (Quevedo *et al.*, 2024).

O sistema Delt-FEWS é um sistema avançado de previsão de inundações e alerta de cheias desenvolvido pela Deltares, empresa holandesa (Delt-FEWS, Deltares, 2025). Em 2022 começou a ser utilizado pela OPSH.DT, onde o sistema foi personalizado para as necessidades da rotina de previsão de afluência. O FEWS-Itaipu possui grande capacidade para simular números elevados de previsões, tornando possível considerar a variabilidade das previsões de tempo e as distintas respostas do modelos hidrológicos considerados (Quevedo *et al.*, 2024).

### 3.4.3. Incertezas na Previsão Hidrológica

As previsões por conjunto normalmente buscam representar as incertezas meteorológicas, que constituem em uma grande fonte de incerteza das previsões hidrológicas. Abrantes e Rivarola (2013) fizeram uma reflexão sobre as fontes de incerteza do processo de previsão de vazões da Itaipu. Foram identificados fatores meteorológicos, hidrométricos, operacionais e de modelagem hidrológica/hidrodinâmica.

O atual sistema de previsão de vazões de Itaipu considera incertezas de modelagem hidrológica, pela consideração de dois modelos hidrológicos distintos - MGB e HEC-HMS, e incertezas meteorológicas, pela rodada com 91 cenários de previsão de tempo. A modelagem hidrodinâmica é tratada pelo HEC-RAS, havendo apenas um modelo para representação desse processo físico (Abrantes; Sosa, 2013).

A modelagem hidrodinâmica, por ser um fenômeno complexo, torna de difícil concepção modelos que não contenham erros nos eventos simulados, devido aos desafios na formulação matemática, à carga computacional e à obtenção de dados de entrada (Oliveira, 2021). Dentre as incertezas associadas aos dados de entrada pode-se citar: dados altimétricos e batimetria, coeficiente de Manning e simplificação dos

elementos geométricos da seção (Bates; Pappenberger; Romanowicz, 2014; Oliveira, 2021).

Pappenberger *et al.* (2005) propôs uma forma de estimar a incerteza de propagação a partir da metodologia *Generalised Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), associada a um modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Este método é baseado na aplicação de Monte Carlo para gerar diferentes combinações de parâmetros e avaliar sua adequação aos dados observados, associando pesos probabilísticos às simulações que apresentaram melhor representação. Nesta pesquisa analisou-se a variação do parâmetro de ponderação do esquema numérico e a variação dos parâmetros de rugosidade de Manning, para seções transversais do Rio Morava, na República Tcheca, e do Rio Severn, no Reino Unido.

O intervalo de valores do coeficiente de Manning correspondeu de 0,001 a 0,9, e as simulações foram então comparadas com dados observados de inundações e um hidrograma de vazão para as duas áreas de estudo. Assim, os resultados do estudo para as variações da rugosidade constataram que muitos conjuntos proporcionaram desempenhos similares, ou seja, diferentes combinações podem levar a resultados diferentes, mas igualmente válidos, dificultando a escolha de um único conjunto de parâmetros.

### **3.5. Desempenho de previsões**

A avaliação do desempenho de previsões é importante para analisar a confiabilidade dos modelos utilizados, uma vez que todos os sistemas de previsão estão sujeitos a diferentes tipos de erros. A verificação permite observar quão representativas foram as previsões comparadas à uma referência, podendo ser os dados observados ou as saídas de modelos específicos, nos casos em que se estuda uma fonte de erro particular (Fan, 2015).

Para a verificação de previsões probabilísticas, foco deste trabalho, a avaliação acontece analisando o espalhamento dos membros e cenários prováveis. Diversas métricas podem ser utilizadas para avaliação de desempenho, como o Brier Score, Brier Skill Score, Reliability Diagram, Rank Histogram, Mean Continuous Rank Probability Score (CRPS), Mean Continuous Rank Probability Skill Score, entre outras (Fan, 2015).

O Brier Score, dado pela equação 5, avalia o erro médio quadrático da probabilidade de uma previsão, considerando que o evento ocorra ou não, por exemplo, a excedência de um limiar de vazão, medindo sua precisão. A métrica tem resultados variando entre 0 e 1, sendo que valores próximos de zero indicam melhores previsões (Fan, 2015; Meller, 2012).

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pp_i - po_i)^2 \quad (5)$$

Onde:

$n$  – Número de pares previsão-observação;

$pp$  – Probabilidade de ocorrência prevista do evento;

$po$  – Probabilidade de ocorrência observada do evento (0 o evento não ocorreu, e 1 o evento ocorreu).

O Brier Skill Score, apresentado na equação 6, é uma métrica de desempenho utilizada para comparar dois modelos de previsões, com resultados variando entre  $-\infty$  a 1. Quando os resultados são negativos, a previsão de referência possui desempenho superior, e quando os resultados são positivos, a previsão principal possui desempenho superior à de referência (Meller, 2012).

$$BSS = \frac{BS_p - BS_{ref}}{BS_{perf} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS_p}{BS_{ref}} \quad (6)$$

Onde:

$BS_p$  – Valor de BS para a previsão principal;

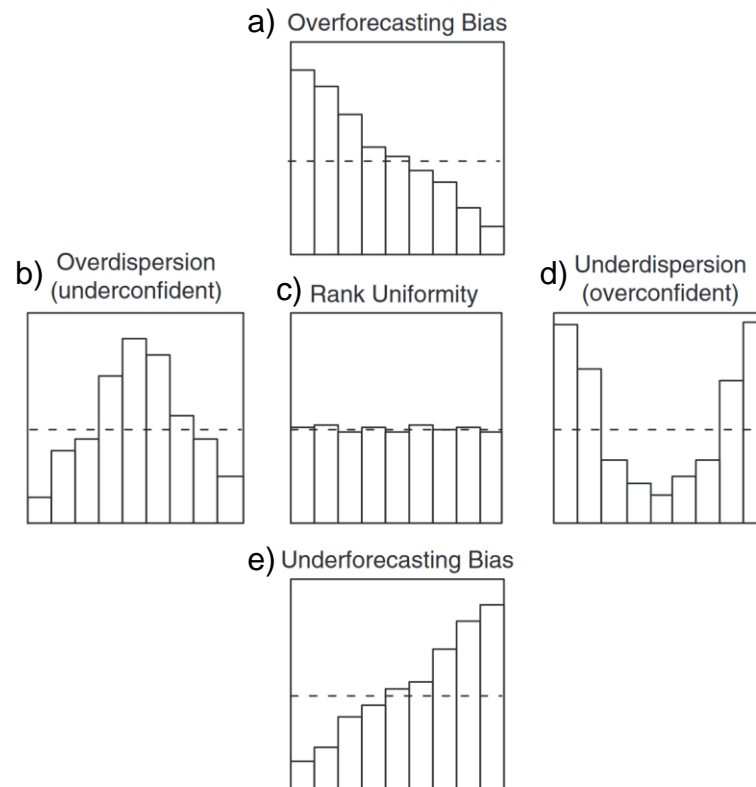
$BS_{ref}$  – Valor de BS para a previsão de referência;

$BS_{perf}$  – Valor de BS para a previsão perfeita, igual a zero.

O Rank Histogram é uma métrica que avalia o espalhamento do conjunto, trata-se da contagem percentual dos casos em que os valores observados ficaram posicionados entre os membros da previsão por conjunto. Cada membro do conjunto de previsão é considerado como uma classe, e o número de classes é igual ao número de membros mais um. O diagrama fornece a posição em que a observação foi representada com maior frequência. Quando o conjunto apresenta espalhamento uniforme, cada membro está representando um cenário com a mesma probabilidade

de ocorrer. O formato do gráfico representa esse comportamento, conforme ilustrado pela Figura 3, permitindo observar se as previsões estão distribuídas adequadamente (Fan, 2015).

**Figura 3** - Comportamentos de Rank Histograms.



Fonte: Wilks, 2006.

O formato em “L” (Figura 3a) apresenta viés positivo, de superestimação, as previsões são maiores do que os dados observados. O formato em “L invertido” (Figura 3e) apresenta viés negativo, de subestimação, as previsões são menores que os dados observados. O gráfico em formato de “U” (Figura 3d) indica falta de espalhamento, mostrando que os valores observados ficaram acima ou abaixo do conjunto de membros da previsão. O histograma em formato de “U invertido” (Figura 3b) indica excesso de espalhamento nas previsões, mostrando que os dados observados se concentraram na região central dos membros da previsão (Fan, 2015; Wilks, 2006).

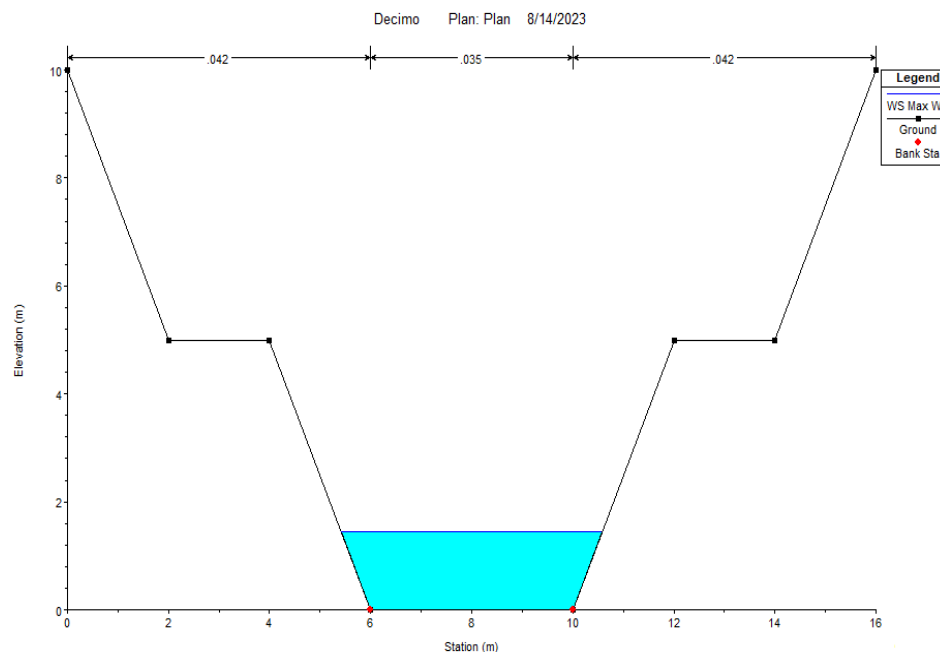
## 4. MATERIAIS

### 4.1. Prova de conceito

Para demonstrar os impactos da variação do coeficiente de Manning na propagação de ondas, foi conduzida uma prova de conceito baseada em uma rede simplificada. Essa rede ilustra um sistema fluvial fictício e permite analisar, a influência da rugosidade do canal na dinâmica do escoamento, incluindo avaliar alterações no nível e na vazão.

A rede simplificada foi calibrada no software HEC-RAS e é composta por uma geometria simples, um hidrograma fictício e coeficientes de Manning previamente estipulados de forma homogênea. Foi proposta uma geometria de um canal artificial de 100 km, com declividade de 5% e dividido em 6 seções. Cada seção foi dividida em margem esquerda, canal e margem direita, com coeficientes de Manning 0,042, 0,035 e 0,042  $s.m^{-1/3}$  respectivamente, como mostra a Figura 4.

**Figura 4 - Geometria da seção.**



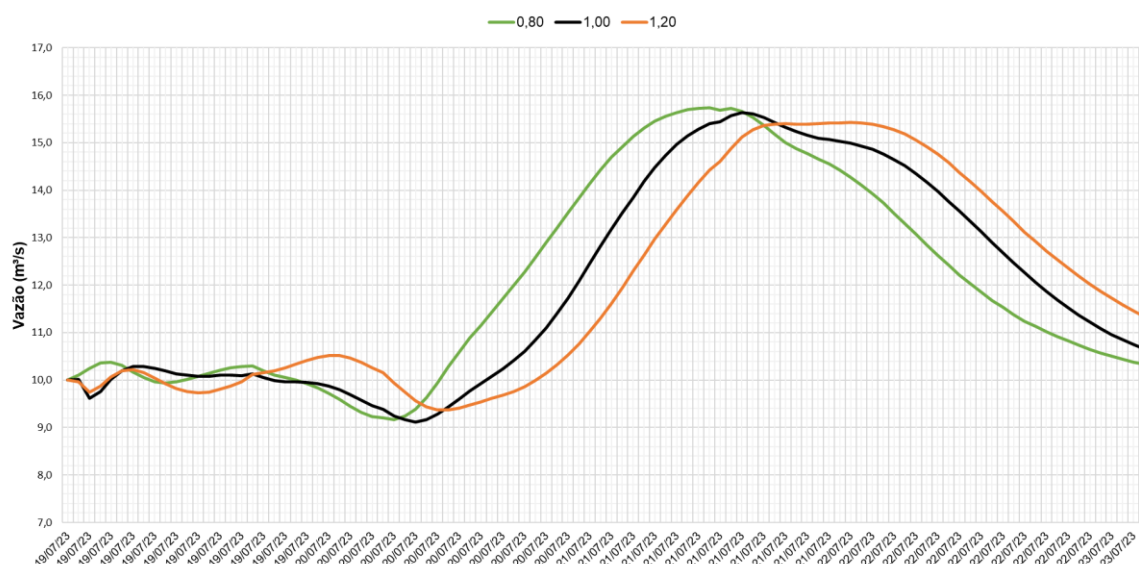
Fonte: Autora, 2023.

Na sequência determinou-se um hidrograma de entrada para um período de cinco dias, de forma a não extravasar a geometria estabelecida. Posteriormente, realizaram-se testes multiplicando os valores do coeficiente de Manning por fatores de 0.8 e 1.2, a fim de analisar os impactos da variação no escoamento e nos níveis

d'água obtidos sem a alteração desses coeficientes. Os resultados obtidos foram então transferidos ao Excel para visualização gráfica.

A prova de conceito mostra como as alterações da rugosidade em um canal provocam alterações na vazão e no nível. Levando-se em consideração os coeficientes de Manning originalmente adotados e as variações propostas, pode-se observar como varia o escoamento quando alterados esses coeficientes. Na Figura 5, é possível observar os dois novos cenários obtidos: reduzindo o coeficiente pelo fator 0.8 (série em verde), verifica-se que o pico da onda de cheia acontece antecipadamente e ligeiramente acima da simulação original. Já aumentando o coeficiente pelo fator 1.2 (série em laranja), nota-se que o pico do hidrograma é amortecido, e ocorre após o pico do hidrograma da simulação original (série em preto).

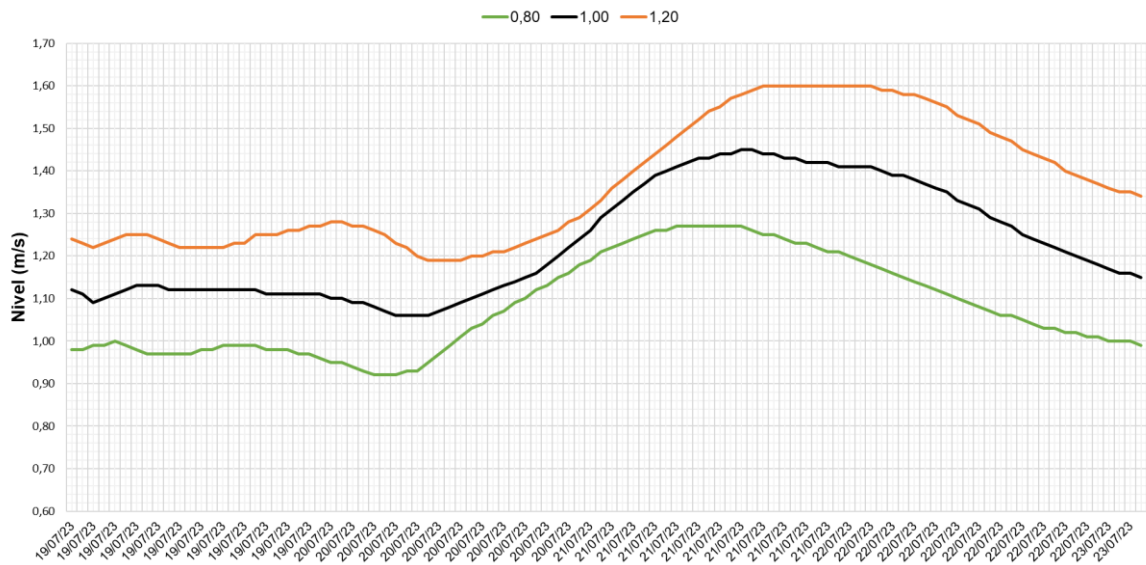
**Figura 5 - Variações observadas na vazão.**



Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 6, nota-se os cenários simulados de nível d'água. Quando o coeficiente de Manning é multiplicado pelo fator 0.8, percebe-se a antecipação da cheia e valores menores para o nível. Para o fator de 1.2, é possível observar que os valores de nível aumentaram e a cheia ocorreu após o pico máximo no nível do cenário original.

**Figura 6 -** Variações observadas no nível.



Fonte: Autora, 2023.

Sendo assim pode-se confirmar que as alterações na rugosidade têm impacto na vazão e no nível d'água. Percebe-se que o aumento na resistência ao escoamento (multiplicação pelo fator 1.2) resulta no amortecimento do pico da cheia, elevando o nível e reduzindo a vazão. Na redução da resistência ao escoamento (multiplicação pelo fator 0.8), observa-se a ocorrência de antecipação no pico da cheia, diminuindo o nível e elevando a vazão.

#### 4.2. Área de estudo

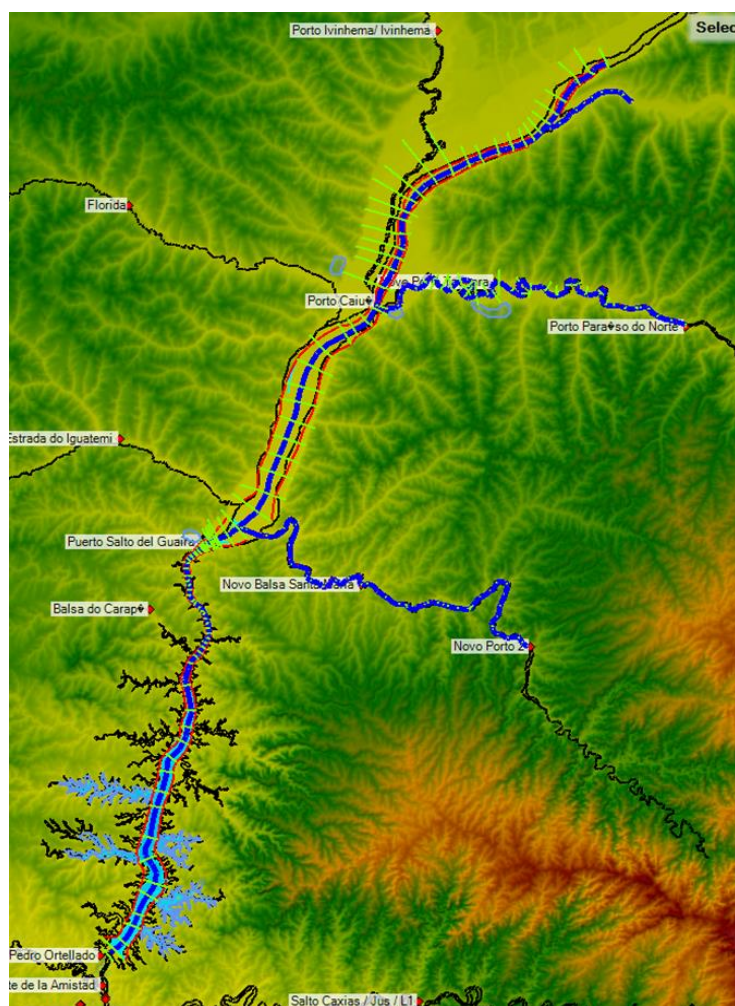
A área de estudo se localiza na bacia hidrográfica do rio Paraná, especificamente na bacia incremental da Usina Hidrelétrica de Itaipu, situada a jusante das usinas de Porto Primavera e Rosana. A bacia tem contribuição dos rios Ivaí e Piquiri na margem esquerda e rios Ivinhema, Amambaí e Iguatemi na margem direita (Fadiga *et al.*, 2008; Werlang, 2021).

O clima na margem esquerda do rio Paraná se caracteriza por chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e verões com altas temperaturas. Na margem direita, o clima é caracterizado por verões chuvosos e invernos secos, com início das precipitações entre outubro e novembro estendendo-se até março, com estação seca de abril até setembro (Fadiga *et al.*, 2008; Werlang, 2021).

## 5. METODOLOGIA

Para demonstrar os fenômenos hidráulicos analisados neste trabalho foram utilizados dois sistemas já implementados na Itaipu – a rede hidráulica do rio Paraná do modelo HEC-RAS (Figura 7) e o sistema FEWS-Itaipu – para encontrar uma faixa representativa da incerteza associada à propagação da onda de cheias e, posteriormente, validar os resultados obtidos para os coeficientes de Manning, fazendo a análise para diferentes períodos.

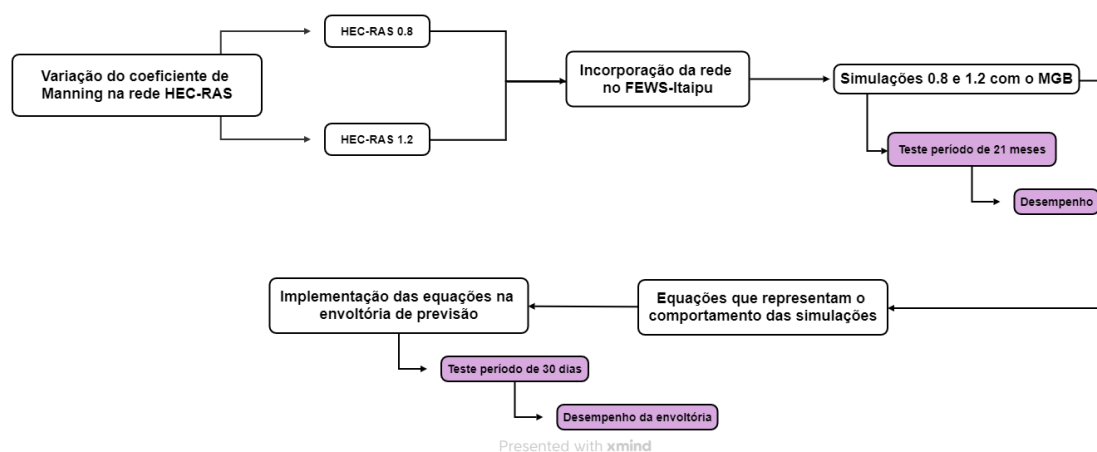
Figura 7 - Rede HEC-RAS.



Fonte: OPSH.DT- ITAIPU Binacional, 2024.

A Figura 8 apresenta um fluxograma resumindo as etapas do método empregado neste trabalho.

**Figura 8** - Fluxo do método.



Fonte: Autora, 2025.

### 5.1. Calibração e validação da faixa representativa

Para ilustrar a incerteza associada ao coeficiente de Manning na propagação de vazões, no processo de previsão de afluências, propõe-se uma faixa de valores que simulem os cenários obtidos com a variação deste parâmetro, buscando representar melhor o comportamento hidráulico nos períodos de cheia. Para encontrar a faixa, primeiramente, utilizou-se a rede do rio Paraná no HEC-RAS (Figura 7) com hidrograma de escoamento para um período de quatro meses.

Na sequência, os coeficientes de Manning da área de estudo, cedidos pelo departamento OPSH.DT da Itaipu e previamente obtidos da rede HEC-RAS, foram multiplicados por fatores inferiores e superiores a 1. A escolha dos fatores baseou-se em testes realizados no programa, onde verificou-se que valores inferiores a 0.8 e superiores a 1.2 apresentavam instabilidade nas simulações, comprometendo a confiabilidade dos resultados. Os fatores adotados mostraram-se adequados para garantir a estabilidade do modelo e a representação das condições hidráulicas estudadas.

Os resultados obtidos no HEC-RAS, foram implementados no sistema FEWS-Itaipu utilizando como base os resultados do modelo MGB, configurando assim duas novas simulações: HEC-RAS 0.8 e HEC-RAS 1.2. Na sequência selecionou-se o período entre 1º de janeiro de 2022 e 1º de setembro de 2023, comparando-se os

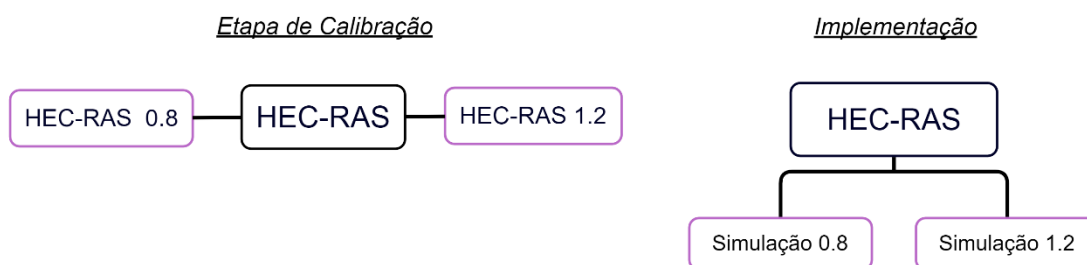
dados observados de afluência com o resultado das três simulações para o intervalo mencionado (HEC-RAS 1.0, HEC-RAS 0.8 e HEC-RAS 1.2).

Para verificar o ajuste das simulações calibradas, os dados obtidos foram incorporados em uma planilha Excel para a análise com as métricas de Brier Score e Brier Skill Score. Onde as simulações foram comparadas através do BS com os dados observados, buscando identificar qual simulação demonstrou melhor ajuste. Para a análise do BSS as duas novas simulações foram avaliadas com base no modelo HEC-RAS 1.0 (simulação original), permitindo observar se houve melhorias nas duas novas simulações.

## 5.2. Implementação das Faixas

Após a verificação do ajuste obtido com as novas simulações, propôs-se implementar as simulações obtidas no processo de previsão de afluência. Devido à grande capacidade computacional e o tempo de processamento que os modelos de previsão exigem, buscou-se integrar as simulações desenvolvidas de modo simplificado, obtendo uma aproximação matemática do comportamento das simulações, com equações lineares baseadas no modelo original já presente na rotina de previsão. Diferente da etapa de calibração, onde o modelo foi executado três vezes, na implementação o modelo foi executado uma única vez, e através das equações lineares foi possível replicar o comportamento das simulações 0.8 e 1.2, como exemplifica a Figura 9.

**Figura 9** - Fluxograma implementação.



Fonte: Autora, 2025.

Para formulação das equações elaborou-se gráficos de dispersão, relacionando a variação de dados diários de vazão das simulações com os valores de vazão da simulação original, para o período de dados provenientes do sistema FEWS-

Itaipu. Dessa forma, em uma planilha Excel, obteve-se dois gráficos de dispersão entre as simulações 0.8 e 1.0 e dois gráficos entre as simulações 1.0 e 1.2. Em cada um dos casos, um dos gráficos representa a fase de ascensão do hidrograma e outro a recessão. Para cada um dos gráficos obteve-se a equação linear, bem como a relação R-quadrado para cada uma das retas.

Na sequência, as equações foram adicionadas na planilha de processamento de dados da previsão de afluência, onde avaliou-se a aplicação das equações durante o período de cheias compreendido entre 01/10/2023 até 18/10/2023 e 30/10/2023 até 10/11/2023. Para cada dia do período selecionado, descarregou-se os resultados dos 182 cenários de previsão e aplicou-se as fórmulas de ambas as simulações, gerando ao todo 546 cenários, onde agrupou-se os valores em percentis para formar a faixa de previsão proposta.

#### 5.2.1. Desempenho da envoltória

Para avaliar a frequência de inserção dos dados observados nas envoltórias para cada dia do horizonte de previsão, foi necessário adaptar um script previamente elaborado em Python, onde realizou-se a extração dos percentis e dos cenários da faixa proposta e da faixa original, agrupando os resultados em formato de texto e posteriormente em uma nova planilha. Classificou-se os dados em três probabilidades de ocorrência – 50%, 80% e 90% –, observando através de gráficos qual das envoltórias representam com maior frequência os dados observados.

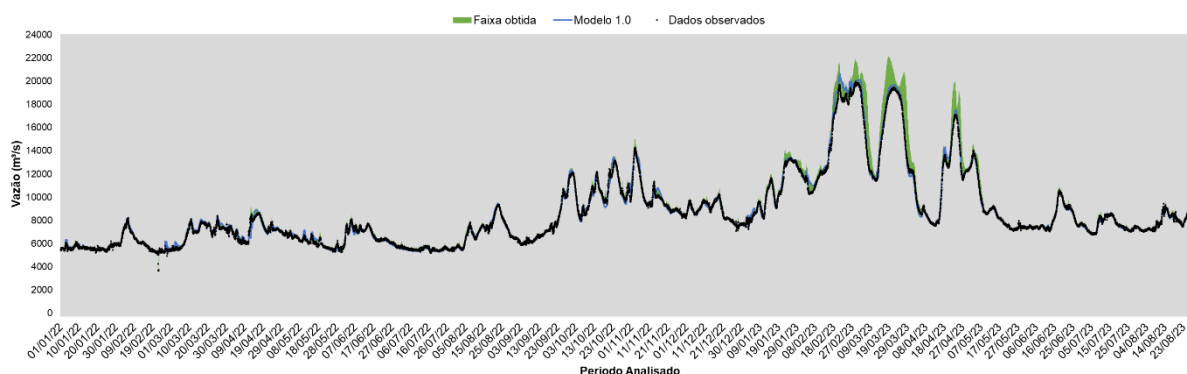
Devido ao grande número de cenários optou-se por utilizar o Ensemble Verification Service (EVS) para a análise de desempenho das envoltórias. A ferramenta facilita a avaliação de múltiplas simulações permitindo resultados detalhados, verificando a confiabilidade através das métricas. A incorporação dos dados no EVS foi através dos dados estruturados pelo script, que organizou no formato adequado para leitura do software. Dessa forma, avaliaram-se as métricas de Brier Score, Brier Skill Score e Rank Histogram para a envoltória proposta e a envoltória original.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Calibração da faixa representativa

Para calibrar a faixa desejada tomou-se como base o período entre janeiro de 2022 e setembro de 2023. Após a implementação da rede com os coeficientes de Manning multiplicados pelos fatores de 0.8 e 1.2 no FEWS-Itaipu, observa-se os cenários de afluência formados a partir das variações na Figura 10, este gráfico também é apresentado no anexo A deste trabalho em maior escala para visualização. A faixa em verde representa a faixa obtida a partir da envoltória dos cenários gerados multiplicando-se o coeficiente de Manning pelos fatores 0.8 e 1.2, a série em azul o resultado obtido com o Manning original (fator 1,0) e em preto os dados observados para o período.

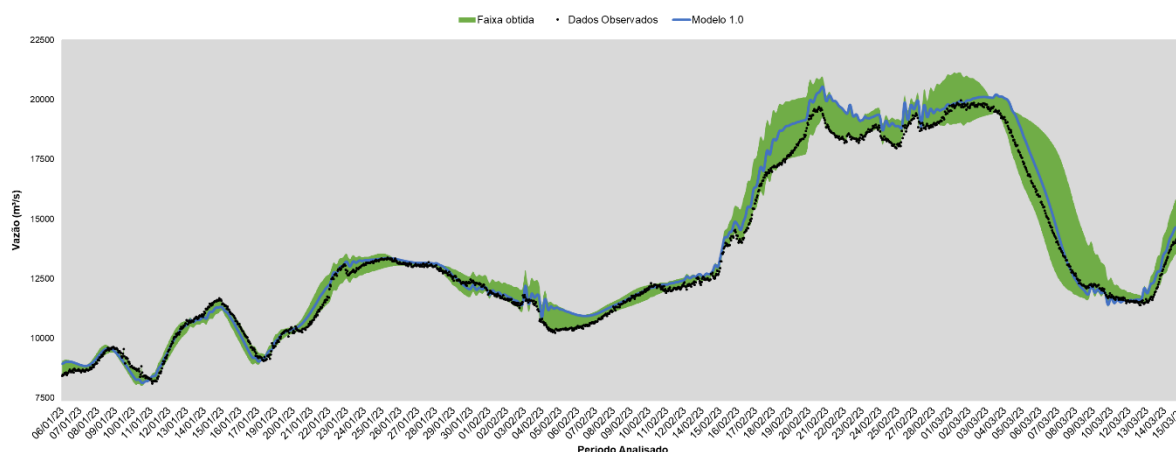
**Figura 10** - Resultados obtidos para o período analisado.



Fonte: Autora, 2023.

Para esse período, verificou-se que os dados observados se encontram compreendidos pelas simulações em 25% do tempo. Com base nos resultados obtidos, destaca-se o evento de cheia entre janeiro e março de 2023 (Figura 11), em que as simulações com os fatores 0.8 e 1.2 apresentaram maior variabilidade comparadas à simulação original (fator 1,0). Para outros períodos, pode-se observar na Figura 10 que essa variabilidade foi menor.

**Figura 11 - Evento de cheia.**



Fonte: Autora, 2023.

Na Figura 11 é possível observar o intervalo de ocorrência do aumento expressivo das aflúências à Itaipu (período compreendido entre 06/01/2023 e 15/03/2023), os resultados da simulação original e da faixa obtida a partir das simulações variando o coeficiente de Manning. Com as variações dos coeficientes foram obtidas duas simulações que caracterizam o intervalo de possibilidades da aflúência, de forma a representar a incerteza associada à propagação de vazões. Percebe-se que os dados observados para esse intervalo de análise foram compreendidos pela faixa em 63% do tempo.

É possível verificar que o modelo não se aproxima sempre dos dados observados, devido à complexidade de representar as características físicas da bacia e os fenômenos atuantes. Dessa forma, a faixa tem finalidade de representar apenas a incerteza associada à propagação das vazões.

#### 6.1.1. Desempenho da faixa calibrada

Para a análise de desempenho da faixa calibrada utilizaram-se as métricas Brier Score e Brier Skill Score, em que um Brier Score mais baixo indica uma melhor precisão nas previsões, enquanto um valor mais alto sugere uma performance inferior, adotando a média dos dados observados como limiar de vazão correspondente a 8642,0 m<sup>3</sup>/s. O desempenho da simulação 0.8 apresentou resultado similar ao modelo 1.0, ambas obtiveram Brier score de 0,03. A simulação 1.2 obteve desempenho ligeiramente superior comparado ao modelo 1.0 original, com Brier score de 0,02. A simulação 1.2 demonstrou-se positiva para o limiar analisado, por outro lado, a simulação 0.8 não apontou melhorias significativas.

Na análise do Brier Skill Score adotou-se como previsão de referência o modelo original 1.0. A simulação 0.8 apontou ter desempenho inferior em relação a referência, com Brier skill score de -0,25. A simulação 1.2 mostrou desempenho ligeiramente acima do modelo 1.0, com BSS de 0,18. Dessa forma o desempenho médio das faixas propostas mostrou-se positivo, exibindo valores para o BS de 0,02 e BSS de 0,16. Os resultados obtidos constam na Tabela 2.

**Tabela 2** - Resultados BS e BSS.

<b>Modelo</b>	<b>BS</b>	<b>BSS</b>
Original 1.0	0,03	
0.8	0,03	-0,25
1.2	0,02	0,18
Média (0.8 - 1.2)	0,02	0,16

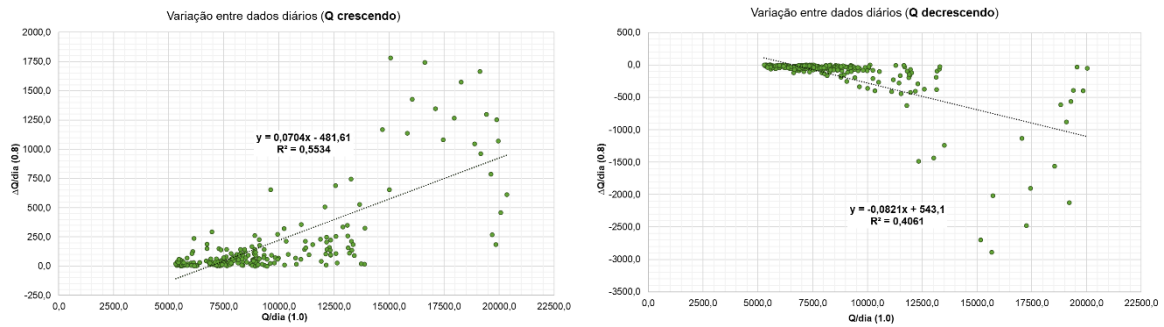
Fonte: Autora, 2024.

## 6.2. Implementação das faixas

Para a aplicação das faixas no processo de previsão de afluência, propôs-se estimar uma correlação linear entre a vazão diária do modelo 1.0 com as variações diárias das vazões das simulações 0.8 e 1.2. Ao analisar as correlações obtidas notou-se que os dados apresentavam padrões de difícil análise e posterior aplicação, durante a descida e subida do hidrograma. A simulação 0.8 antecipa a subida do hidrograma enquanto a 1.2 retarda. Já na descida do hidrograma, a simulação 0.8 antecipa a descida da onda de cheia enquanto a 1.2 posterga.

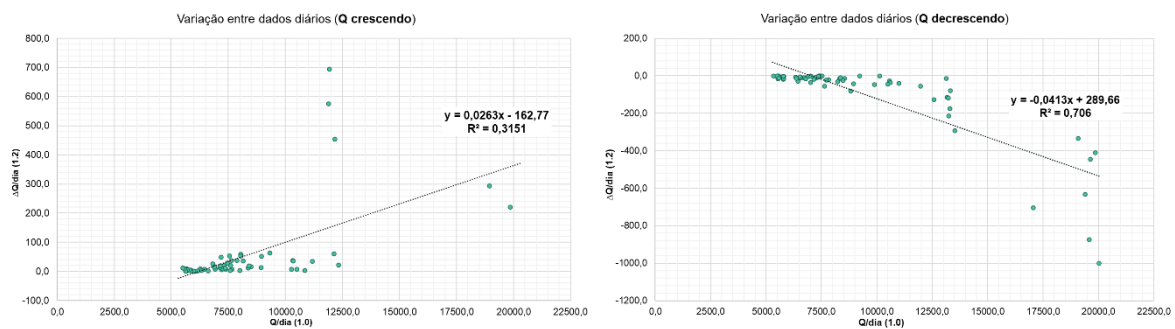
Dessa forma optou-se por dividir o gráfico de dispersão nos momentos em que a vazão apresentou variações positivas, crescentes, e momentos em que a vazão obteve variações negativas, decrescente. Sendo assim, estimou-se dois ajustes lineares por simulação, como mostram as Figura 12 e Figura 13.

**Figura 12** – Gráfico de dispersão entre o modelo 1.0 e 0.8.



Fonte: Autora, 2024.

**Figura 13** – Gráfico de dispersão entre o modelo 1.0 e 1.2.

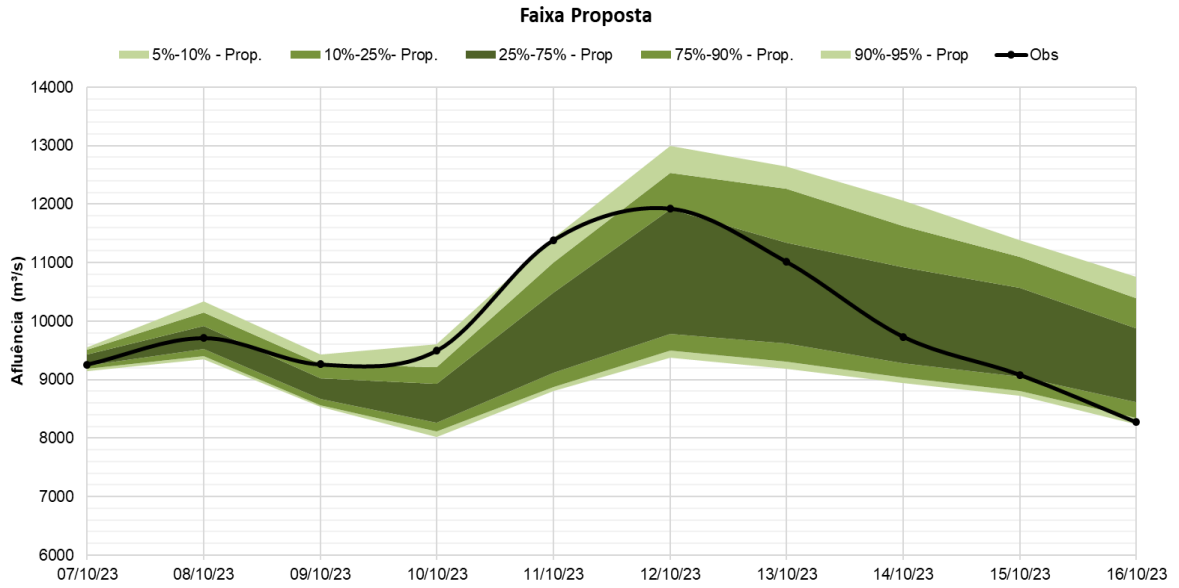


Fonte: Autora, 2024.

Os gráficos de dispersão apresentados na Figura 12 e Figura 13, mostram uma correlação fraca entre as variáveis, o que pode ser atribuído ao fato das simulações e o modelo 1.0 não apresentarem comportamento linear, embora estejam sendo representados dessa maneira. As equações foram utilizadas como alternativa para simplificar a metodologia, uma vez que executar o modelo 546 vezes demanda grande capacidade computacional e um tempo de processamento significativamente maior. Conseqüentemente, as equações acabam por introduzir erros na estimativa da incerteza da propagação.

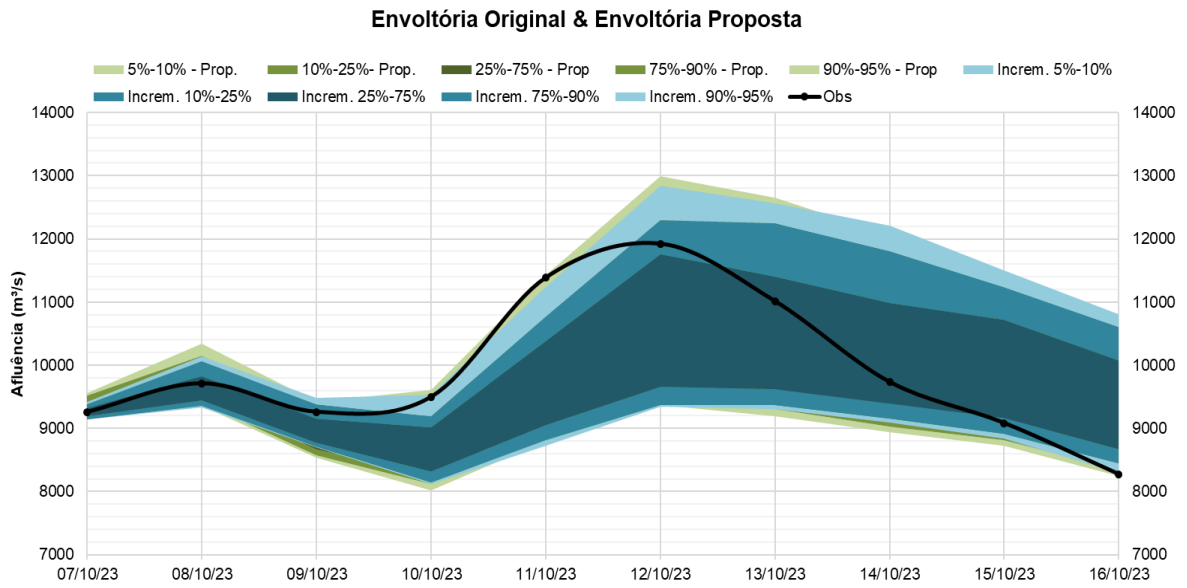
Após a incorporação das equações na planilha de previsão aplicou-se para o período entre 01/10/23 e 18/10/23, 30/10/23 e 11/10/23, no qual a afluência apresentava aumento de vazão, e propôs-se uma nova envoltória para cada dia do período. De modo a exemplificar, observa-se na Figura 14, em verde os percentis que compõe a envoltória resultante para um dos dias do intervalo analisado, e em preto os dados observados. Na Figura 15 é possível verificar a diferença entre a nova faixa obtida com as equações, apresentada em verde, e a faixa original, em azul. É possível observar que a faixa proposta é mais larga nos primeiros dias de previsão em comparação à original.

**Figura 14 – Faixa de previsão proposta.**



Fonte: Autora, 2024.

**Figura 15 – Comparativo entre envoltórias.**

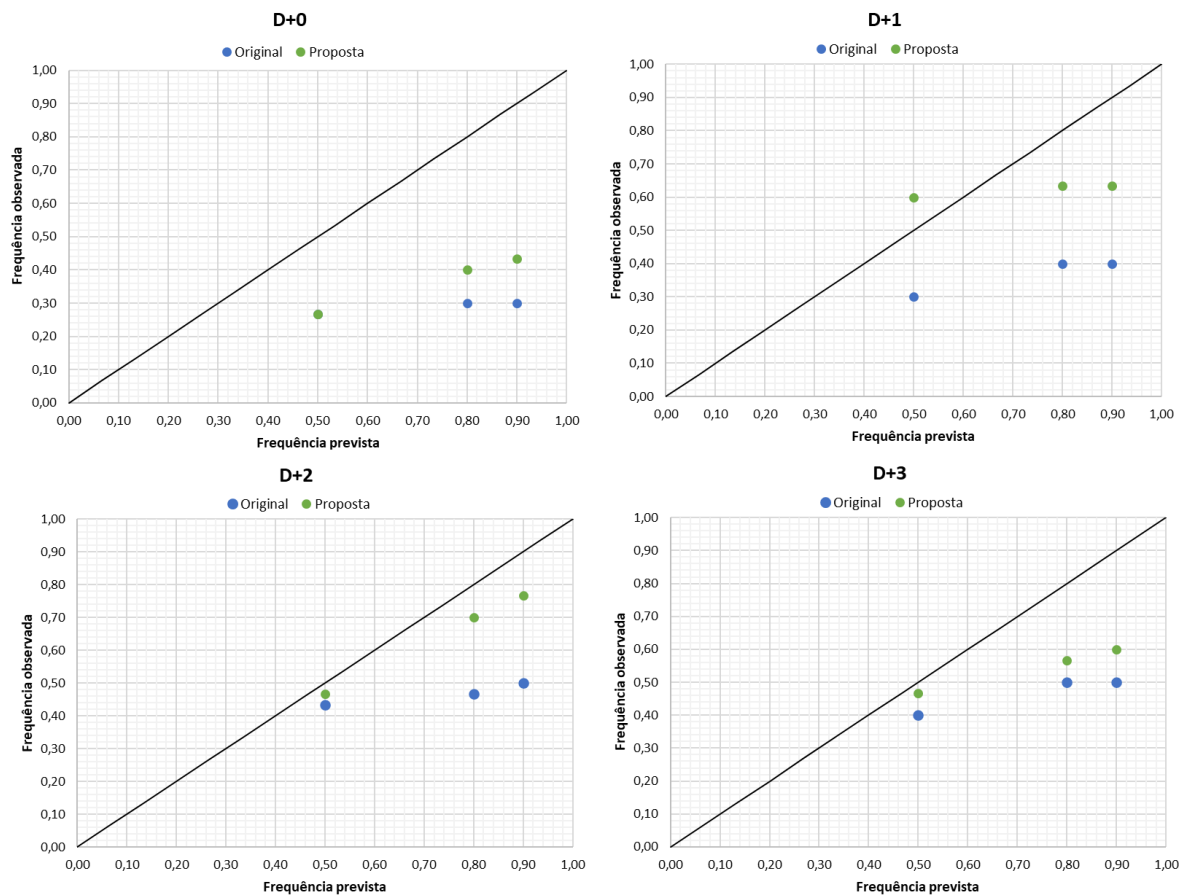


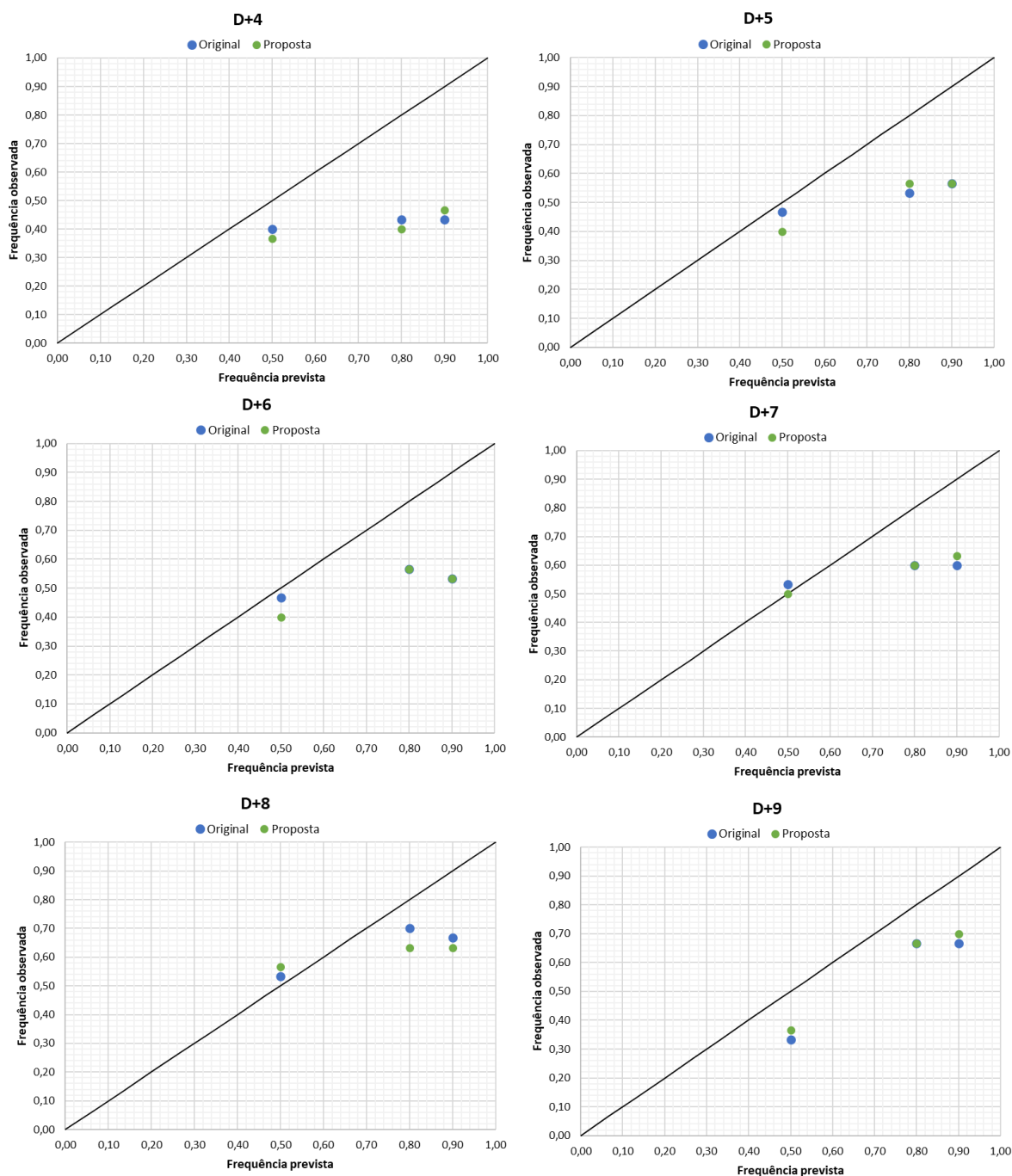
Fonte: Autora, 2024.

### 6.2.1. Desempenho das envoltórias de previsão

Obtidas as envoltórias de previsão, é possível avaliá-las comparando-as com as envoltórias originais através de métricas de desempenho como Brier Score, Brier Skill Score e Rank Histogram. Inicialmente, analisou-se a frequência de ocorrência das observações para cada dia do horizonte de previsão em comparação com a frequência prevista, como mostra a Figura 16. Em azul tem-se a frequência de ocorrência para a faixa original, em verde para a faixa proposta e a linha de referência (diagonal) em preto.

Figura 16 – Frequência de ocorrência.



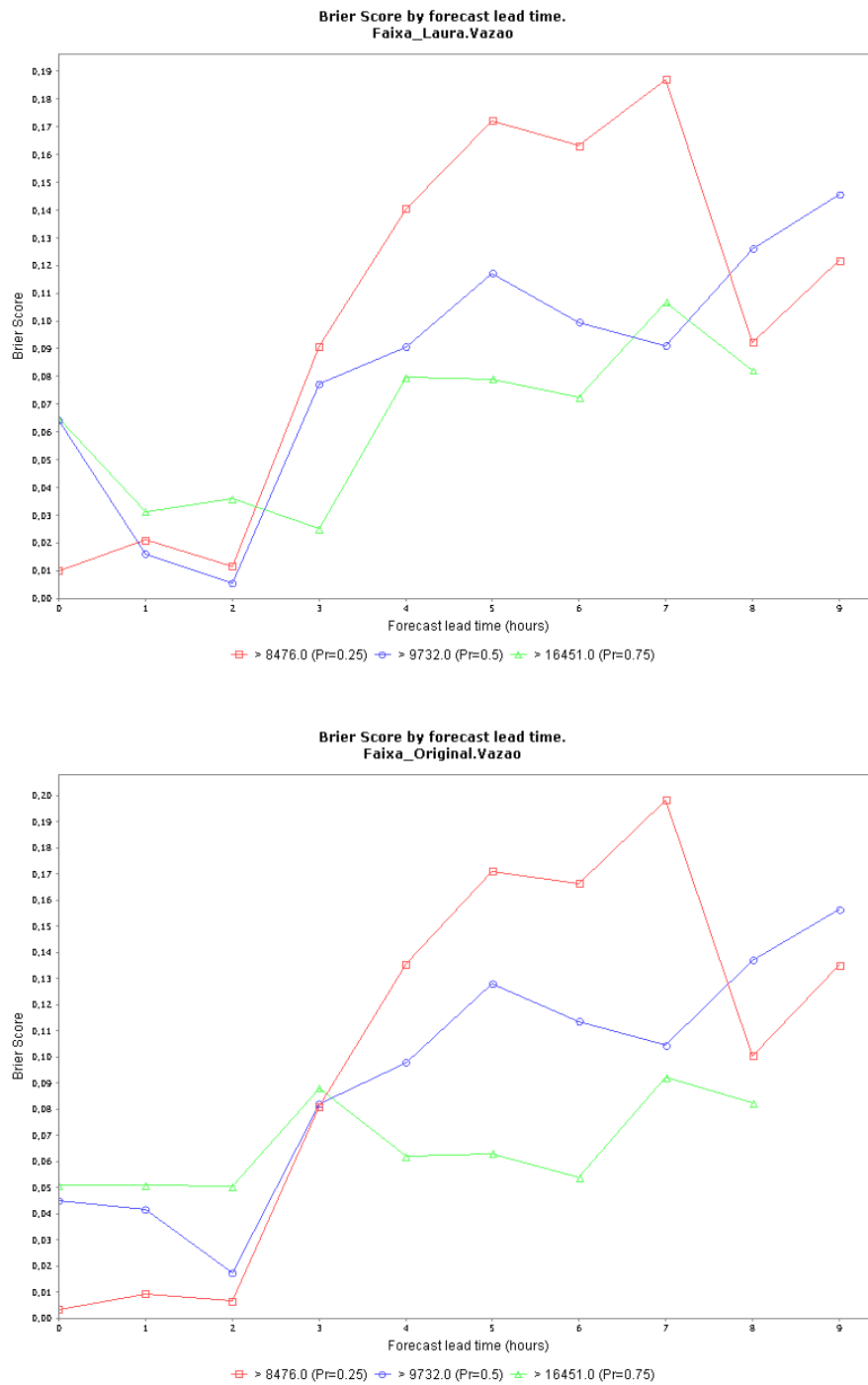


Fonte: Autora, 2024.

Os gráficos dispostos na Figura 16 demonstram que a faixa proposta abrangeu com maior frequência os dados observados em comparação a faixa original nos primeiros dias de previsão, pois os resultados da faixa proposta mostram uma aproximação maior com a linha de referência. Contudo, a partir do D+3 é possível observar que a faixa original tem resultados com maior proximidade a referência. Dessa forma, a nova faixa atende ao objetivo, melhorar o ajuste da faixa apenas nos primeiros dias do horizonte de previsão.

Para a avaliação do Brier score, analisou-se três limiares de vazão, referentes a valores que foram igualados ou superados aos quantis 25%, 50% e 75% das vazões observadas, correspondentes aos valores de 8476,0 m<sup>3</sup>/s, 9732,0 m<sup>3</sup>/s e 16451,0 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Os limiares definidos permitem avaliar o desempenho do ajuste da faixa proposta para diferentes cenários de vazão e compará-lo com o desempenho da faixa original, conforme Figura 17.

**Figura 17 - Resultados Brier Score.**

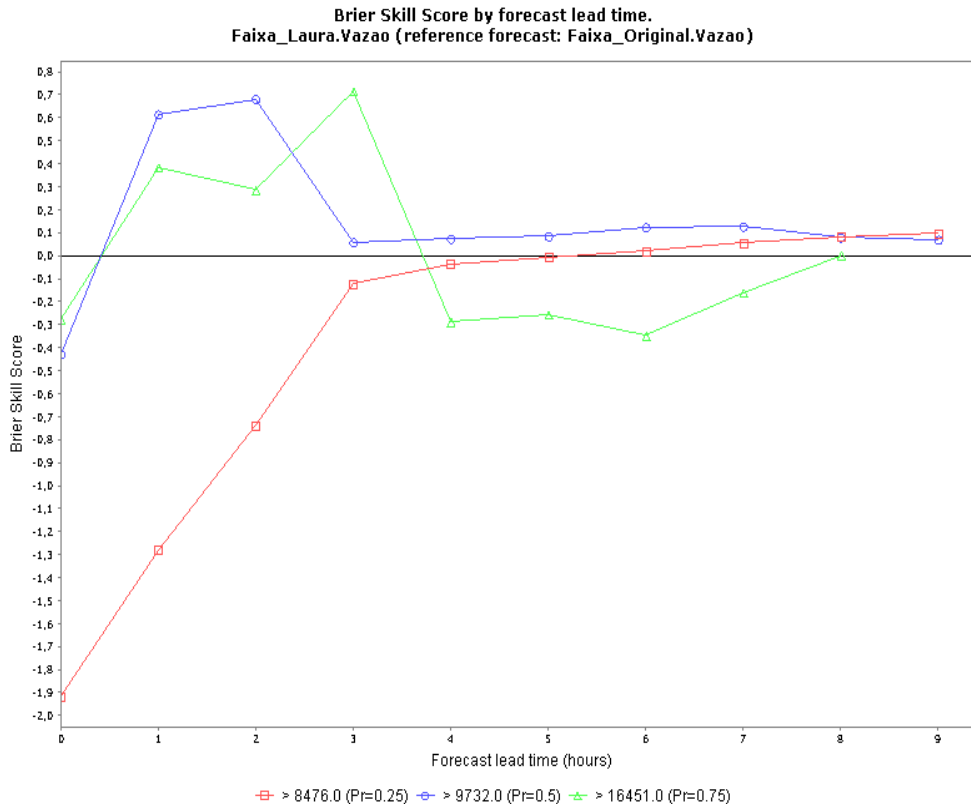


Fonte: Autora, 2024.

Através da Figura 17 observa-se que o resultado para o limiar de 8476,0 m<sup>3</sup>/s foi menor nos dois primeiros dias na faixa original, e nos demais dias o desempenho das duas foi semelhante. Para o limiar de 9732,0 m<sup>3</sup>/s a faixa proposta exibiu valores menores para os dois primeiros dias, e desempenho similar nos demais. No limiar de 16451,0 m<sup>3</sup>/s a faixa proposta também expressou resultados menores de Brier score para os dois primeiros dias. Dessa forma, o ajuste da faixa proposta se adequa melhor para vazões mais elevadas.

Para a avaliação do Brier Skill Score da faixa proposta utilizou-se como referência a faixa original, analisando com base nos mesmos limiares definidos. Sendo assim, observa-se na Figura 18 que a faixa original apresentou melhor desempenho nos primeiros 6 dias de previsão, para o limiar de 8476,0 m<sup>3</sup>/s. Para o limiar de 9732,0 m<sup>3</sup>/s a faixa proposta apresentou melhores resultados do dia D+1 ao D+9, especialmente nos dias D+1 e D.2. Para o limiar de 16451,0 m<sup>3</sup>/s a faixa proposta exibiu resultados melhores do dia D+1 a D+3, porém obteve valores inferiores para os demais dias.

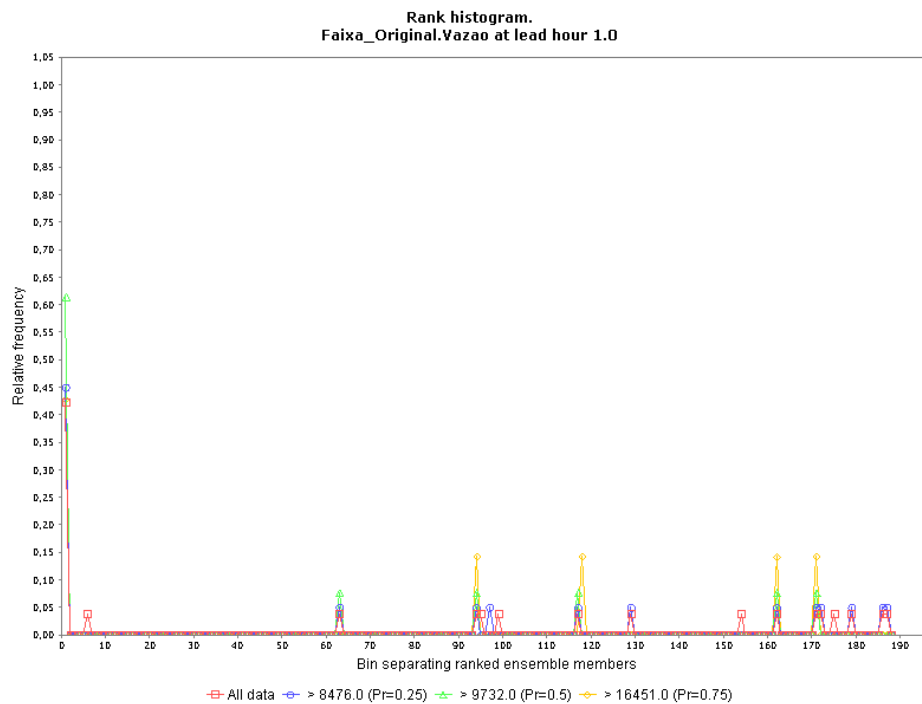
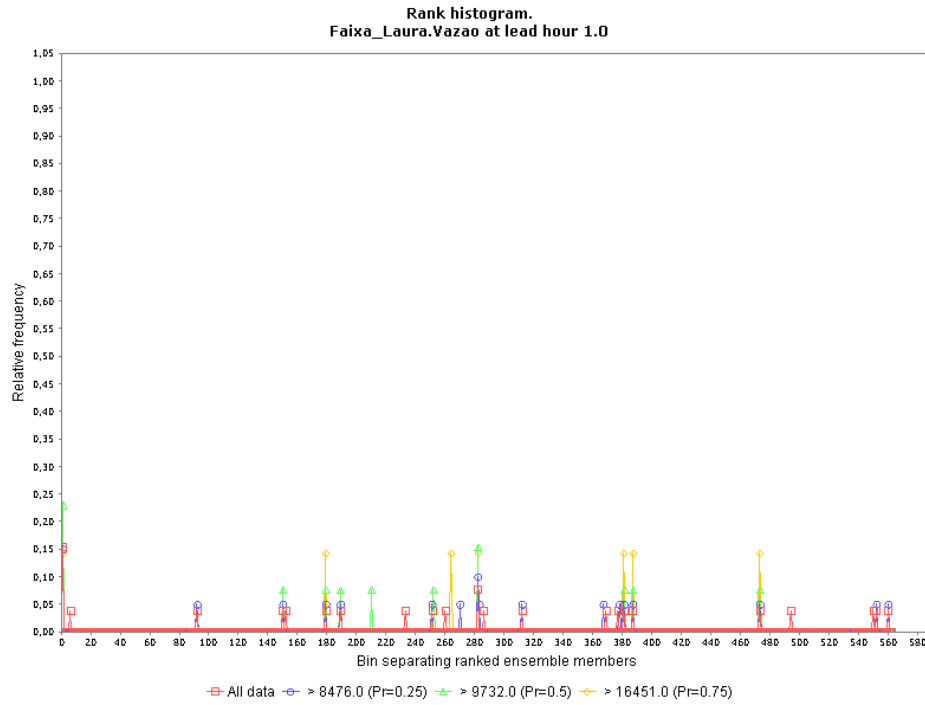
**Figura 18** - Resultado Brier Skill Score.



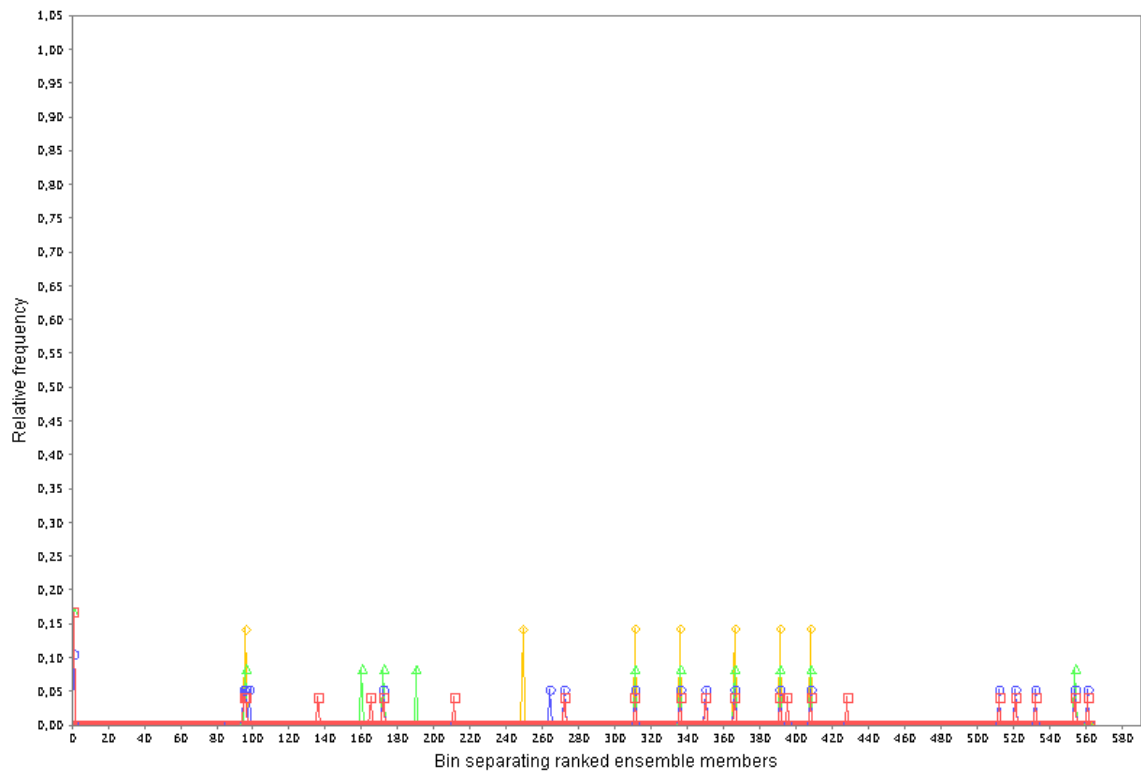
Fonte: Autora, 2024.

Para avaliar a dispersão da faixa proposta obteve-se também os gráficos de Rank Histogram, onde cada cenário de previsão é representado por uma classificação (rank). Apresenta-se na Figura 19 os resultados da faixa proposta e original, para os dois primeiros dias de previsão, onde analisou-se os resultados para os mesmos limiares de vazão, correspondentes a 8476,0 m<sup>3</sup>/s, 9732,0 m<sup>3</sup>/s e 16451,0 m<sup>3</sup>/s.

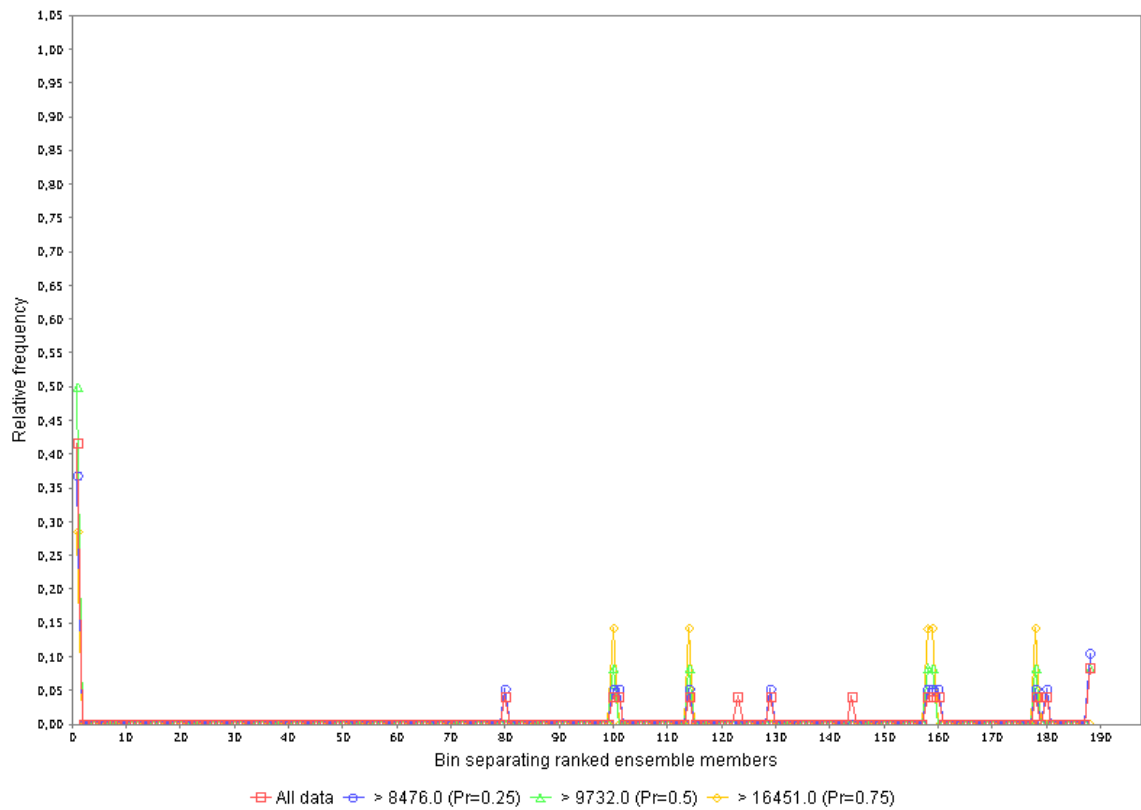
**Figura 19 - Resultados Rank Histogram.**



**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 2.0**



**Rank histogram.**  
**Faixa\_Original.Vazao at lead hour 2.0**



■ All data 
 ● > 8476.0 (Pr=0.25) 
 ▲ > 9732.0 (Pr=0.5) 
 ◆ > 16451.0 (Pr=0.75)

Fonte: Autora, 2024.

Por meio do gráfico da Figura 19 para o primeiro e segundo dia de previsão os histogramas apresentam formato em “L”, com frequências maiores na extremidade esquerda dos gráficos, ou seja, os dados observados para este período foram menores em comparação ao menor valor de previsão dos modelos. Dessa forma, o histograma sugere um viés positivo, onde o modelo subestima os valores observados.

Contudo, a faixa proposta exhibe frequências menores na extremidade esquerda para os três limiares definidos, mostrando uma distribuição melhor ao longo das classes em comparação com a faixa original nos dias analisados. A melhor distribuição da frequência, indica que os valores observados têm a mesma probabilidade de ser representado pelas classes.

Os resultados para os demais dias no horizonte de previsão constam no anexo B deste trabalho. Nesse período não se observaram alterações significativas em comparação a faixa original, além dos primeiros dias analisados na Figura 19.

## 7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os impactos da variação do coeficiente de Manning nas propagações de onda de cheia, desenvolvendo uma metodologia simplificada de representação da incerteza na propagação hidrodinâmica da previsão de afluência ao reservatório de Itaipu. A pesquisa também propôs desenvolver uma faixa representativa dos cenários de escoamento que ocorrem ao variar o coeficiente, e avaliar seu desempenho. Além disso, visou-se implementar a faixa proposta na rotina de previsão, e avaliar o ajuste obtido para os primeiros dias.

Os resultados mostraram que a faixa calibrada demonstrou maior variabilidade em períodos de cheia, compreendendo melhor o comportamento do escoamento nesses períodos. A avaliação com as métricas de BS e BSS mostrou que a calibração da faixa proposta foi adequada e obteve desempenho ligeiramente superior ao modelo empregado originalmente.

As equações lineares utilizadas para implementar as faixas na previsão apresentaram baixa correlação entre as variáveis, devido a complexidade em replicar o comportamento de modelos hidrodinâmicos por meio de equações lineares. Embora esta abordagem tenha sido adotada como forma de simplificação, ela teve dificuldades em representar totalmente a não linearidade dos modelos e, como resultado, introduziu erros nos processos subsequentes.

As envoltórias de previsão propostas mostraram ser mais amplas nos primeiros dias do horizonte de previsão, em comparação com a envoltória original, para o período de cheias analisado. A análise de desempenho para as métricas de Brier Score, Brier Skill Score e Rank Histogram mostrou que a faixa proposta abrangeu com maior frequência os dados observados nos dois primeiros dias de previsão, representando melhor a incerteza associada ao coeficiente de Manning na propagação de ondas.

Dessa forma, recomenda-se que a faixa de calibração seja ajustada para períodos maiores, de modo que possa representar uma variedade de cenários de cheia. Além disso, recomenda-se que o ajuste das equações lineares, seja feito considerando períodos mais longos, a fim de que, as equações lineares apresentem um R-quadrado mais representativo. Sendo assim, este estudo contribui ao explorar os impactos do coeficiente de Manning na propagação de ondas, e propondo uma

metodologia simplificada para estimar a incerteza da propagação hidrodinâmica na previsão de afluências ao reservatório de Itaipu.

## REFERÊNCIAS

ABRANTES, Paulo; SOSA, Jose Miguel Rivarola. Metodologia para Avaliação Mensal da Previsibilidade de Afluências Médias Diárias na Uhe Itaipu. *In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais [...]**. Bento Gonçalves, RS: [s. n.], 2013. p. 8. Disponível em: [https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013\\_\\_PAP012907.pdf](https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013__PAP012907.pdf).

ALMEIDA, Lizane; SERRA, Juan Carlos Valdés. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>.

ALVES, Luna Gripp Simões *et al.* Estimativa do Coeficiente de Manning para Cálculo de Vazão em Regime Sob Efeito de Remanso Hidráulico na Bacia Amazônica. *In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 2017, Florianópolis, SC. **Anais [...]**. Florianópolis, SC: [s. n.], 2017. p. 7.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema Interligado Nacional**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/sin/sistema-interligado-nacional>.

ANDREOLLI, Ivanilto; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M. Análise da Rede de Postos de Chuva na Previsão em Tempo Real na Bacia do Rio Uruguai. [s. l.], v. 11, n. 2, p. 05–14, 2006.

ARCEMENT, George J.; SCHNEIDER, Verne R. **Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains**. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey, 1989. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf>.

BATES, Paul; PAPPENBERGER, Florian; ROMANOWICZ, Renata. Uncertainty in Flood Inundation Modelling. *In: [S. l.: s. n.]*, 2014. p. 232–269.

BRIANEZI, Thaís Rocha. **Aplicação do SMAP para a bacia do Rio Tietê**. 2015. Tese Mestrado - UNICAMP, Limeira, SP, 2015.

BRUNNER, Gary W. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. [S. l.]: U.S Army Corps of Engineers, 2016. Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/>.

CHOW, Ven Te. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGRAW-HILL, 1959. v. 1

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. **Hidrologia Aplicada**. [S. l.]: McGRAW-HILL, 1994.

CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: A review. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 375, n. 3, p. 613–626, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409003291>.

COLLISCHONN, Walter. **Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina-RS**. 1997. Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 1997. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/181025>.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação Hidrológica de grandes Bacias**. 2001. 270 f. Doutorado - UFRGS, Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=42&SUMARIO=625>.

COSTA, Fernanda da Serra; MACEIRA, Maria Elvira Piñeiro; DAMÁZIO, Jorge Machado. Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro. [s. l.], v. 12, n. 3, p. 21–30, 2007.

CUNHA, Gabriel Fonseca; BEZERRA, Rodrigo Perdigão Gomes; ELEUTÉRIO, Julian Cardoso. Análise de Sensibilidade do Parâmetro de Rugosidade de Manning em Modelos Sintéticos de Vale para Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens (Dam Break). In: XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2023, Aracaju, Sergipe. **Anais [...]**. Aracaju, Sergipe: [s. n.], 2023. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=15712>.

CUO, Lan; PAGANO, Thomas C.; WANG, Q. J. A Review of Quantitative Precipitation Forecasts and Their Use in Short- to Medium-Range Streamflow Forecasting. [s. l.], 2011. Disponível em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/12/5/2011jhm1347\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/12/5/2011jhm1347_1.xml).

DELFT-FEWS, DELTARES. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft-fews-platform>.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **BEN Relatório Síntese 2024, Ano base 2023**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>.

FADIGA, Francisco *et al.* Modelos de Previsão de Vazões para a Bacia Incremental à UHE Itaipu. [s. l.], v. 13, n. 2, p. 65–75, 2008. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/16/4cdeb8b170b02be42512d53b05bcc0cb\\_4b7d1c966b1cc590faa98dcfc9aeb20f.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/16/4cdeb8b170b02be42512d53b05bcc0cb_4b7d1c966b1cc590faa98dcfc9aeb20f.pdf).

FAN, Fernando Mainardi. **Previsão por Conjunto de Vazões Afluentes a Reservatórios em Grandes Bacias Hidrográficas Brasileiras**. 2015. Tese Doutorado - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, RS - Brasil, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127309/000971551.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

FAN, Fernando; RAMOS, Maria-Helena; COLLISCHONN, Walter. Sobre o uso de previsões hidrológicas probabilísticas para tomada de decisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 914–926, 2015. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5117>.

GRISON, Fernando *et al.* Avaliação dos Métodos de Estimativa do Coeficiente de Manning em um Canal Fluvial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves, RS. **Anais [...]**. Bento Gonçalves, RS: [s. n.], 2013. p. 8. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2014/06/PAP013236.pdf>.

GUILHON, Luiz; MOREIRA, Jonatas; ROCHA, Vinicius. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 13–20, 2007. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=18&SUMARIO=228>.

HIDALGO, Ieda Geriberto. **Ferramentas e Metodologia para Consolidação de Dados de Usinas Hidrelétricas Brasileiras**. 2009. - UNICAMP, Campinas, 2009.

JARDIM, Pedro Frediani. **Inferência de parâmetros hidráulicos efetivos de rios a partir da relação entre celeridade e vazão e imagens de sensoriamento remoto**. 2018. Tese Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/188309>.

KIM, Y. *et al.* Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2D hydraulic model and particle filters. [s. l.], v. 6, n. 2, p. 112–123, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1753-318X.2012.01164.x>.

KOPECKI, Ianina; SCHNEIDER, Matthias; TUHTAN, Jeffrey A. Depth-dependent hydraulic roughness and its impact on the assessment of hydropeaking. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 575, p. 1597–1605, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971632294X>.

LAGANIER, O. *et al.* A coupling of hydrologic and hydraulic models appropriate for the fast floods of the Gardon River basin (France). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 11, p. 2899–2920, 2014. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/14/2899/2014/>.

LERAT, Julien *et al.* Towards robust methods to couple lumped rainfall–runoff models and hydraulic models: A sensitivity analysis on the Illinois River. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 418–419, The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP) - Phase 2 Experiments in the Oklahoma Region, USA, p. 123–135, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409005824>.

LIMERINOS, J. T. **Determination of the Manning Coefficient From Measured Bed Roughness in Natural Channels**. Washington, D.C.: UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 1970.

LISBOA, Auder M. Vieira *et al.* Sistema de Previsão de Vazões por Conjunto da Usina de Itaipu: Desenvolvimento e Primeiras Análises. [s. l.], 2017.

LOPES, Vitória Ache Rocha. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. 2017. 215 f. Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/172898>.

MARINHO FILHO, Gilberto Milhomem. Modelos Hidrológicos: conceitos e Aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 35 a 47, 2012. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/download/268/761/0>.

MEIRA NETO, Antônio Alves. **Ponderação bayesiana de modelos utilizando diferentes séries de precipitação aplicada à simulação chuva-vazão na Bacia do**

**Ribeirão da Onça**. 2013. 122 f. Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2013.tde-03102013-111621>.

MELLER, Adalberto. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. 2012. Doutorado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/70057>.

MENDONÇA, Antônio Marcos; BONATTI, José Paulo. O Sistema de Previsão de Tempo Global por Ensemble do CPTEC. *In*: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu, PR: [s. n.], 2002.

OLIVEIRA, Gabriel Araujo de. **Informações espaciais colaborativas como fonte alternativa de dados observados para a calibração de modelos hidrodinâmicos**. 2021. doctoralThesis - UFPE, Recife, Pernambuco, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45668>.

OLIVEIRA, Vinicius Grossi; LIMA, Carlos Henrique Ribeiro. Previsões multiescala de vazões para o sistema hidrelétrico brasileiro utilizando ponderação bayesiana de modelos (BMA). [s. l.], v. 21, n. 3, p. 618–635, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616032>.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O Sistema Interligado Nacional**. [S. l.], 2025. Disponível em: <http://www.ons.org.br:80/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso : bacia do rio Solimões**. 2009. 182 f. Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/18927>.

PAPPENBERGER, F. *et al.* Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 302, n. 1, p. 46–69, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404003294>.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro. **Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais**. 2011. 159 f. Mestrado - UFRGS, [s. l.], 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/35350>.

QUEDI, Erik Schmitt. **Previsão hidrológica em horizonte sub sazonal**. 2019. 93 f. Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/194928>.

QUEVEDO, José *et al.* Implementación del sistema FEWS (Flood Early Warning System) y uso operativo en la previsión de caudales en la ITAIPU Binacional. *In*: XV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE, 2024, Assunção, Paraguai. **Anais [...]**. Assunção, Paraguai: [s. n.], 2024.

SENE, Kevin. **Hydrometeorology: Forecasting and Applications**. 1. ed. United Kingdom: Springer: [s. n.], 2010.

SILVA, Benedito Cláudio da; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; COLLISCHONN, Walter. Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos. [s. l.], 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/231166>. Acesso em: 23 fev. 2025.

SILVEIRA, Cleiton da Silva *et al.* Previsão de tempo por conjuntos para a região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 29, p. 351–366, 2014. Disponível em: [https://www.scielo.br/j/rbmet/a/39xRpdX6cGDnxq3HryhWQdm/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.scielo.br/j/rbmet/a/39xRpdX6cGDnxq3HryhWQdm/?utm_source=chatgpt.com).

SIQUEIRA, Vinícius Alencar. **Modelagem e Previsão Hidrológica em Escala Continental para a América do Sul**. 2022. Doutorado - UFRGS, Porto Alegre, RS - Brasil, 2022.

TEIXEIRA, Emmanuel Kennedy Da Costa *et al.* Manning's roughness coefficient for the Doce River. **RBRH**, [s. l.], v. 23, n. 0, 2018. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2318-03312018000100245&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312018000100245&lng=en&tlng=en).

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ªed. Porto Alegre, RS - Brasil: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. Disponível em: Acesso em: 13 set. 2023.

USACE, Hydrologic Engineering Center. **HEC-RAS**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest/introduction-to-hec-ras>. .

WERLANG, Mariana Maria. **Desenvolvimento de um Sistema Simplificado para Previsões Probabilísticas de Afluências ao Reservatório da UHE Itaipu**. 2021. Tese Mestrado - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2021.

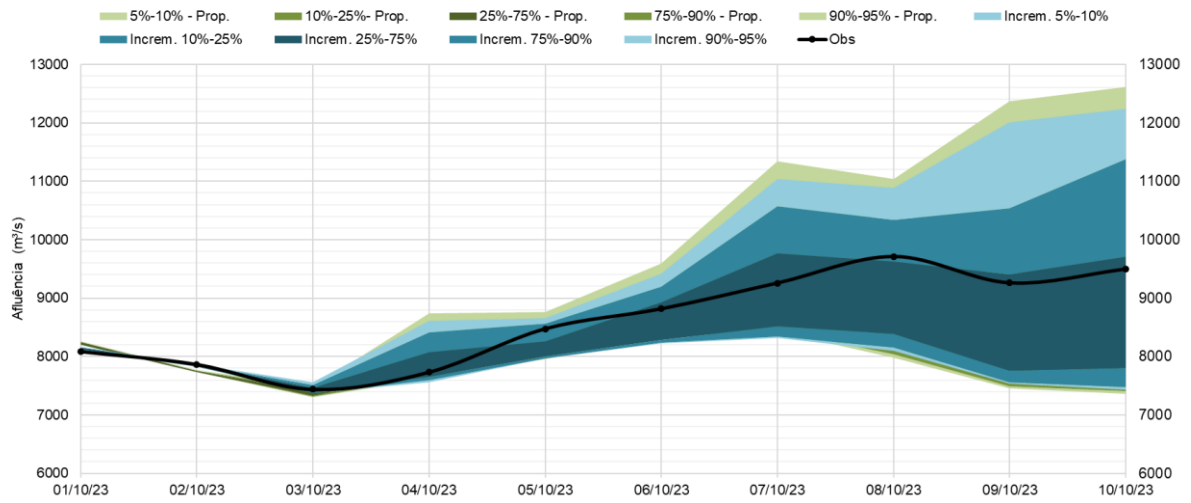
WILKS, Daniel S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2006. (International Geophysics Series, Volume 91).

## **ANEXOS**

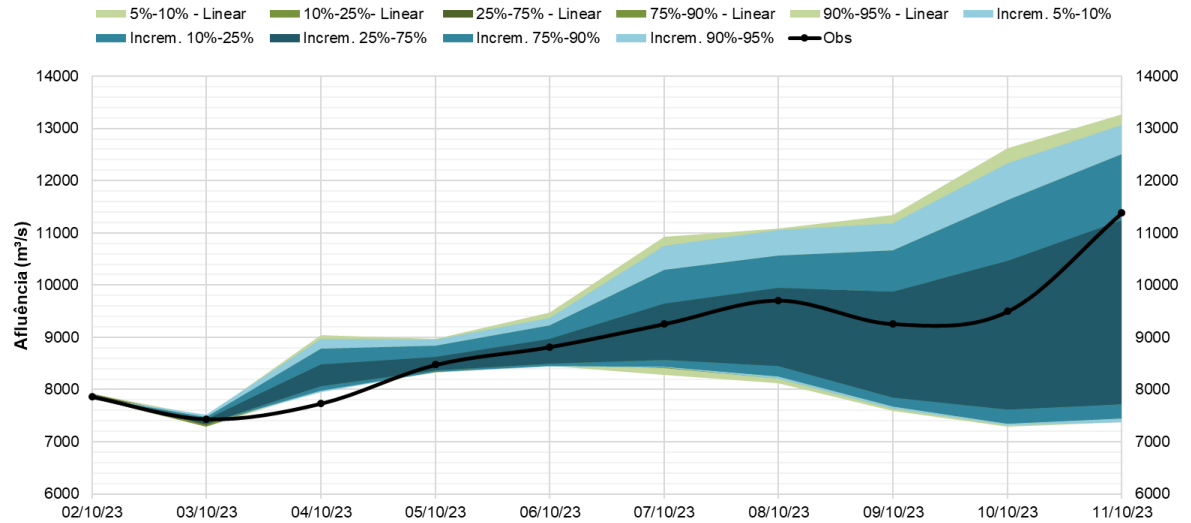


## **ANEXO B – ENVOLTÓRIAS**

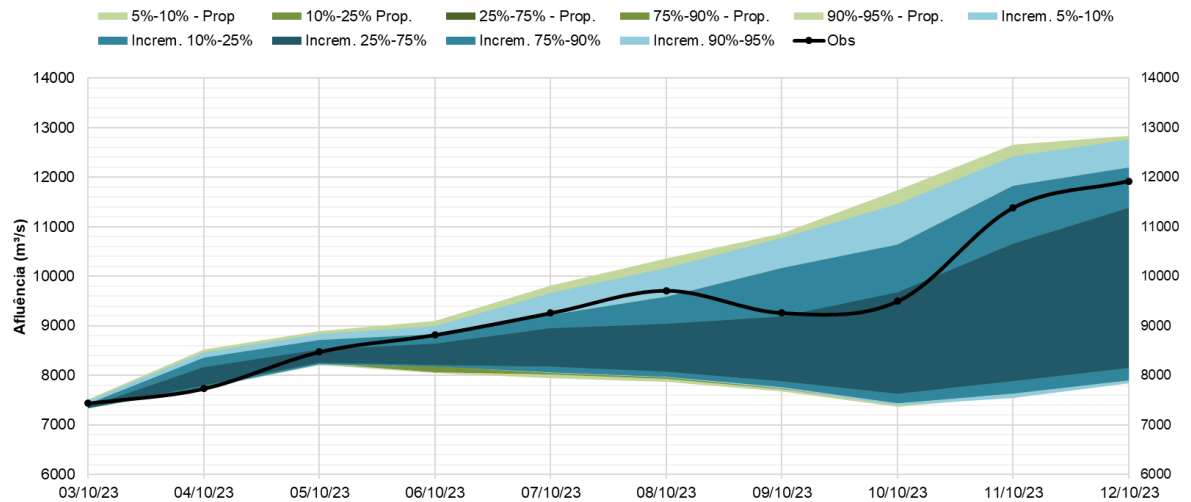
### Envoltória Original & Envoltória Proposta

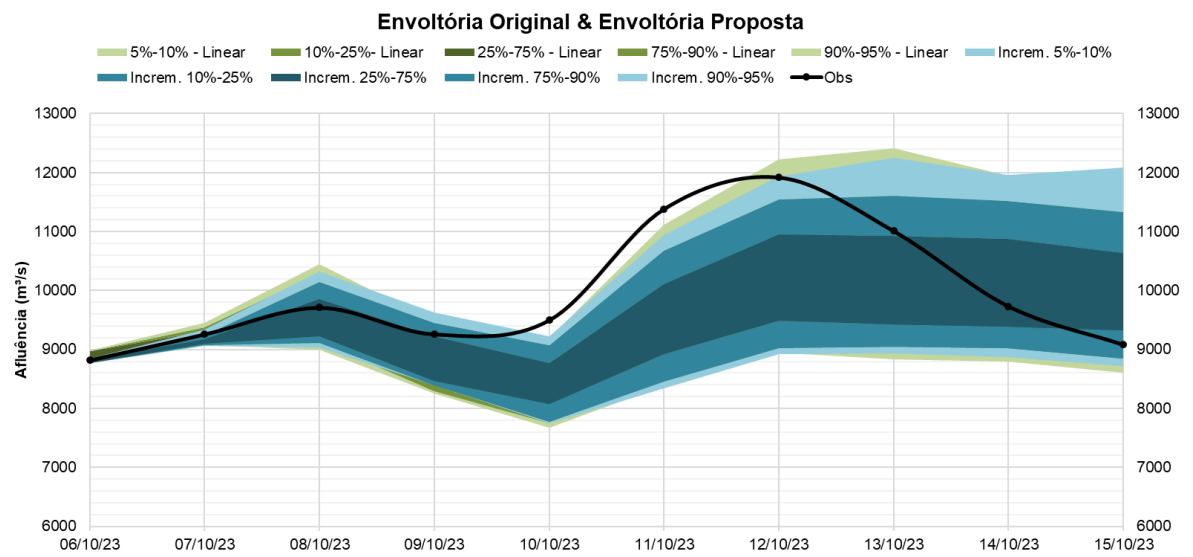
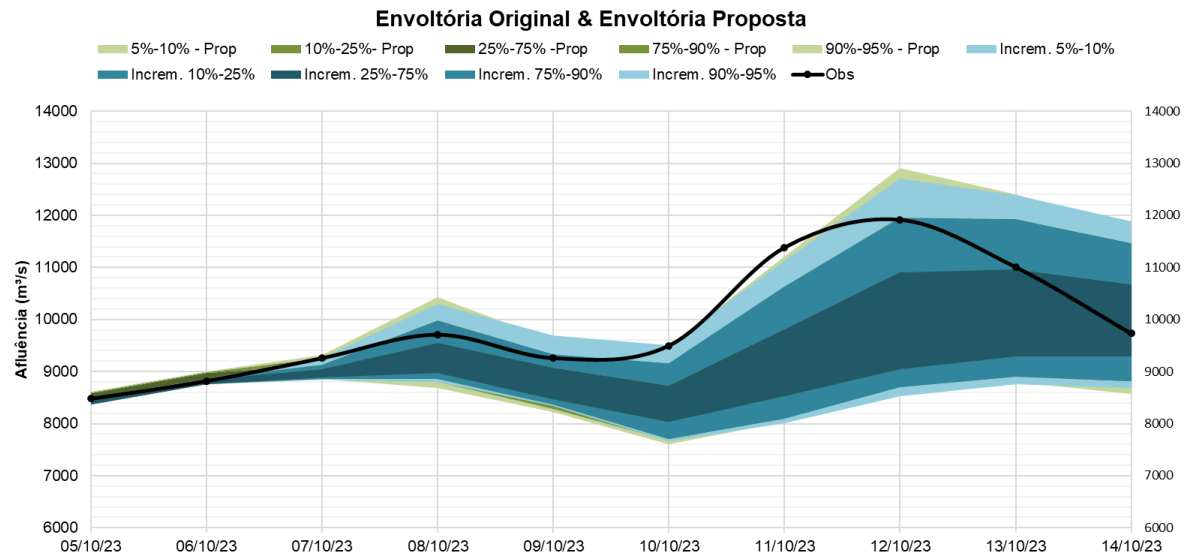
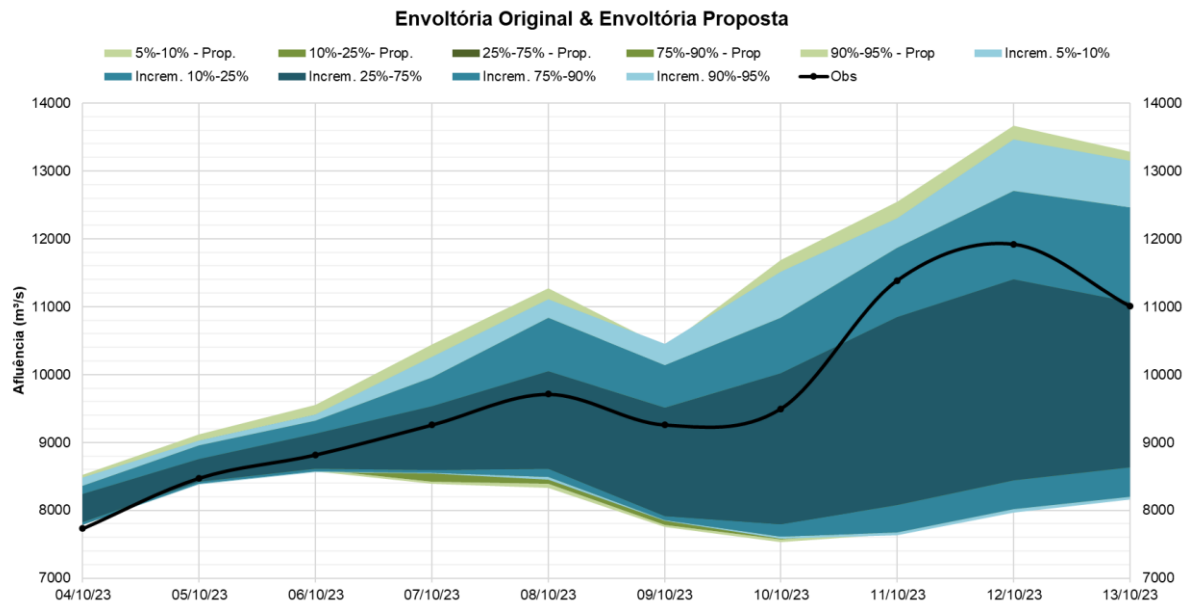


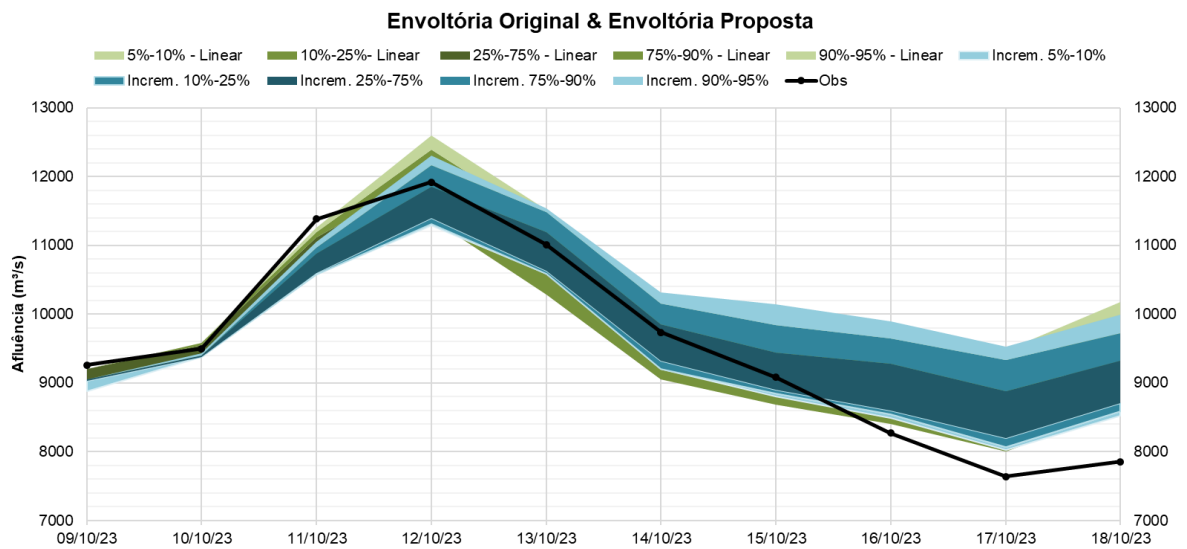
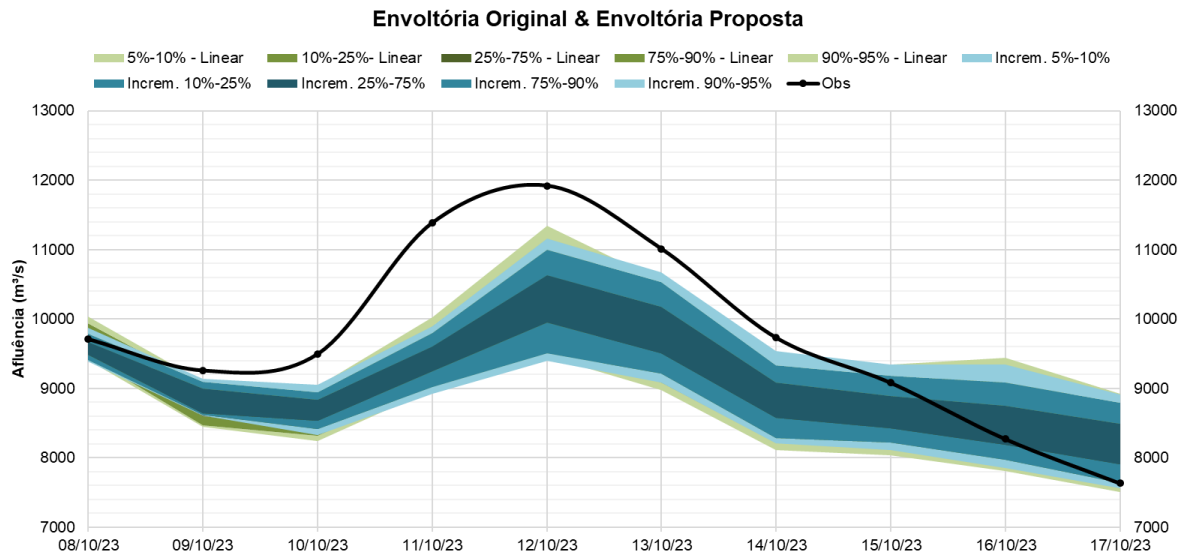
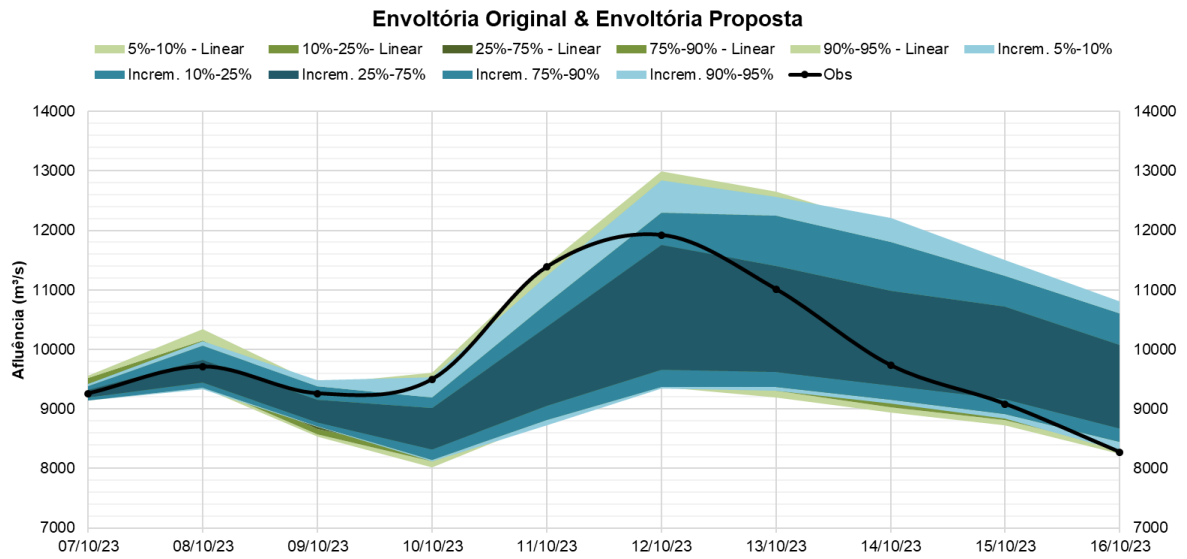
### Varição da Faixa Proposta + Dados Faixa Original & Faixa Original



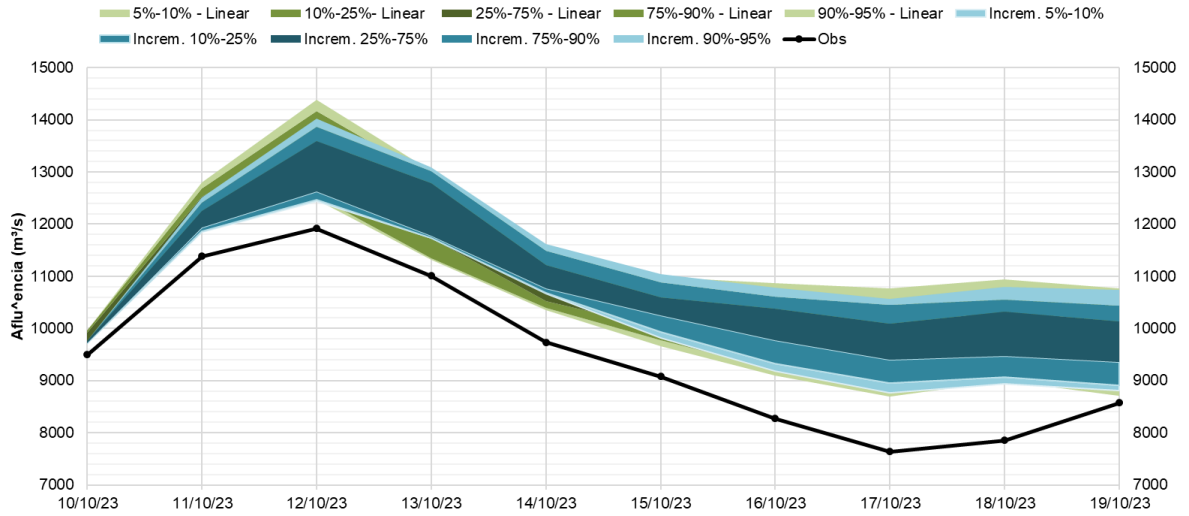
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



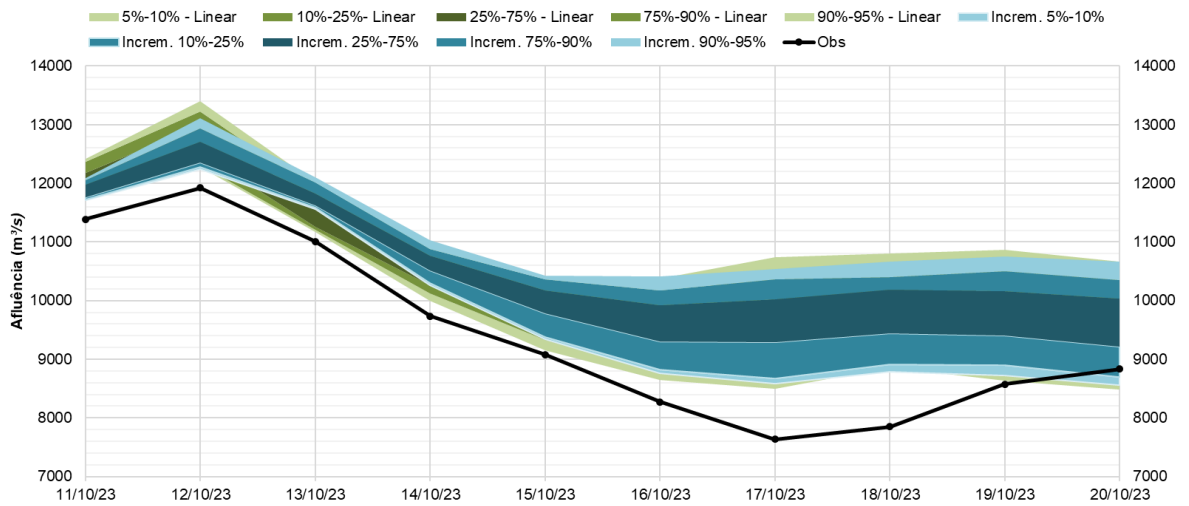




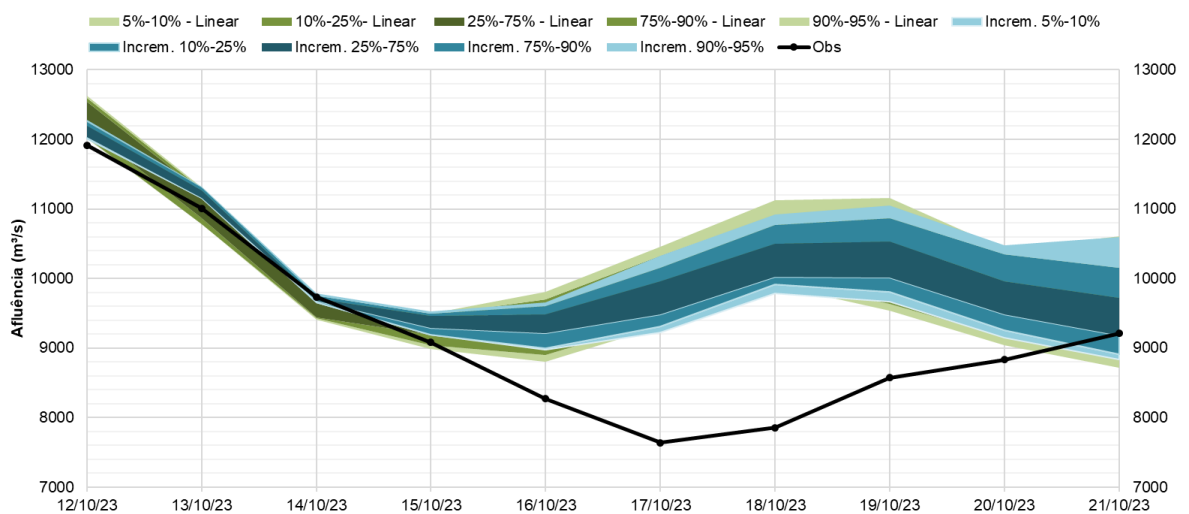
### Envoltória Original & Envoltória Proposta

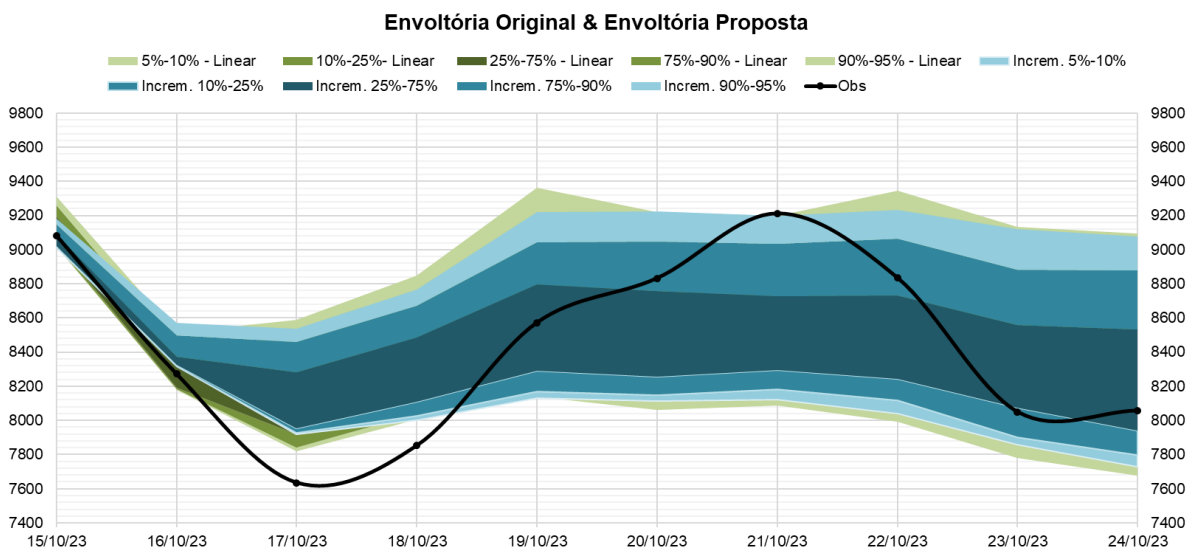
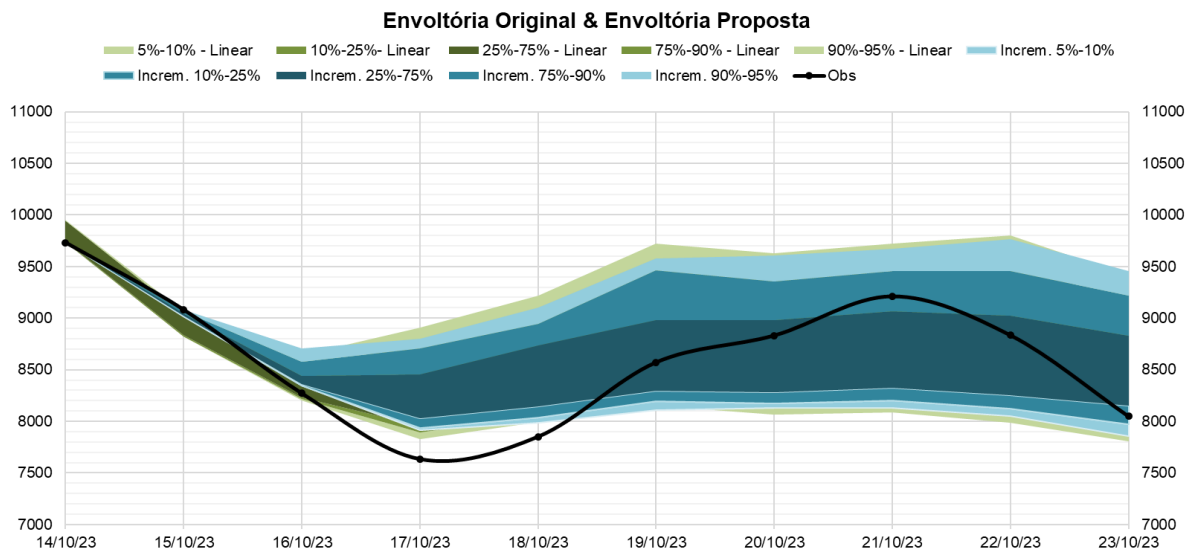
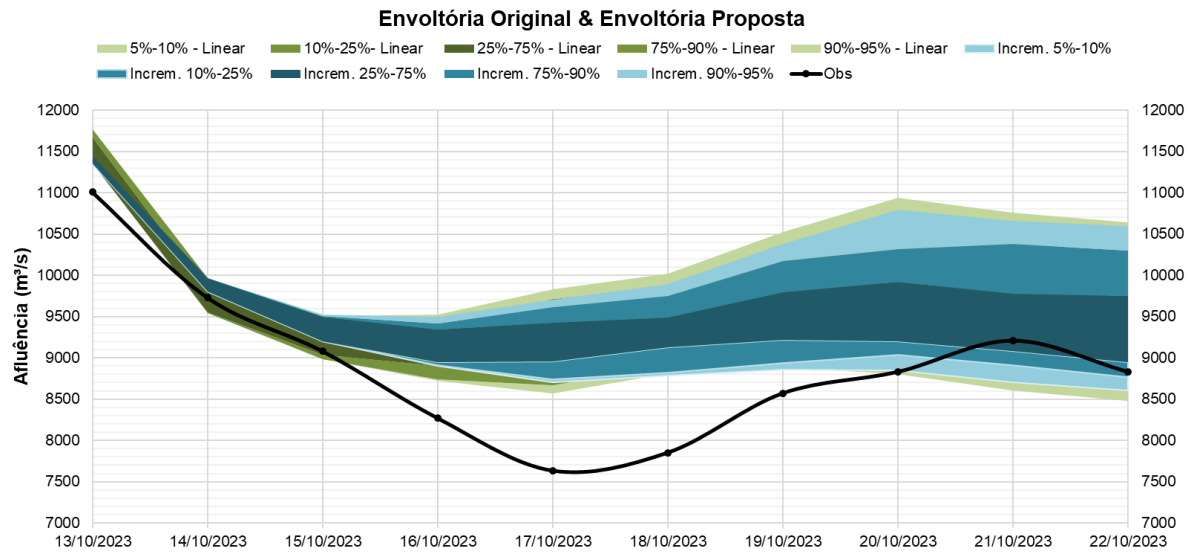


### Envoltória Original & Envoltória Proposta

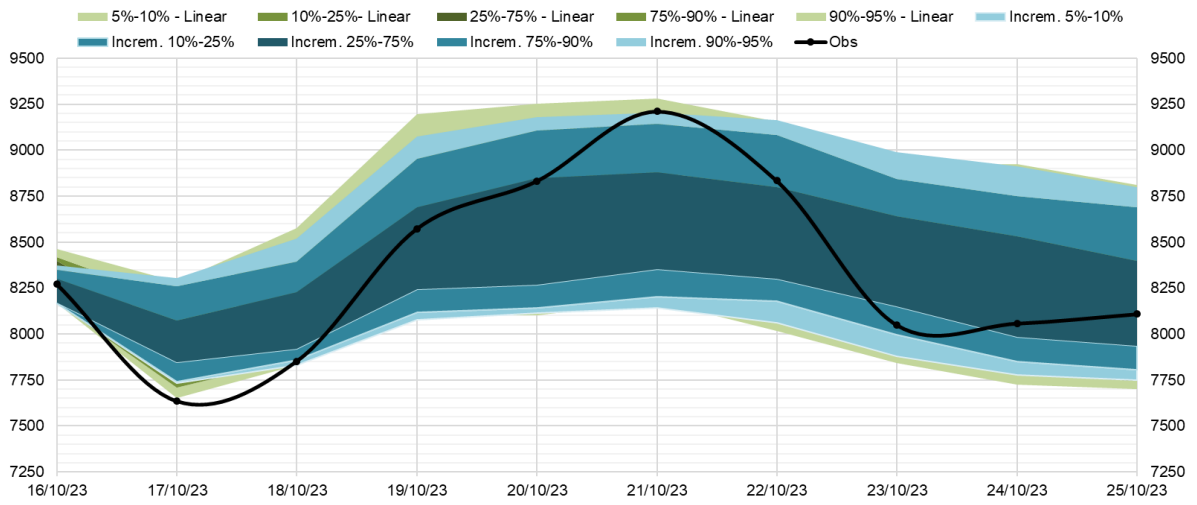


### Envoltória Original & Envoltória Proposta

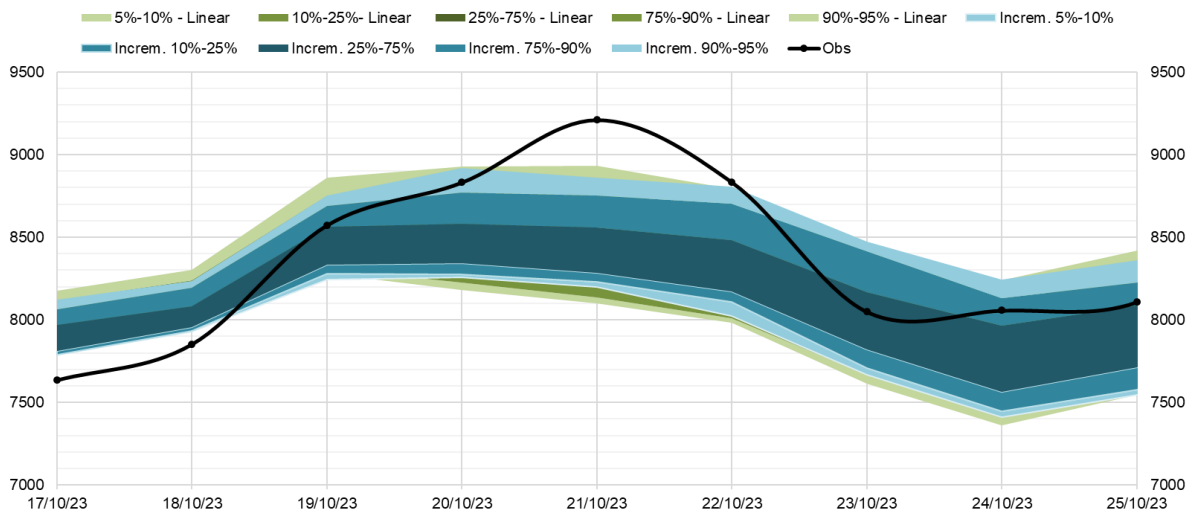




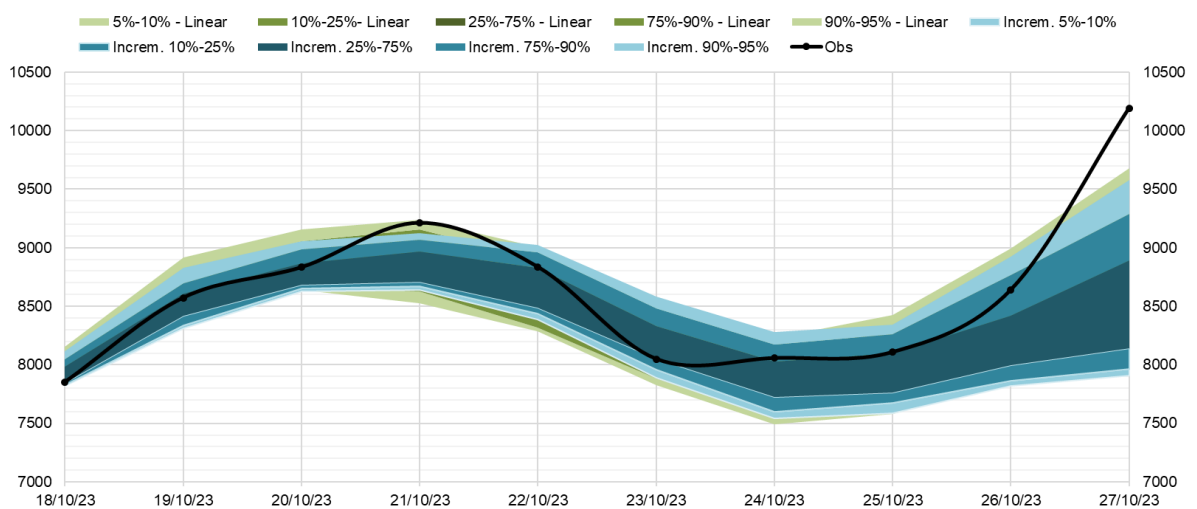
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



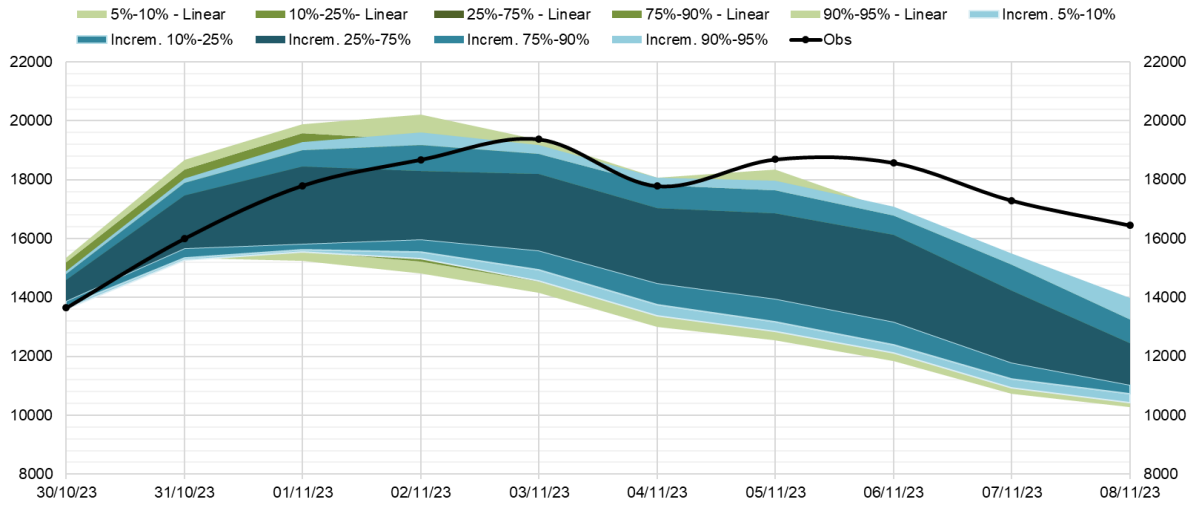
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



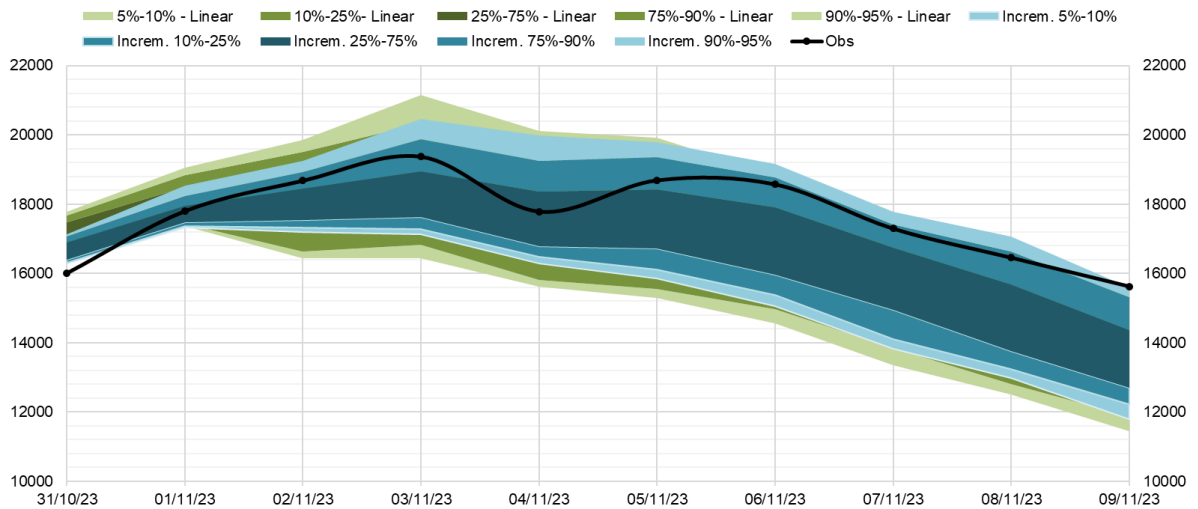
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



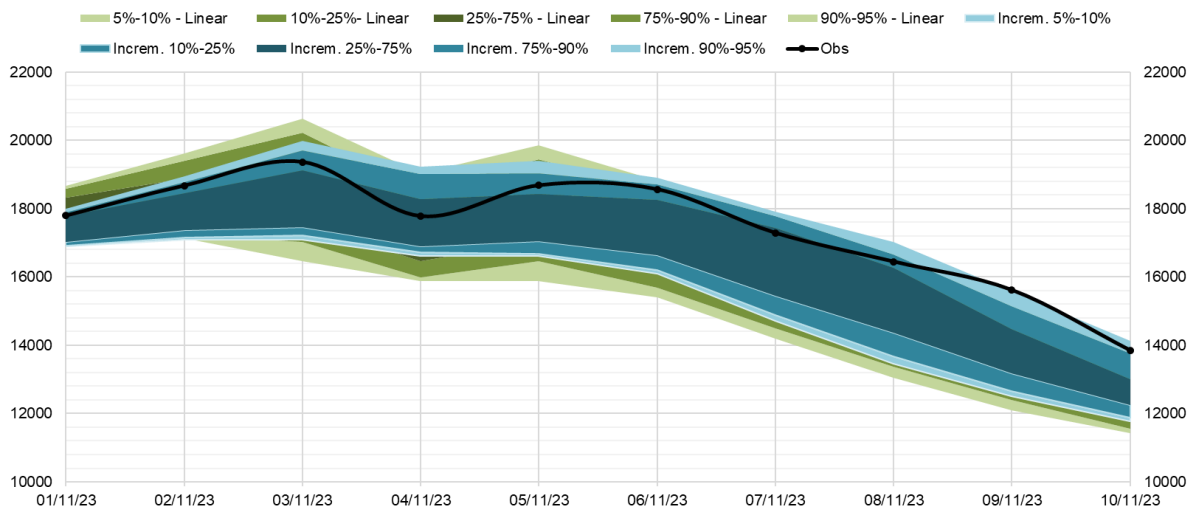
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



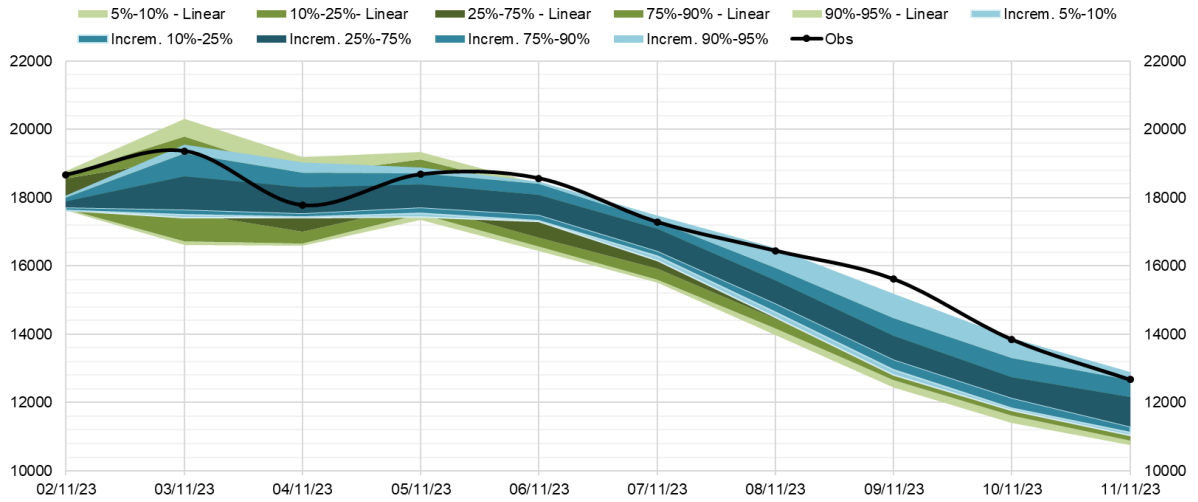
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



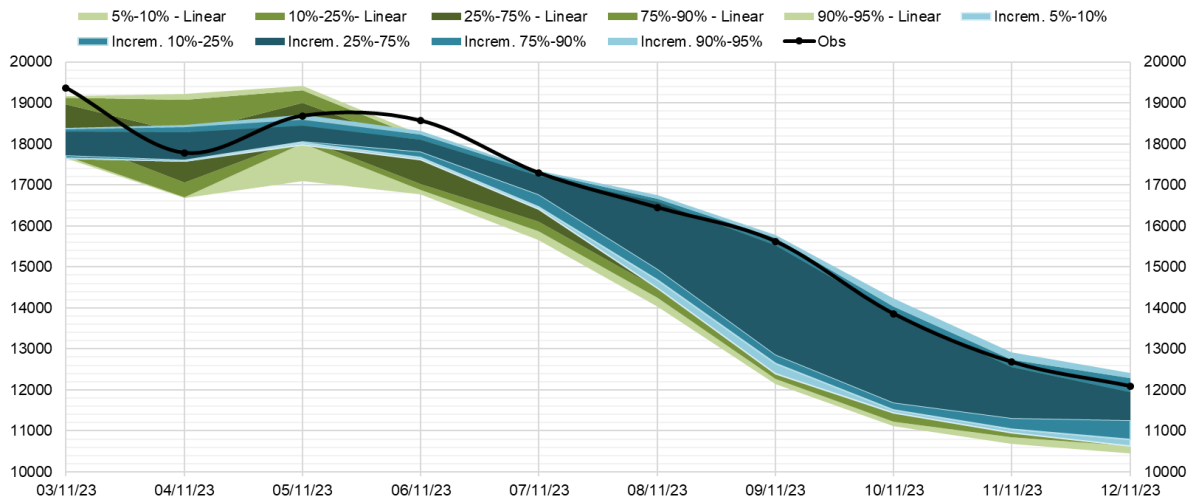
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



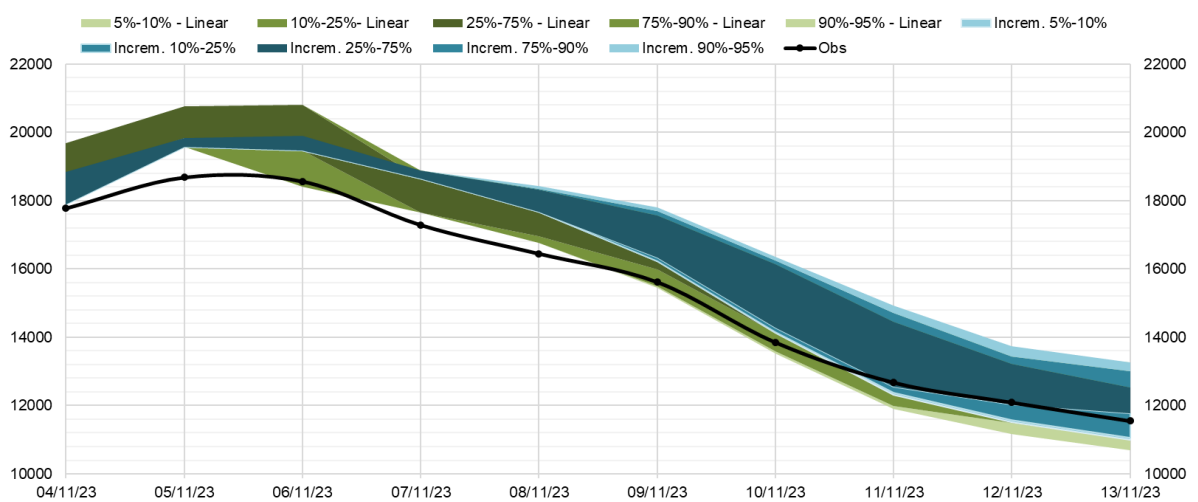
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



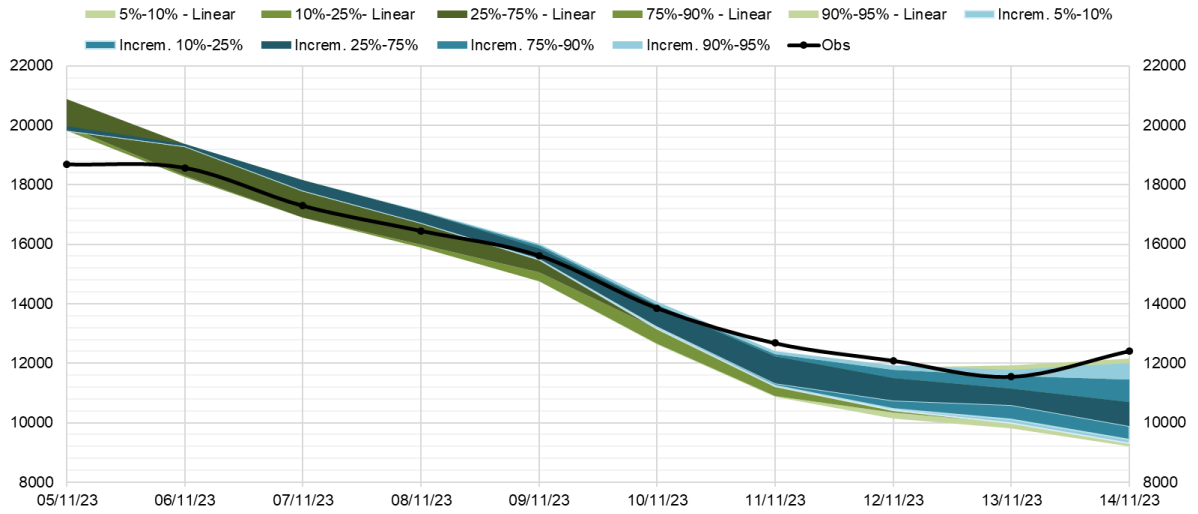
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



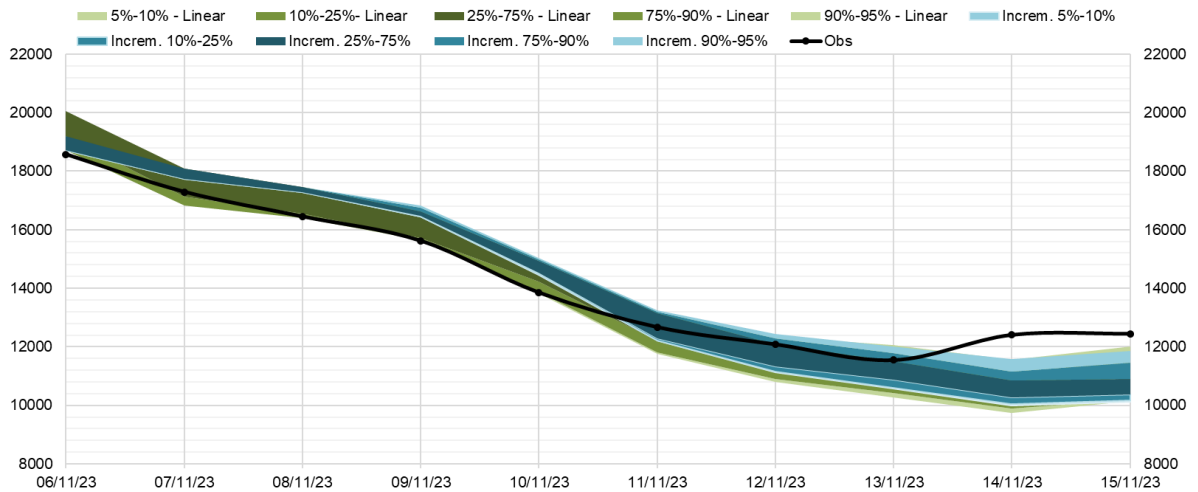
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



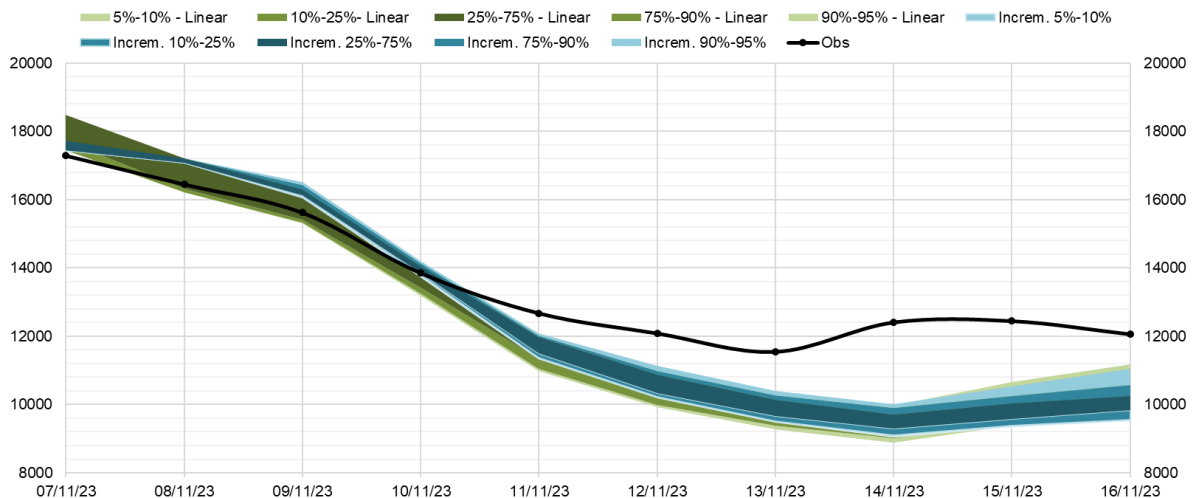
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



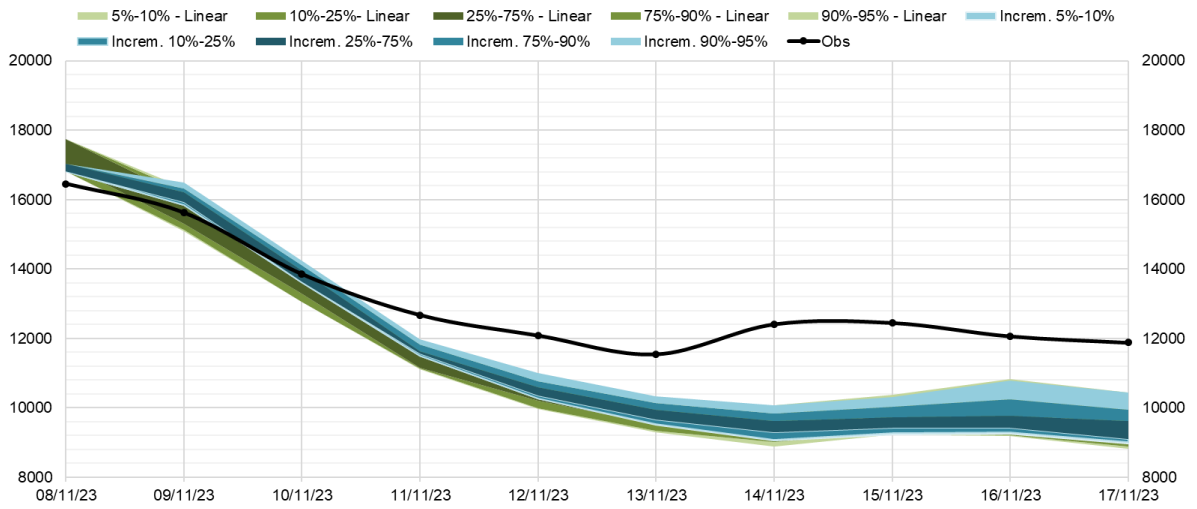
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



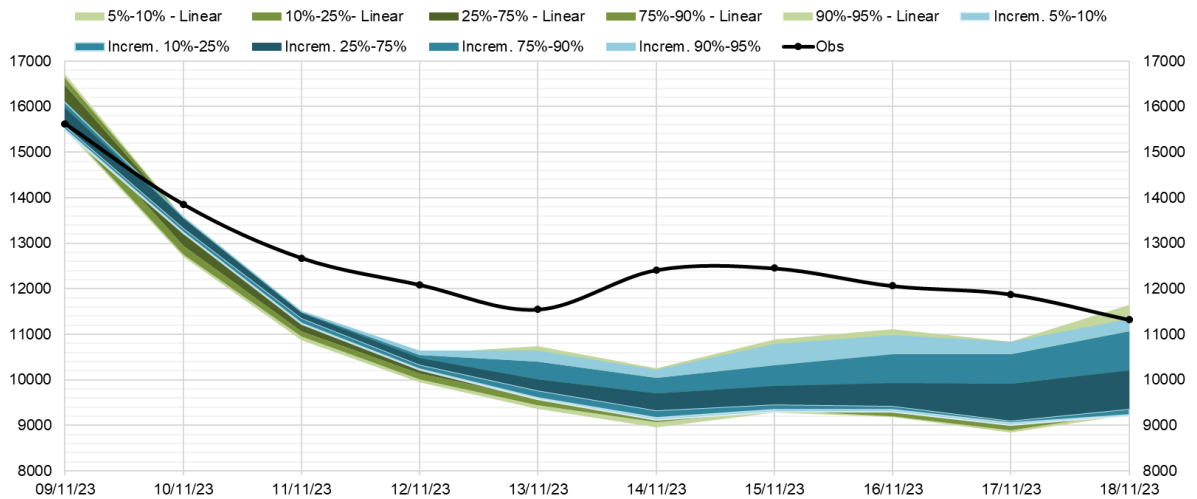
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



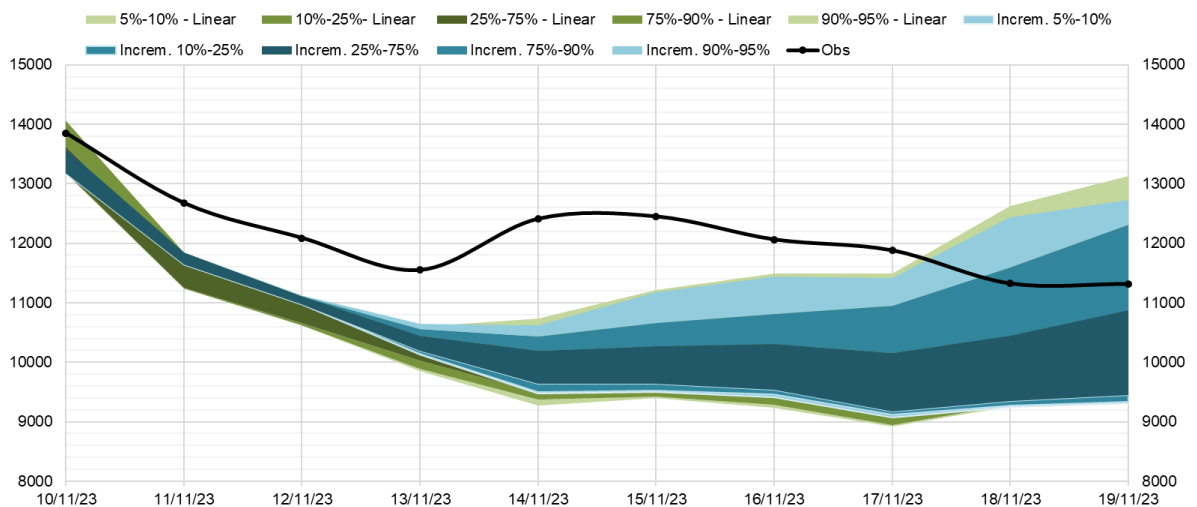
### Envoltória Original & Envoltória Proposta



### Envoltória Original & Envoltória Proposta

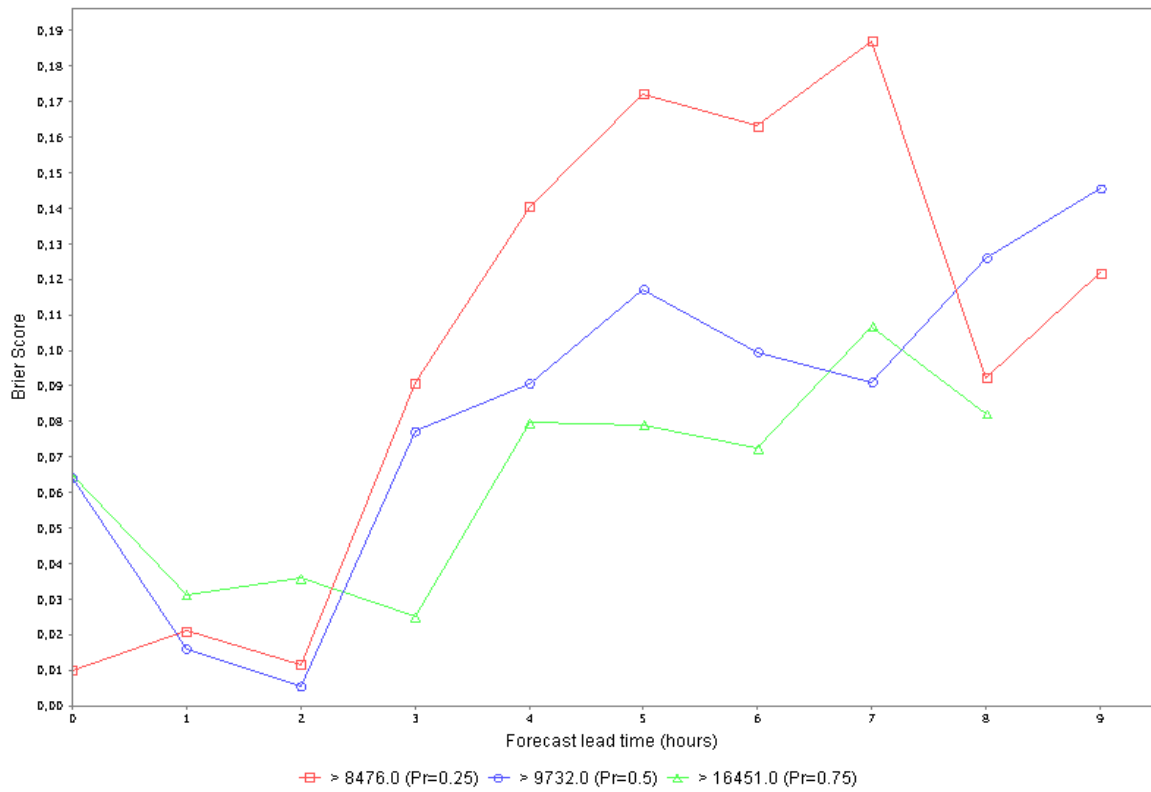


### Envoltória Original & Envoltória Proposta

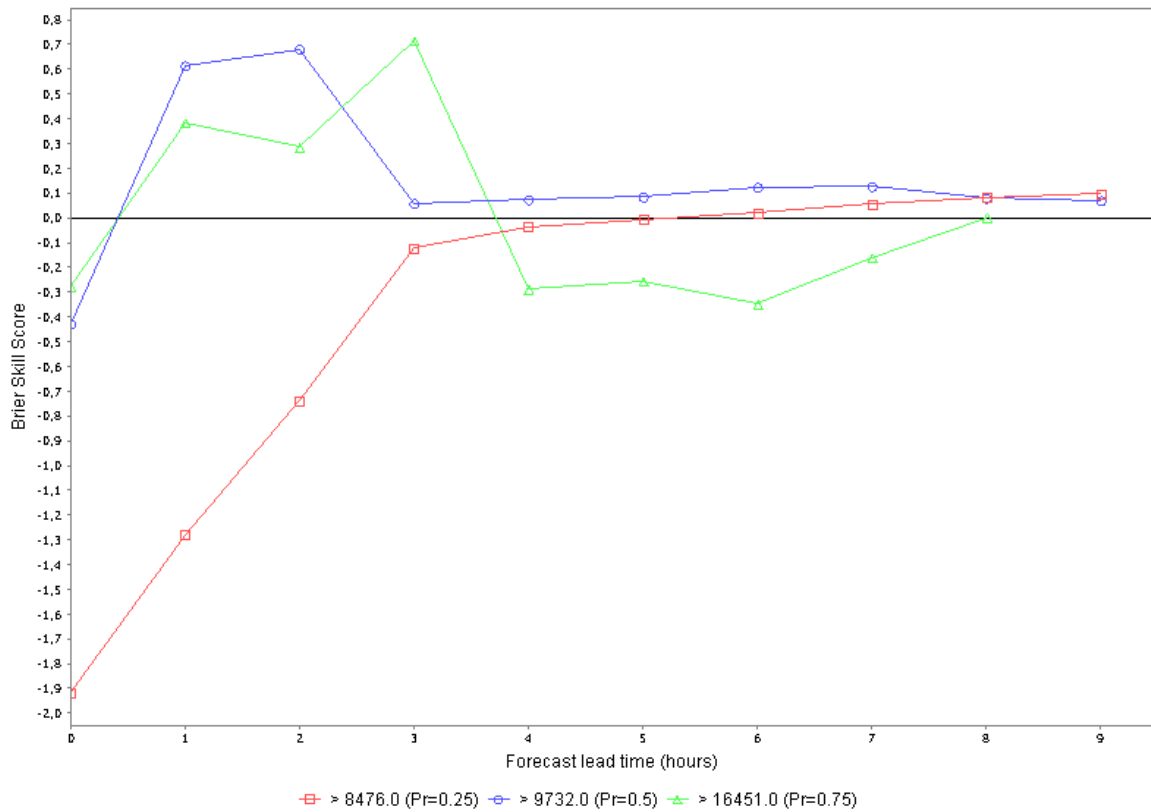


## **ANEXO C – RESULTADOS**

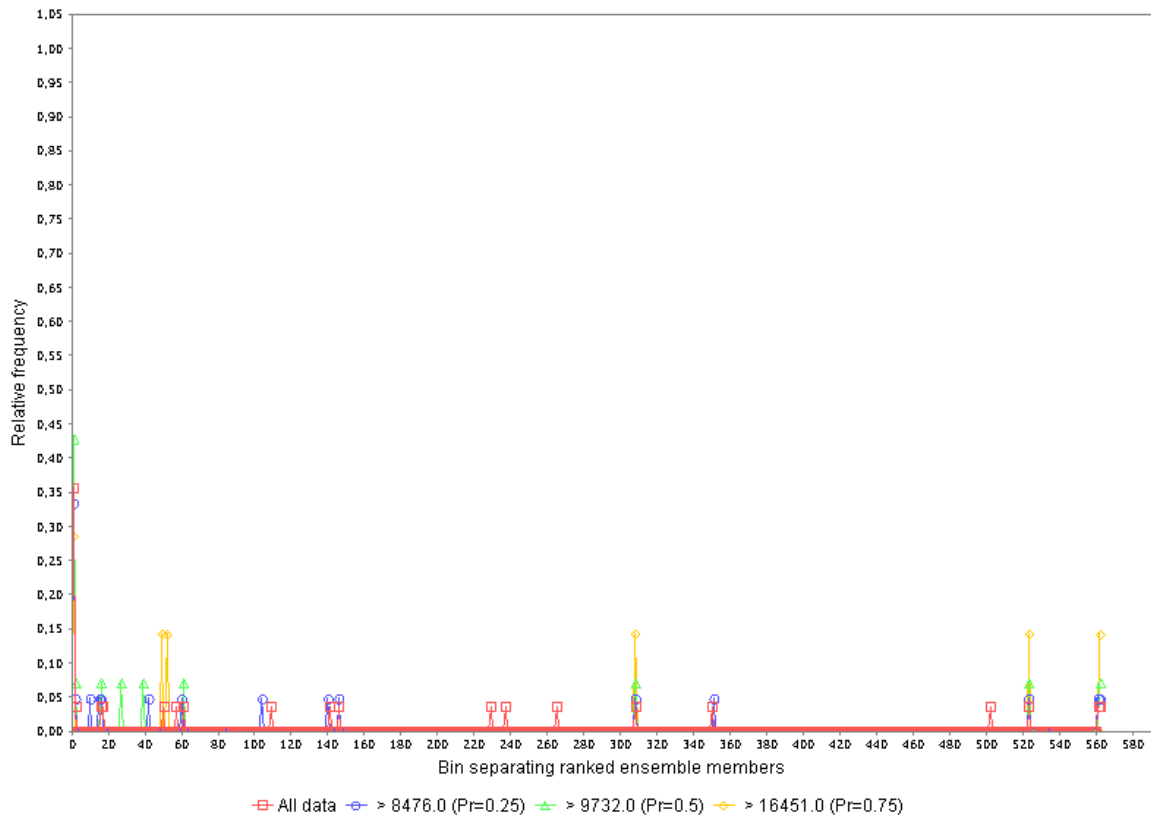
**Brier Score by forecast lead time.**  
Faixa\_Laura.Vazao



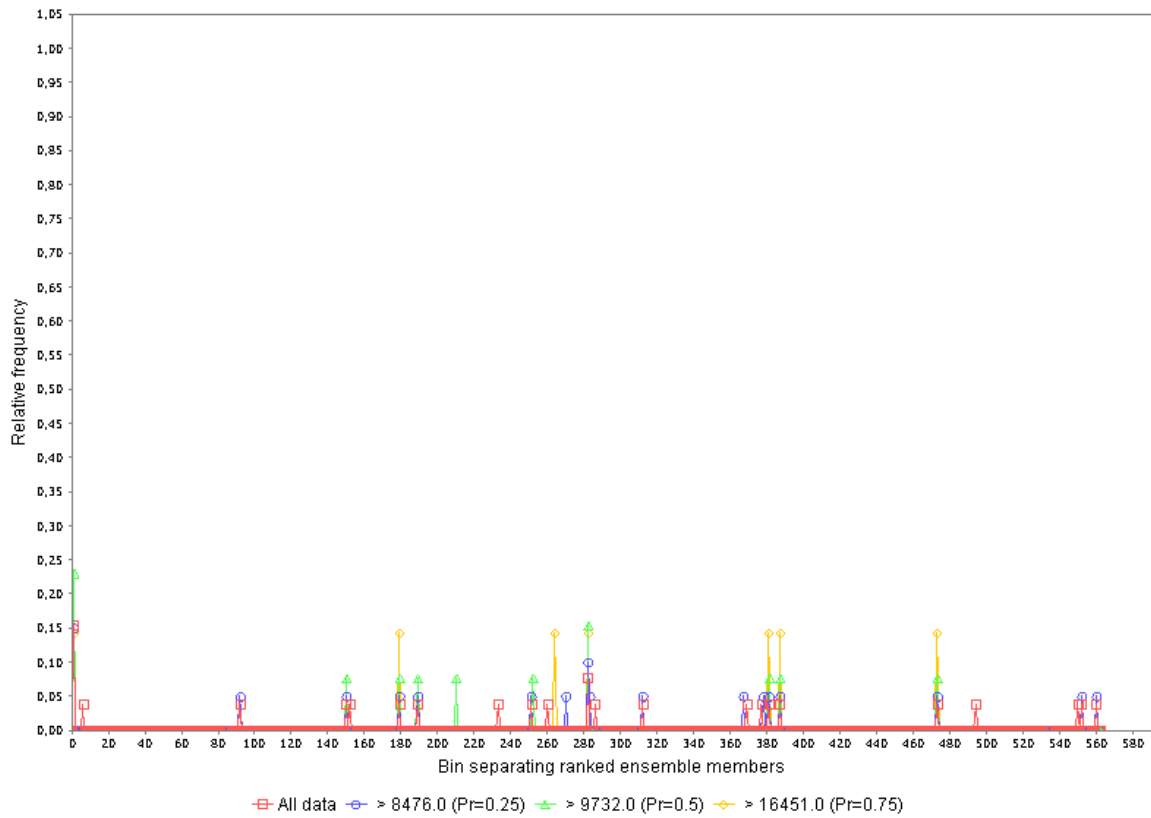
**Brier Skill Score by forecast lead time.**  
Faixa\_Laura.Vazao (reference forecast: Faixa\_Original.Vazao)



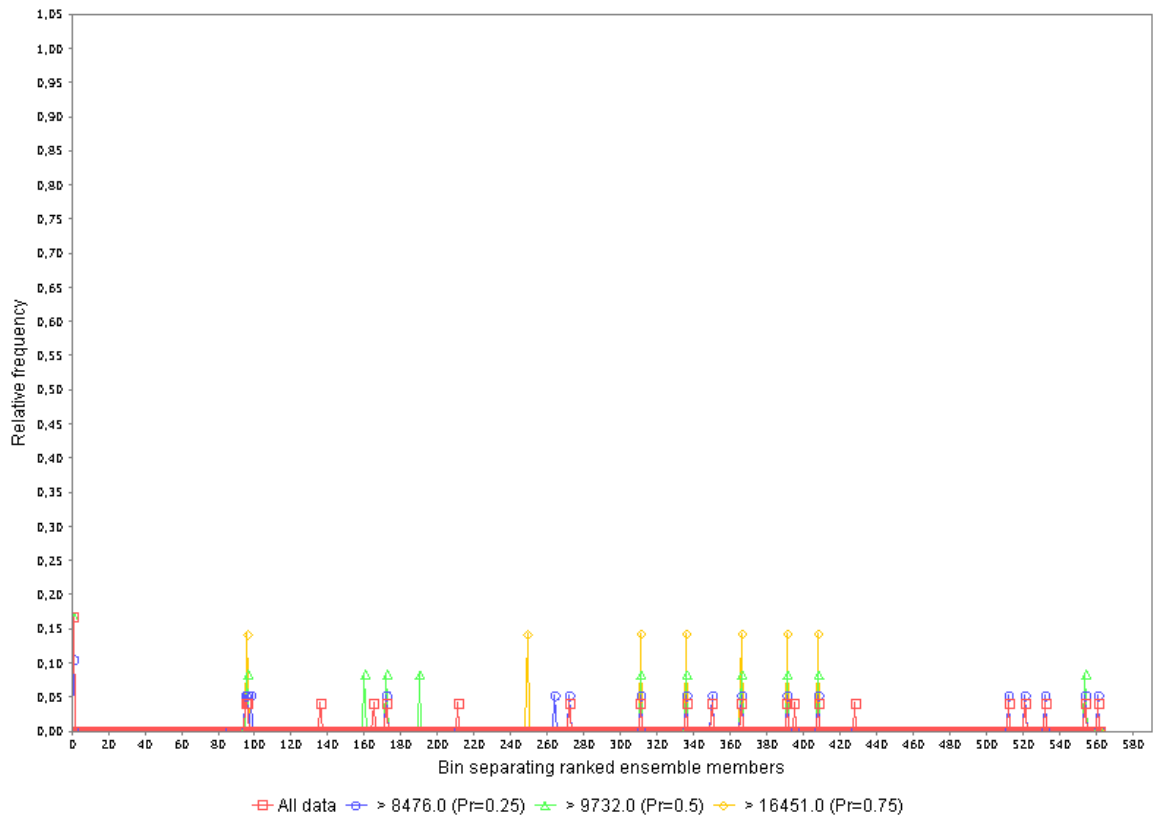
Rank histogram.  
Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 0.0



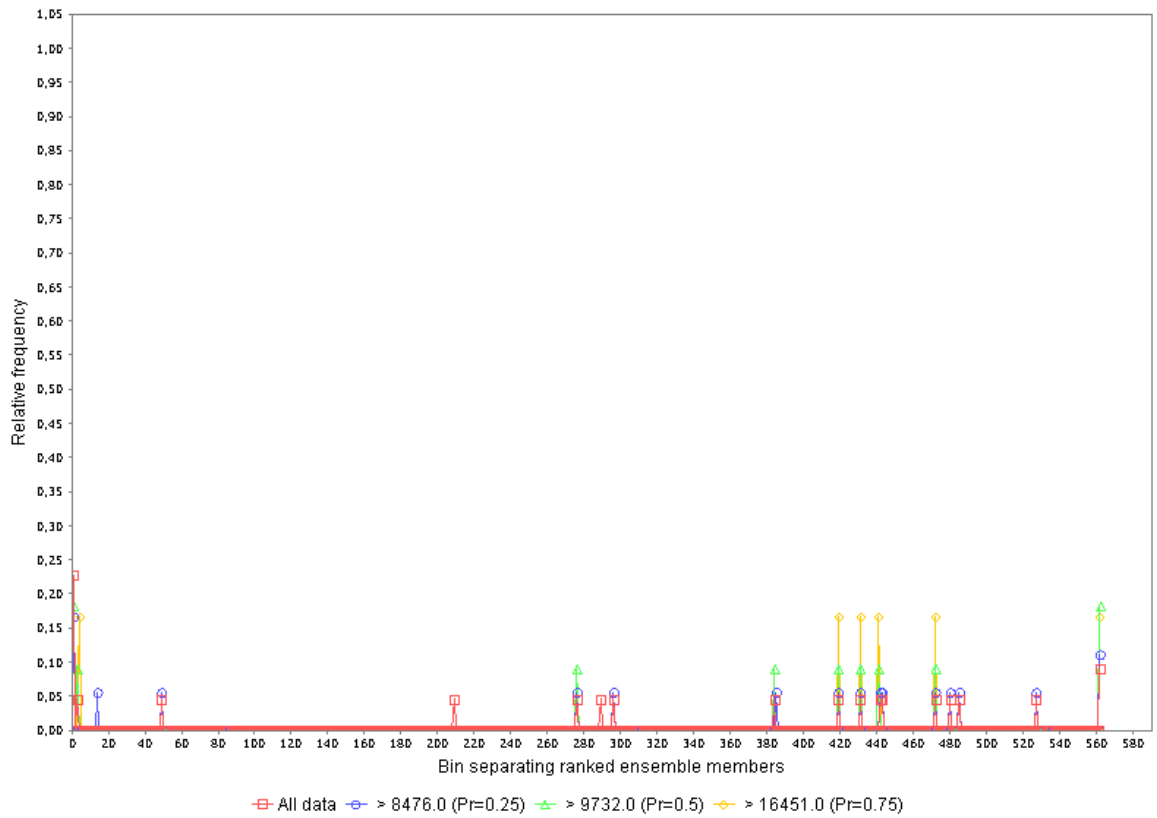
Rank histogram.  
Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 1.0



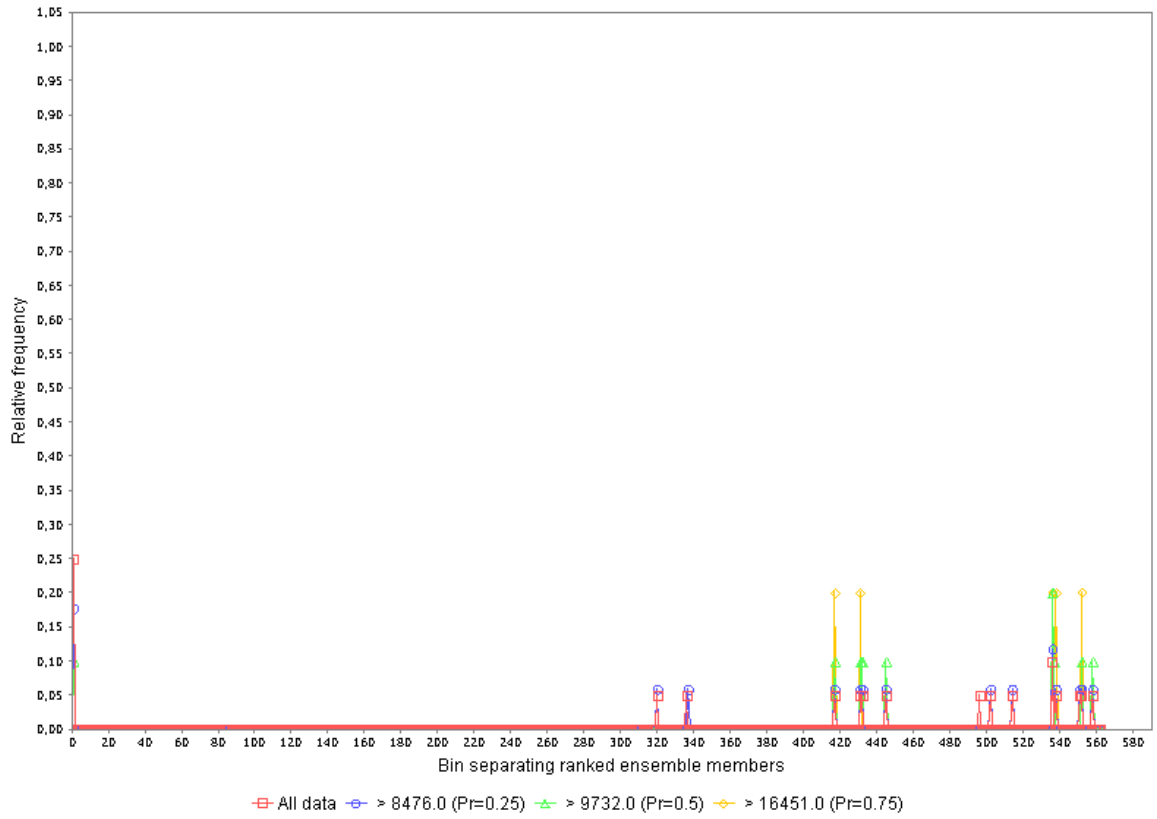
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 2.0**



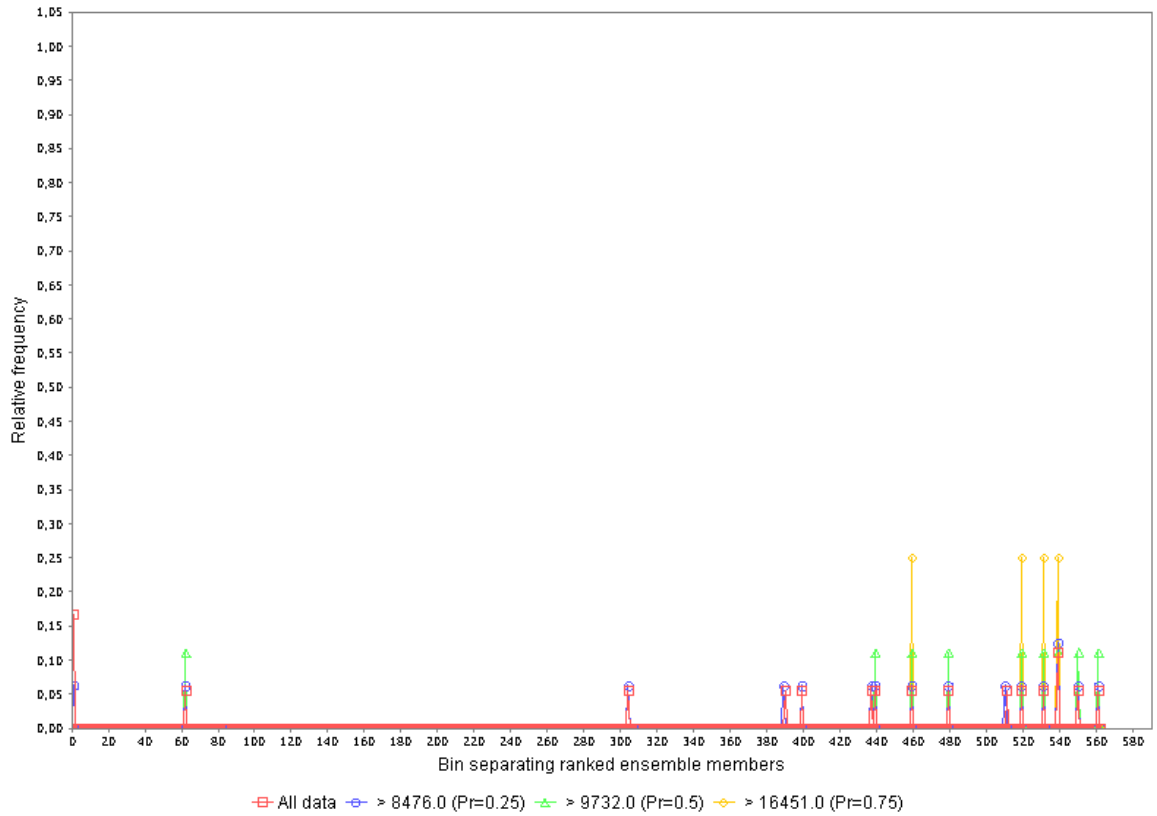
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 3.0**



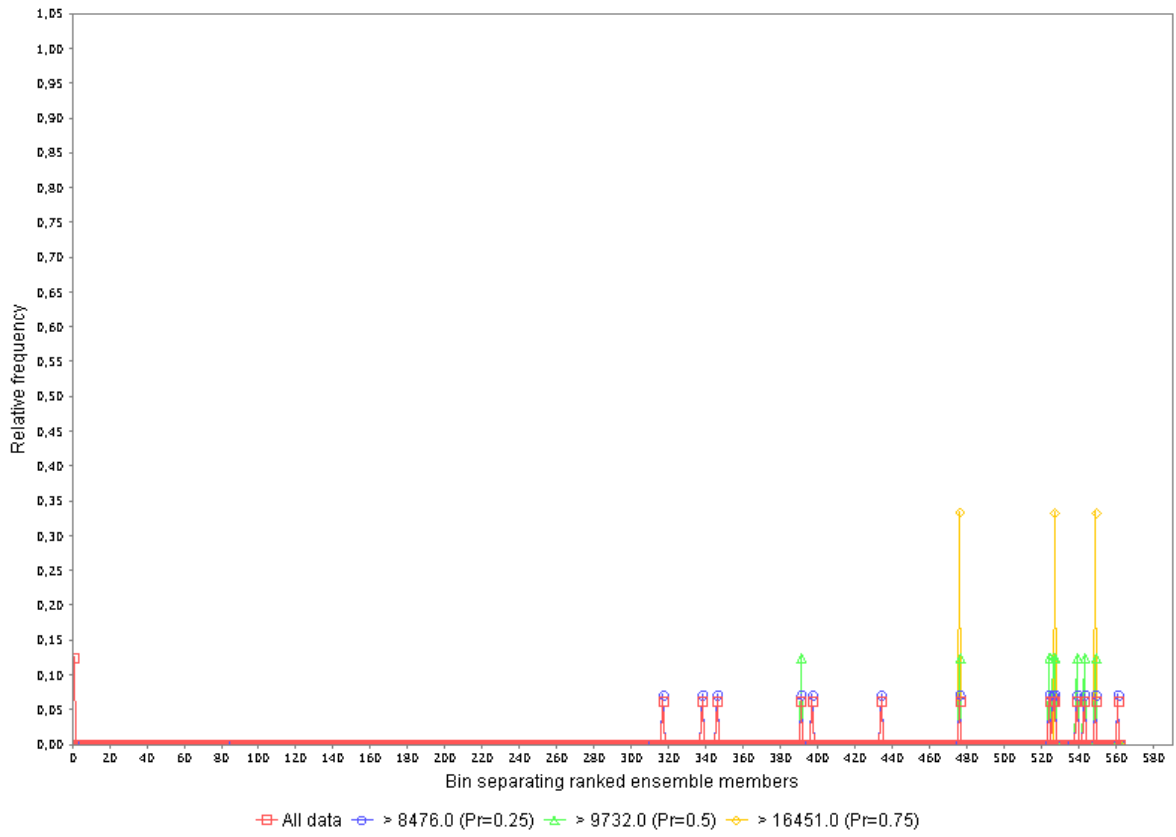
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 4.0**



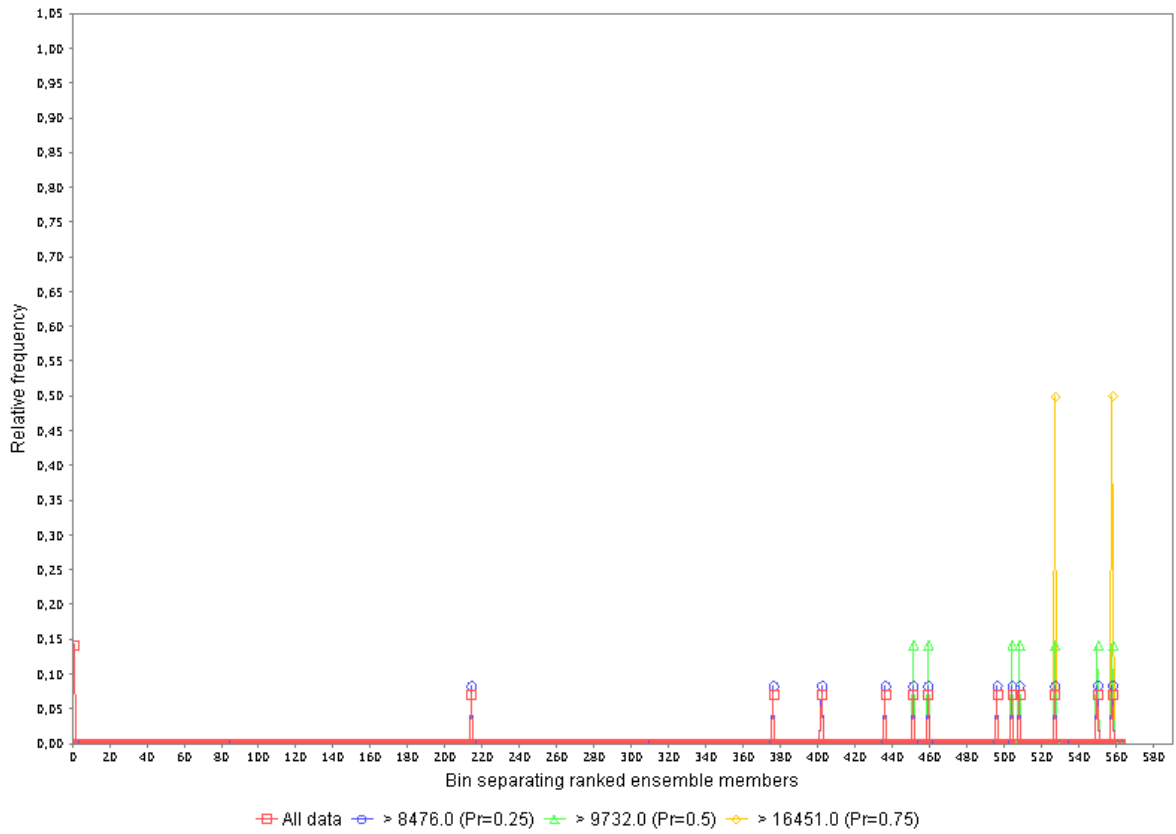
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 5.0**



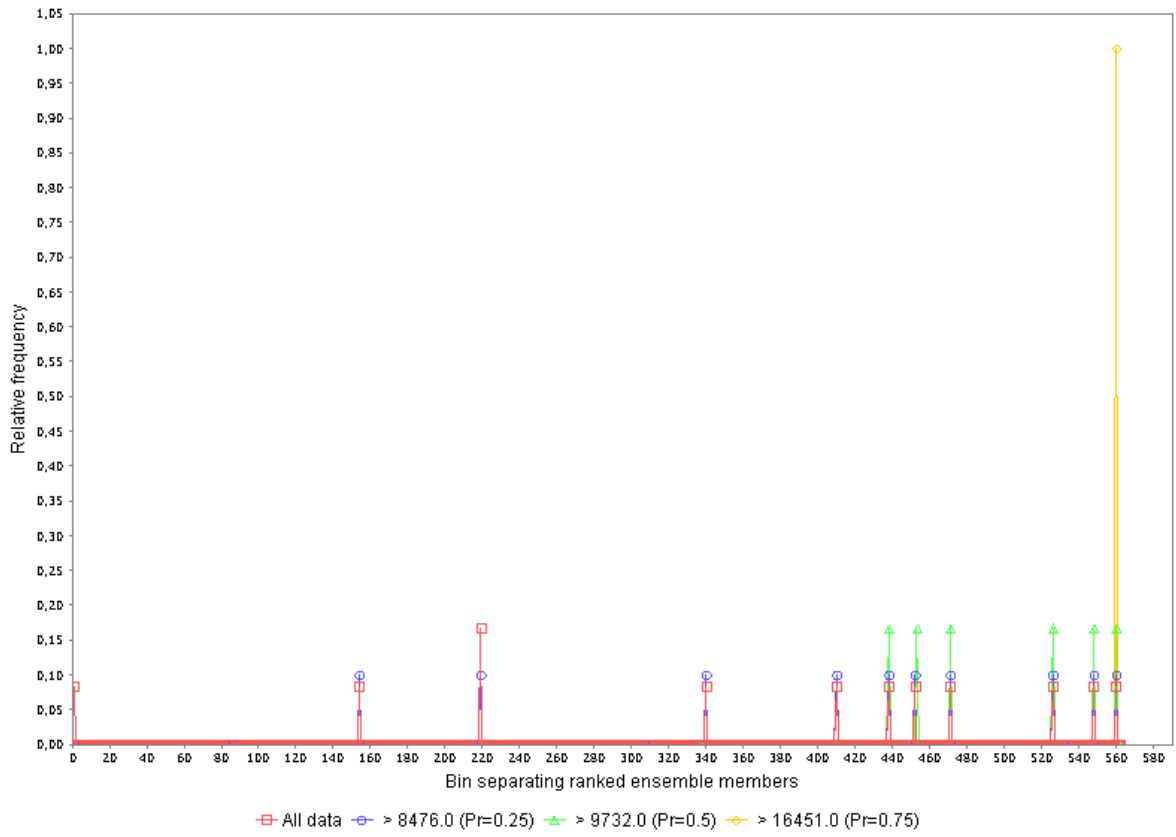
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 6.0**



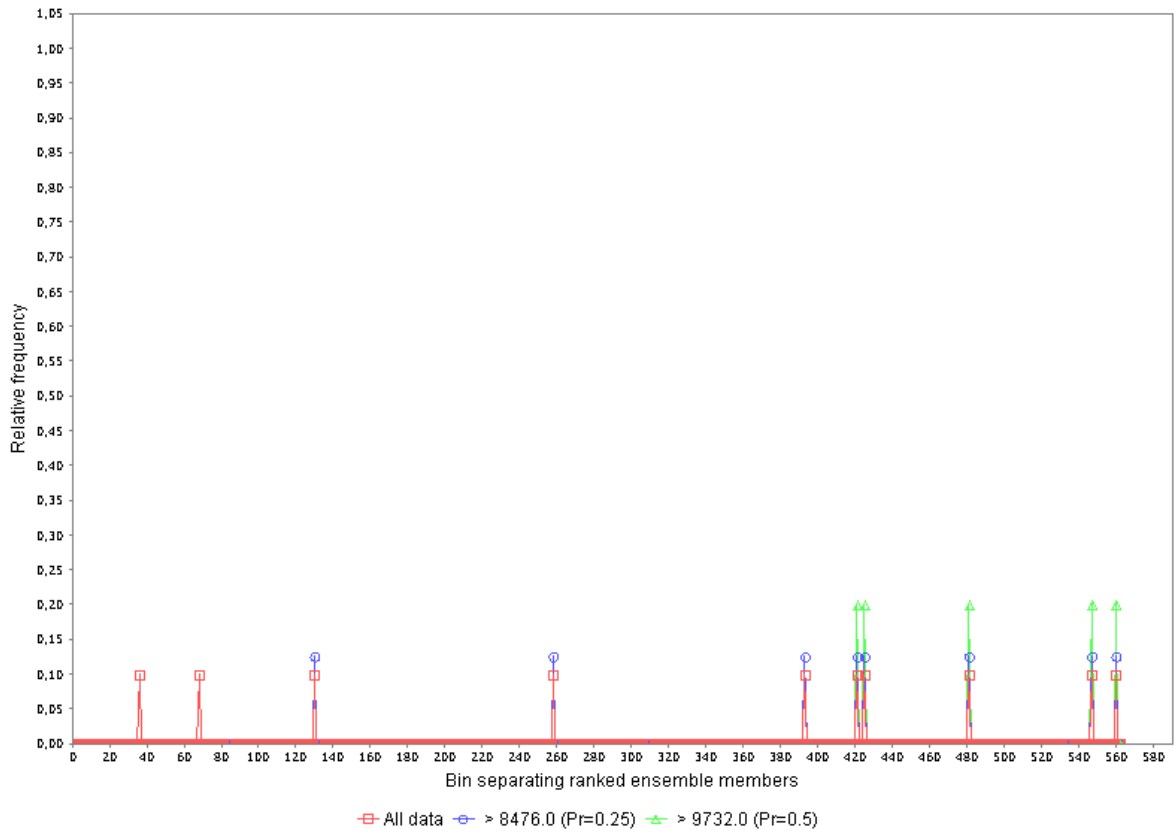
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 7.0**



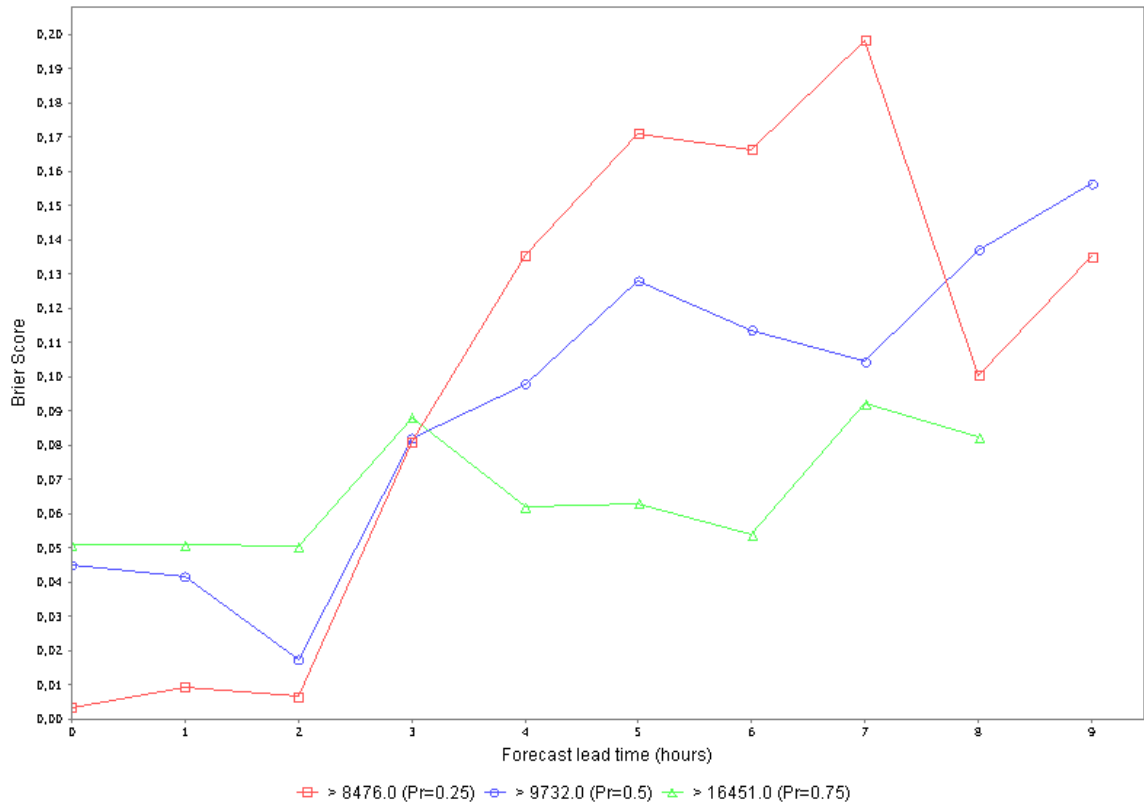
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 8.0**



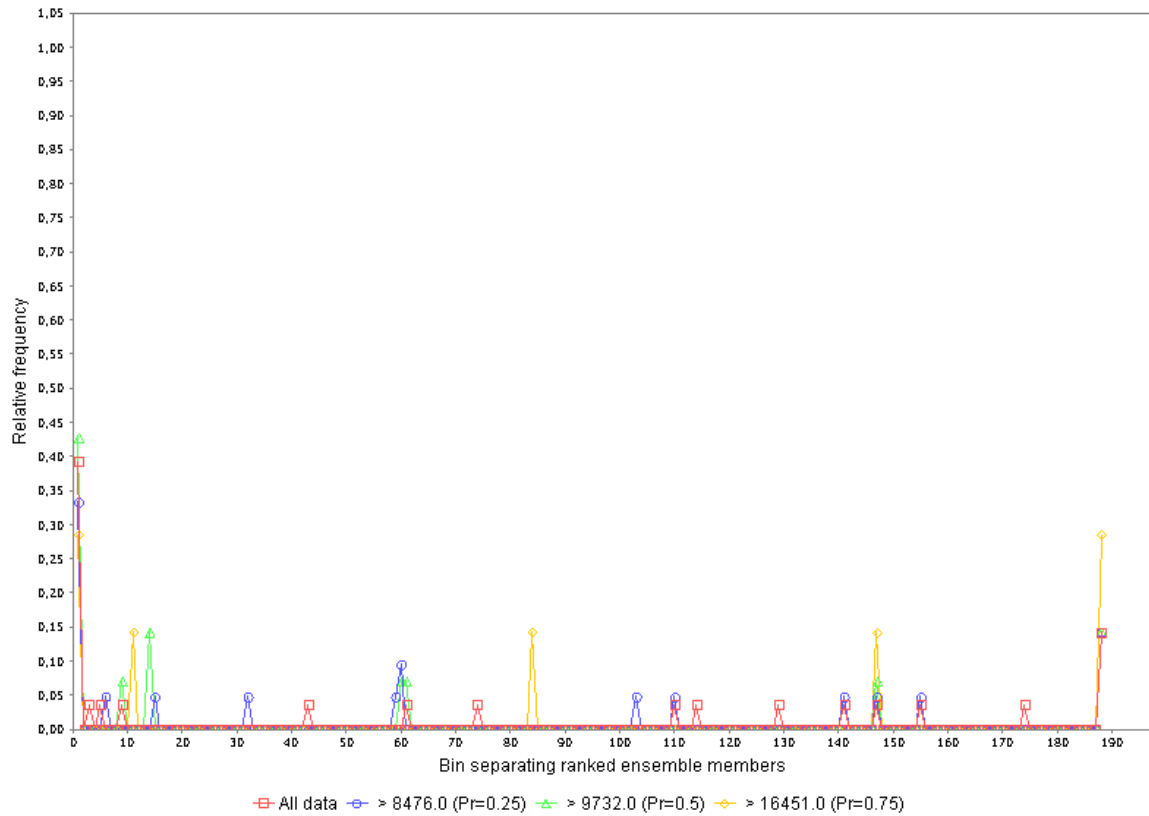
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Laura.Vazao at lead hour 9.0**



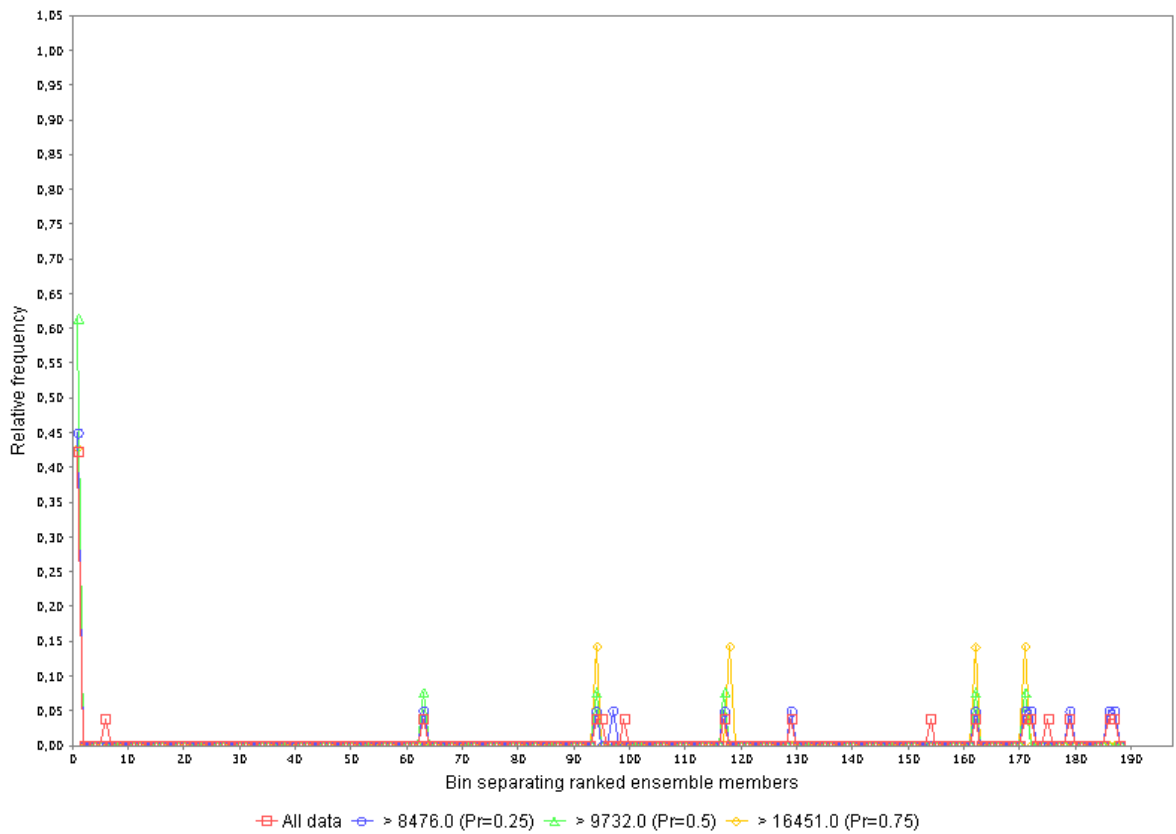
**Brier Score by forecast lead time.**  
Faixa\_Original.Vazao



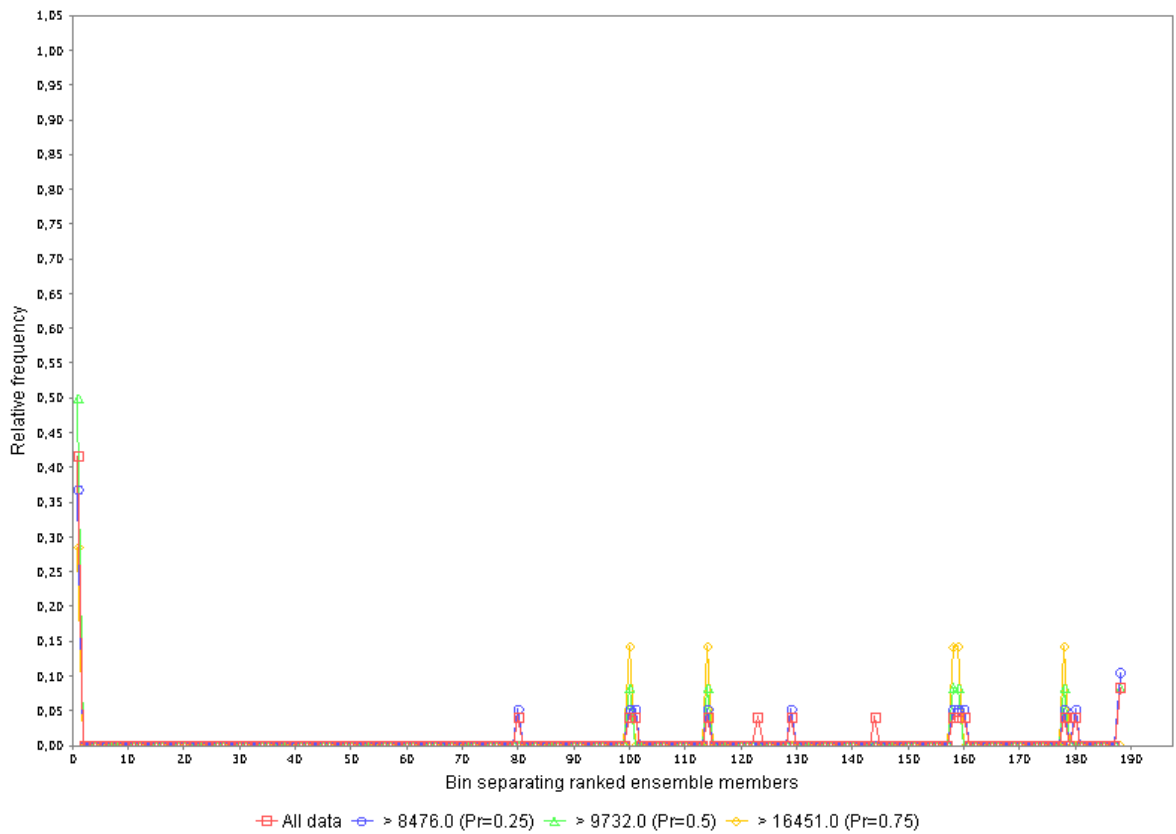
**Rank histogram.**  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 0.0



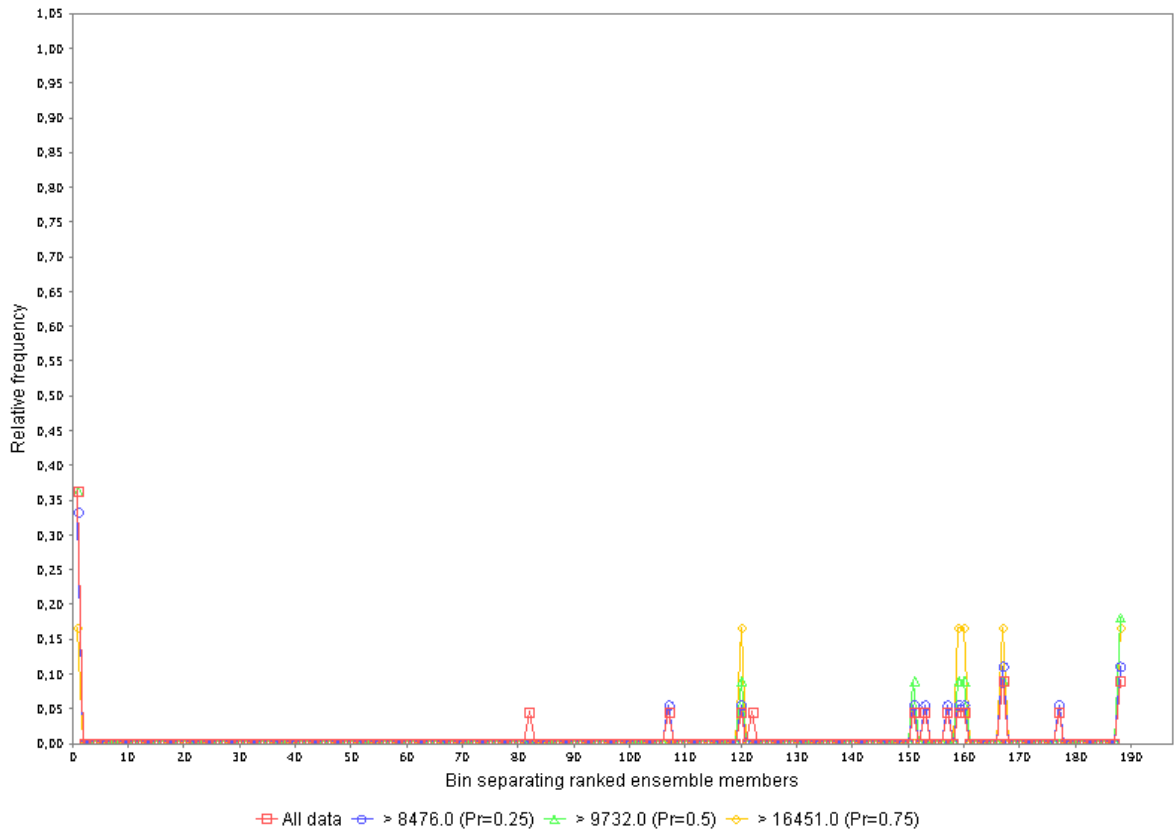
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Original.Vazao at lead hour 1.0**



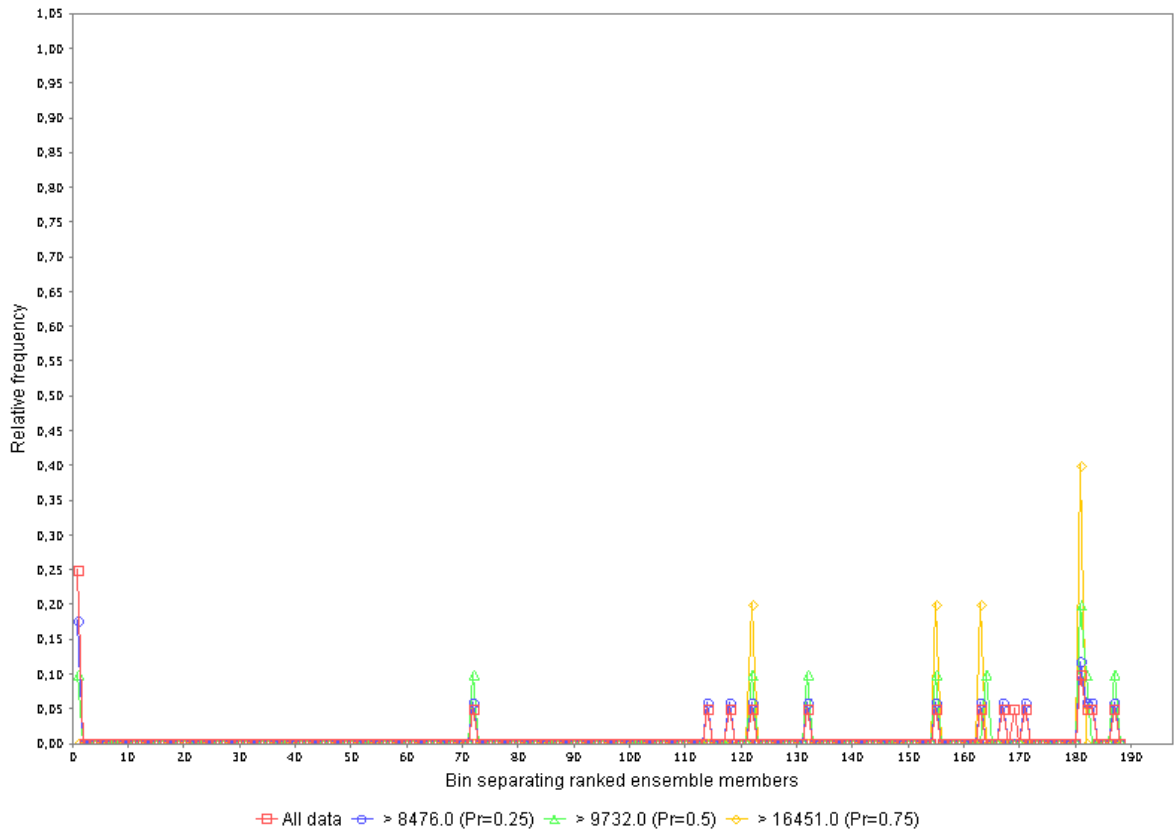
**Rank histogram.**  
**Faixa\_Original.Vazao at lead hour 2.0**



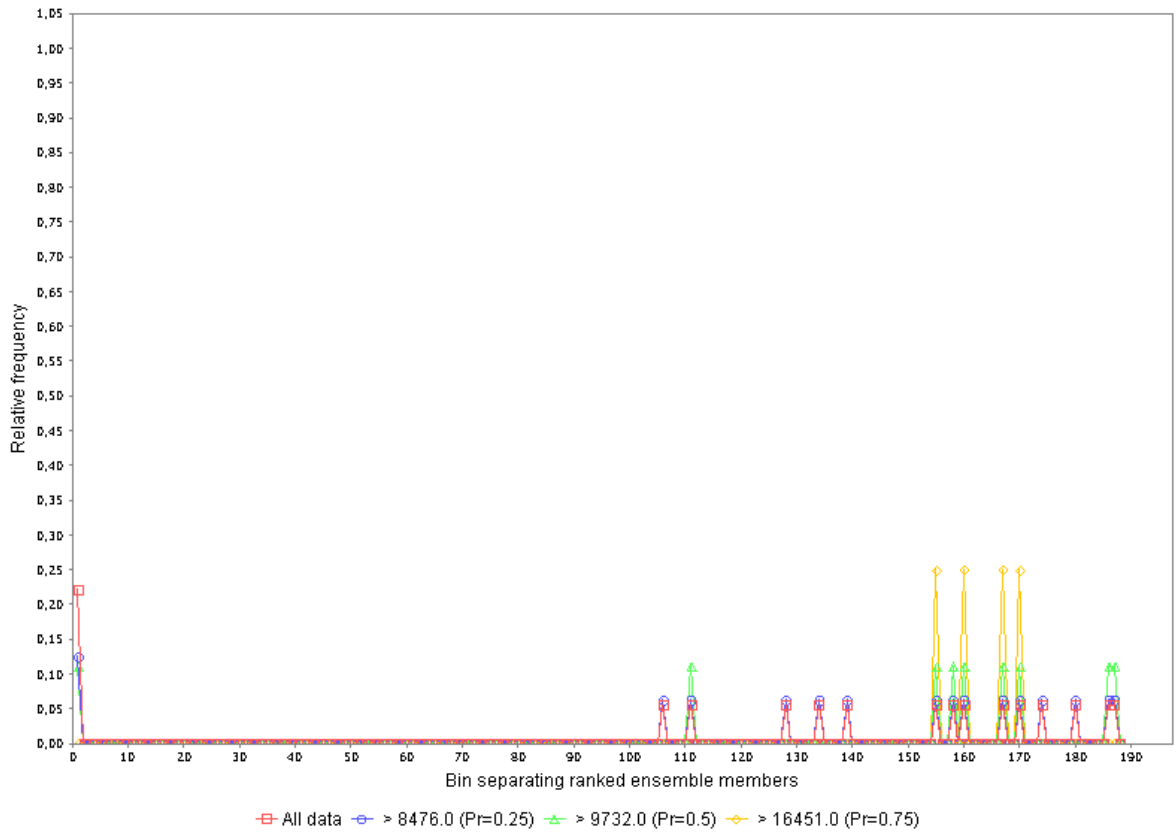
Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 3.0



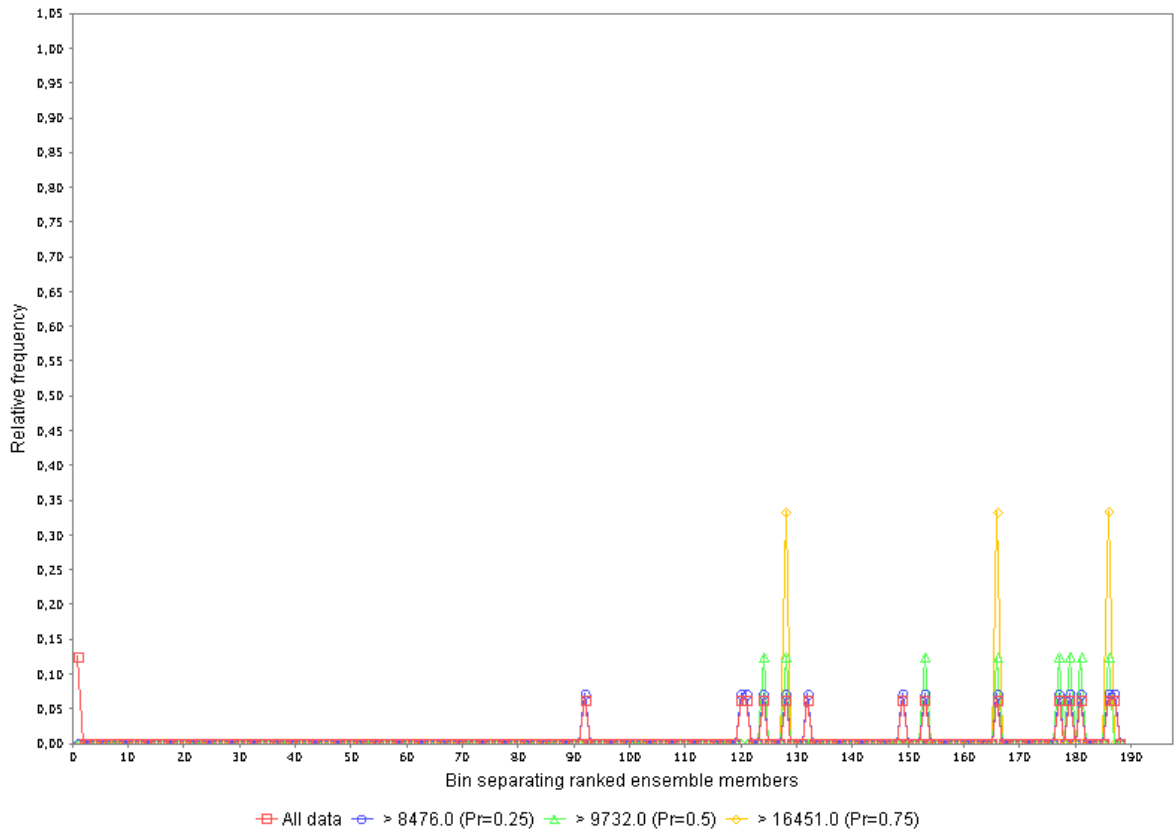
Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 4.0



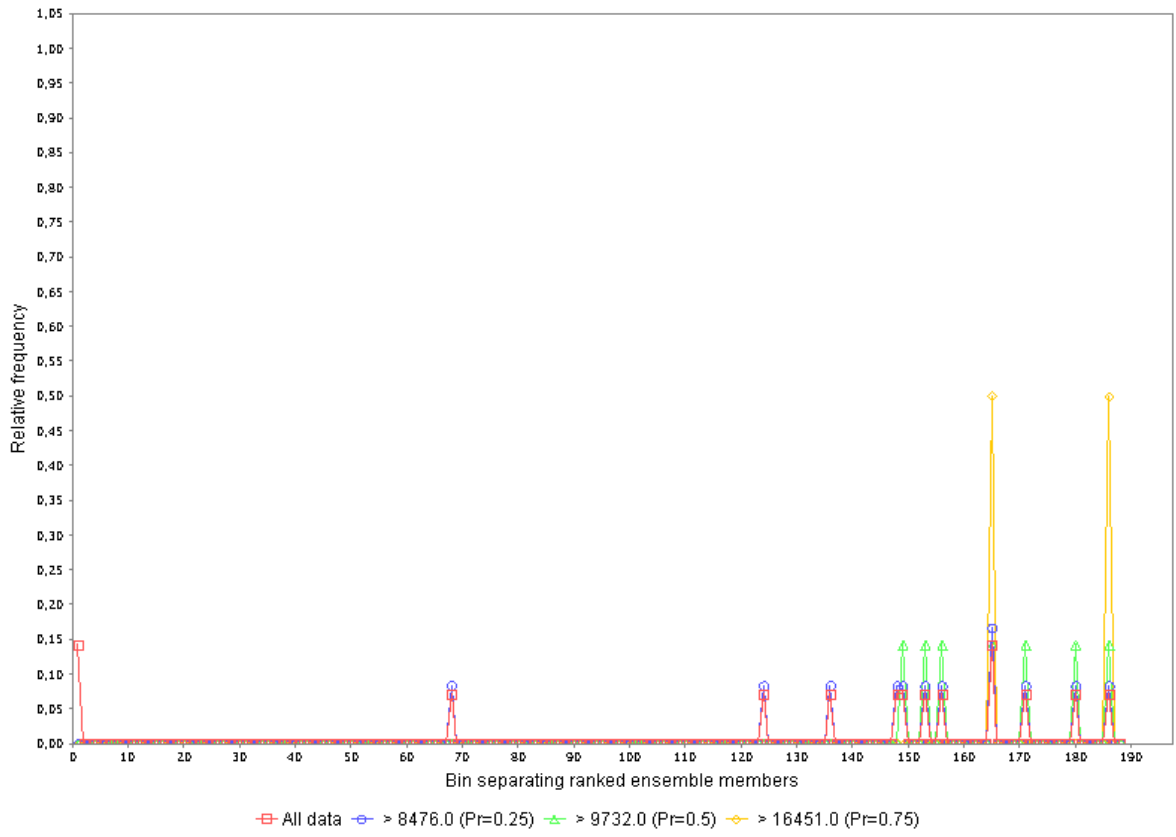
Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 5.0



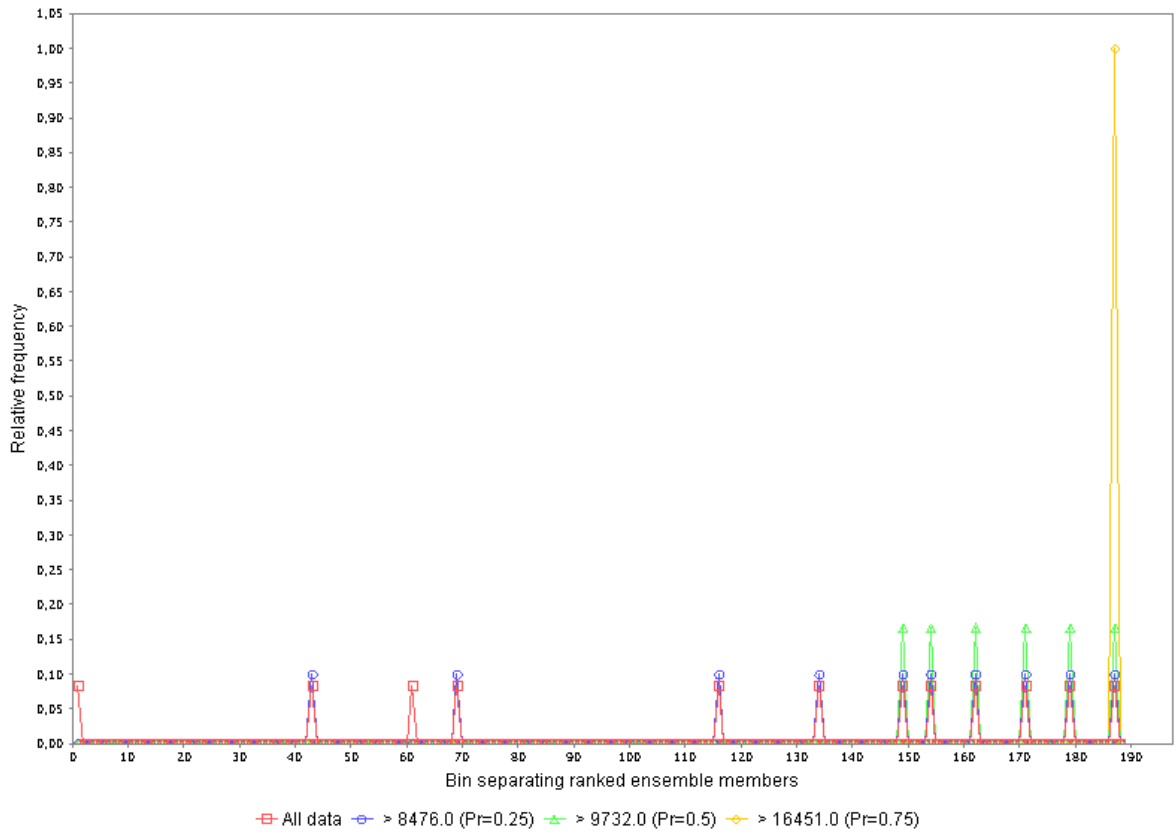
Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 6.0



Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 7.0



Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 8.0



Rank histogram.  
Faixa\_Original.Vazao at lead hour 9.0

