



MARINHA DO BRASIL

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

VALIDAÇÃO DA PREVISÃO DE VISIBILIDADE CALCULADA A PARTIR DE
DADOS DO MODELO WRF PARA A BAÍA DE GUANABARA

2º Ten. Lucas ALVIM da Cunha

Orientadora: 1ºTen. (RM2-T) Thainá Castro

Coorientadora: 2ºTen. (AA) Eduarda Vanzan

Niterói-RJ, Brasil

Outubro, 2025

Lucas Alvim da Cunha

VALIDAÇÃO DA PREVISÃO DE VISIBILIDADE CALCULADA A PARTIR DE
DADOS DO MODELO WRF PARA A BAÍA DE GUANABARA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientadora: 1ºTen. (RM2-T) Thainá Castro
Coorientadora: 2ºTen. (AA) Eduarda Vanzan

Niterói – RJ

Outubro, 2025

Cunha, Lucas Alvim

Validação da previsão de visibilidade calculada a partir de dados do modelo wrf para a Baía de Guanabara / Lucas Alvim da Cunha. – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2025.

x, 20 f.: il. Color.; 29,7 cm.

Orientadora: Thainá Castro.

Coorientadora: Eduarda Vanzan.

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 30.

1. Nevoeiro. 2. Baía de Guanabara. 3. Validação da previsão.

I. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. II. Validação da previsão de visibilidade calculada a partir de dados do modelo WRF para a Baía de Guanabara.

CDD: 551.51

VALIDAÇÃO DA PREVISÃO DE VISIBILIDADE CALCULADA A PARTIR DE
DADOS DO MODELO WRF PARA A BAÍA DE GUANABARA.

Lucas Alvim da Cunha

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE TÉCNICO DO CENTRO DE
INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA MARINHA
DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

1ºTen. (RM2-T) Thainá Castro da Silva.

Fabíola Valéria Barreto Teixeira, D.Sc.

CT. (T) Luis Felipe Neris Cardoso.

NITERÓI, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar meus passos e me levar a caminhos que eu não poderia imaginar.

Expresso minha maior gratidão a minha família, que seguem sendo meu suporte para qualquer ocasião, e é ao lado deles que eu luto as minhas batalhas e compartilho minhas vitórias.

As minhas orientadoras meu sincero obrigado, sou muito grato por todo ensinamento compartilhado, e por toda a paciência que tiveram ao longo dessa trajetória.

Agradeço também á todos os Mestres do CIAARA, que sempre com muito carinho e dedicação, nos preparam para a jornada vindoura.

Por fim, com muito orgulho digo que faço parte do CAHO 2025, e externo minha felicidade de dividir este ano com os amigos que participaram do curso comigo, e deixo claro que vocês foram essenciais para o cumprimento desta derrota.

RESUMO

Este trabalho validou as previsões de visibilidade horizontal geradas no modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF), utilizando o estimador *Forecast System Laboratory* (FSL) e comparando as simulações com METAR dos aeródromos Santos Dumont e Galeão no período de 01/08/2024 a 31/07/2025. As previsões e as observações foram analisadas hora a hora e avaliadas por métricas estatísticas e pela classificação de faixas proposta na NAVEMARINST N° 10-11A. Para Santos Dumont, obteve-se raiz do erro médio quadrático (RMSE) geral de 2,48 km, viés (BIAS) de 0,86 km (tendência a superestimar), índice de falso alarme (FAR) = 0,82 e probabilidade de detecção (POD) = 0,25, com 64,47% das previsões classificadas como corretas. Para o Galeão, o RMSE geral foi de 1,9 km, viés de -0,14 km, e a classificação correta alcançou 76,64% (observou-se baixo número de eventos de nevoeiro na série, o que afetou FAR e POD). Os resultados indicaram que o modelo, na configuração estudada, apresenta desempenho satisfatório para previsões de visibilidade horizontal em termos gerais, mas mostra limitações nas previsões quando os valores estão abaixo de 1 km, manifestadas por alarmes falsos e erro de intensidade. Concluiu-se que a configuração avaliada foi promissora para previsões operacionais de visibilidade, porém requer aperfeiçoamentos, por exemplo, inclusão de dados observados da temperatura de superfície do mar e ajuste de parametrizações, e análise de um conjunto maior de eventos para consolidar a validação.

Palavras-chave: nevoeiro; WRF; visibilidade horizontal; Baía de Guanabara; validação da previsão.

ABSTRACT

This study validated horizontal visibility forecasts produced by the Weather Research and Forecasting (WRF) model using the Forecast Systems Laboratory (FSL) estimator, by comparing the simulations with METAR observations from the Santos Dumont and Galeão aerodromes for the period of August 08/01/2024 to 07/31/2025. Forecasts and observations were analyzed hour-by-hour and evaluated using statistical metrics and the range classification proposed in NAVEMARINST No. 10-11A. For Santos Dumont, the annual root mean square error (RMSE) was 2.48 km, bias (BIAS) was 0.86 km (a tendency to overestimate), the false alarm ratio (FAR) = 0.82, and the probability of detection (POD) = 0.25, with 64.47% of forecasts classified as correct. For Galeão, the annual RMSE was 1.90 km, bias -0.14 km, and the correct classification reached 76.64% (a low number of fog events was observed in the series, which affected FAR and POD). The results indicated that the model, in the studied configuration, shows satisfactory performance for horizontal visibility forecasts in general terms, but presents limitations when values are below 1 km, manifested as false alarms and errors in intensity. It was concluded that the evaluated configuration is promising for operational visibility forecasting but requires improvements, such as the, inclusion of observed sea surface temperature data, tuning of parameterizations, and analysis of a larger set of events to consolidate the validation.

Keywords: fog; WRF; horizontal visibility; Guanabara Bay; forecast validation.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Índice FSL calculado para o dia 03AGO2023 às 10Z.....	12
Figura 2 - Índice FSI FSL calculado para o dia 03AGO2023 às 10Z.....	12
Figura 3 - Índice FSL calculado para o dia 04AGO2023 às 12Z.....	13
Figura 4 - Índice FSI calculado para o dia 04AGO2023 às 12Z.....	13
Figura 5 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada (dezembro de 2024).	20
Figura 6 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada (junho de 2025)...	24
Figura 7 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Santos Dumont (dezembro de 2024)	25
Figura 8 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Galeão (dezembro de 2024)	25
Figura 9 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Santos Dumont (agosto de 2024)	25
Figura 10 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Galeão (agosto de 2024)	26
Figura 11 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Santos Dumont (fevereiro de 2025).	26
Figura 12 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Galeão (fevereiro de 2025).	27

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre dados previstos e observados de visibilidade para o aeroporto Santos Dumont	19
Tabela 2 – Verificação da qualidade da previsão para o aeroporto Santos Dumont.	22
Tabela 3 - Comparação entre dados previstos e observados de visibilidade para o aeroporto Galeão.....	22
Tabela 4 - – Verificação da qualidade da previsão para o aeroporto Galeão.	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3. OBJETIVOS	14
4. METODOLOGIA	15
5. RESULTADOS	18
6. CONCLUSÃO	28
7. REFERÊNCIAS.....	30
APÊNDICE A – VISIBILIDADE HORIZONTAL SANTOS DUMONT.....	31
APÊNDICE B – VISIBILIDADE HORIZONTAL GALEÃO	35
ANEXO A – NAVEMARINST Nº 10-11 ^a ANEXO H.....	39

1. INTRODUÇÃO

A Baía de Guanabara abriga grande fluxo de meios de transporte marítimos e aéreos, os quais são responsáveis por movimentar tanto a economia quanto o turismo do estado. Entretanto, estas atividades estão sujeitas a grandes impactos, dependendo da intensidade de certos fenômenos atmosféricos, como névoa e nevoeiro. O nevoeiro pode ser definido como uma redução da visibilidade horizontal, próximo a superfície, ocasionado pela condensação do vapor de água na atmosfera (DHN, 2015). A presença desse fenômeno, comum na região no período do inverno, é motivo de grande preocupação para os meteorologistas, uma vez que causa grandes transtornos nas atividades da Baía de Guanabara. Ressalta-se que devido à dificuldade na previsão de nevoeiro, existe amplo interesse na melhoria da modelagem atmosférica com objetivo de melhor representá-lo.

A qualidade da previsão é importante para que além de questões econômicas, seja possível garantir a salvaguarda da vida humana. O Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) é uma instituição com o papel de produzir, analisar e armazenar dados, a fim de contribuir para segurança da navegação e do ambiente marinho. Sendo assim possui uma parcela de sua atenção voltada para a previsão meteorológica, e em se tratando de nevoeiro, melhorar a resolução dos modelos, tem potencial para assessorar seus navegantes e os demais usuários da melhor forma possível.

Uma vez que diversos fatores influenciam a formação de nevoeiros, é necessário um modelo meteorológico ajustado com parametrizações específicas a fim de tentar representar a física desse fenômeno e poder prevê-lo da melhor forma possível em suas simulações. Contudo, tais ajustes elevam a demanda computacional, o que impõe desafios adicionais à obtenção de resultados satisfatórios.

Assim, devido à grande complexidade de formação desse fenômeno e por conseguinte a dificuldade em realizar previsões acuradas, o presente estudo tem como objetivo analisar os resultados do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) – modelo de domínio público e distribuição gratuita utilizado pelo CHM – e compará-los com dados observados dos aeródromos presentes na Baía de Guanabara (Santos Dumont e Galeão).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o Manual do observador meteorológico (DHN, 2015), nevoeiro consiste na condensação de vapor de água próximo a superfície, resultando em redução da visibilidade horizontal para até 1000 metros, e é considerado névoa quando a visibilidade se encontra entre 1000 metros e 5000 metros.

O nevoeiro pode ser em 5 tipos de acordo com o processo de formação: orográfico, radiação, advecção, frontal e evaporação. O nevoeiro orográfico ocorre quando há saturação causada pelo resfriamento adiabático do ar causado por uma subida forçada diante do terreno. O de radiação, é provocado devido ao resfriamento noturno do solo, saturando o ar ao longo da noite até a manhã. O nevoeiro de advecção se refere à saturação decorrente da passagem de um ar quente sobre uma superfície fria. O frontal é observado devido ao aumento de umidade, causado pela aproximação de frentes. E o nevoeiro de evaporação acontece quando um ar frio e seco se deslocar sobre uma superfície líquida quente (STULL, 2017).

O Weather Research and Forecasting Model (WRF) é um dos modelos mais utilizados no mundo, principalmente devido a sua gratuidade (POWERS et al., 2017). Ele representa fenômenos atmosféricos a partir de equações matemáticas de leis de conservação da física, operando juntamente a sistemas de assimilação de dados, contribuindo assim, tanto para previsão operacional, quanto para pesquisa e compreensão de fenômenos atmosféricos (SKAMAROCK et al., 2007). Cabe ressaltar que quanto maior a resolução do modelo, maior será a demanda computacional por tempo de processamento.

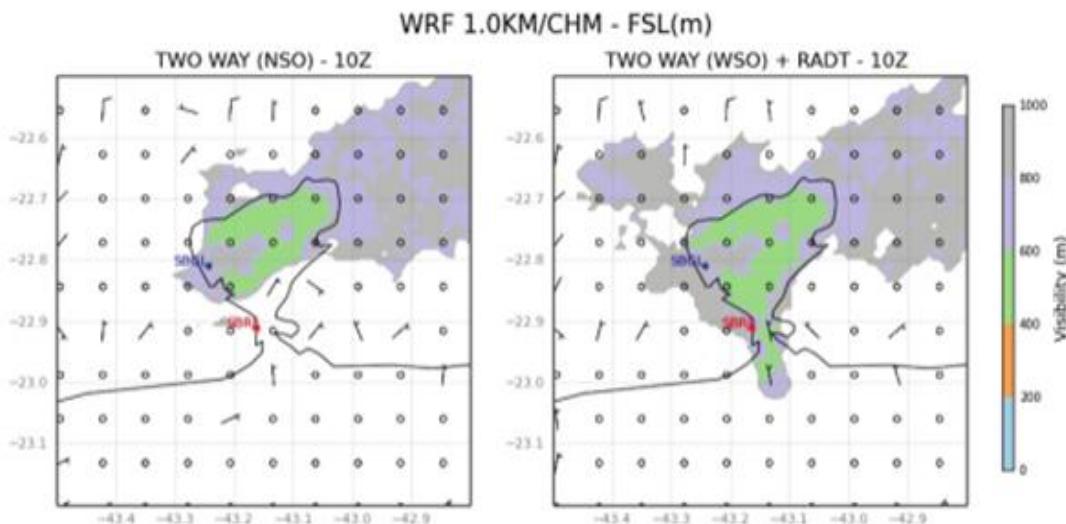
Devido ao impacto da formação de nevoeiro na segurança da navegação e, por conseguinte, na economia, Cardoso *et al.* (2023) realizou um estudo na Lagoa dos Patos (RS), com o objetivo de analisar a qualidade da simulação de nevoeiros utilizando o modelo WRF em alta resolução, verificando a atuação do modelo com diferentes configurações, e utilizando estimadores no cálculo da visibilidade horizontal. Em seus estudos, observaram que ao incrementar a quantidade de níveis verticais, bem como diminuir a altura do primeiro nível, houve melhoria da qualidade de simulação do modelo. Além disso, também fizeram comparações entre 3 estimadores de visibilidade: o de Kunkel (1984), que usa como base o teor de água líquida por metro cúbico; o estimador *Forecast System Laboratory* (FSL), cujos parâmetros são a temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e a umidade relativa do ar; e o estimador *Fog Stability Index* (FSI), onde se utiliza a

temperatura do ar, do ponto de orvalho e a velocidade do vento. Em seu estudo, concluiram que o modelo WRF forneceu melhores resultados em conjunto com o estimador FSL, provando ser capaz de realizar boas previsões nos eventos de nevoeiro.

Outra investigação, que buscou aprimorar a previsão de tal evento, que Vanzan; Pinheiro e Gadelha (2025) fizeram, foi utilizar uma nova configuração do modelo WRF, a fim de aumentar a capacidade de simulação de nevoeiro para a região da Baía de Guanabara. Para realização do estudo, compararam as simulações realizadas pelo modelo em dois dias diferentes, com e sem a ocorrência de nevoeiro, de acordo com dados observados de *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) dos aeroportos Santos Dumont e Galeão. Ao longo da pesquisa, compararam os resultados com diferentes resoluções de grade (9 km, 3 km e 1 km), com tempos de passo de tempo de 9, 3 e 1 minuto respectivamente, e perceberam que o aninhamento de 1 km apresentava melhor resposta. Também foi avaliada a diferença entre os estimadores de visibilidade FSL e FSI.

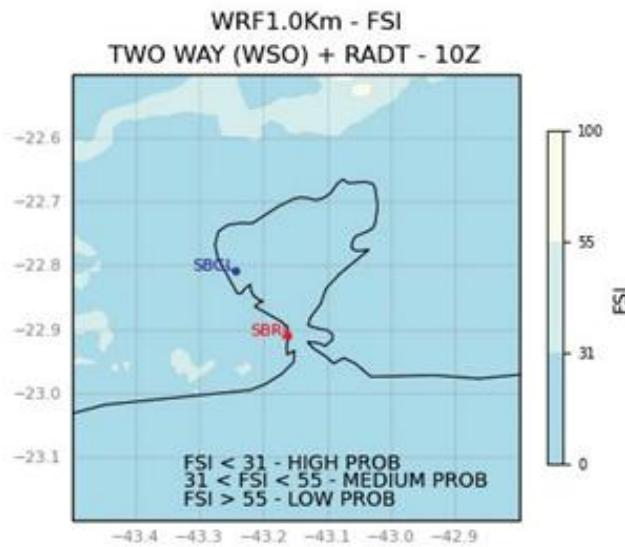
A figura 1 mostra o resultado da previsão utilizando o estimador FSL para o dia 03AGO23, e a figura 2 um resultado similar, mas utilizando o estimador FSI. Nesta data, ambos foram capazes de prever a ocorrência de nevoeiro.

Figura 1 - Índice FSL calculado para o dia 03AGO2023 às 10Z.



Fonte: VANZAN; PINHEIRO; GADELHA (2025).

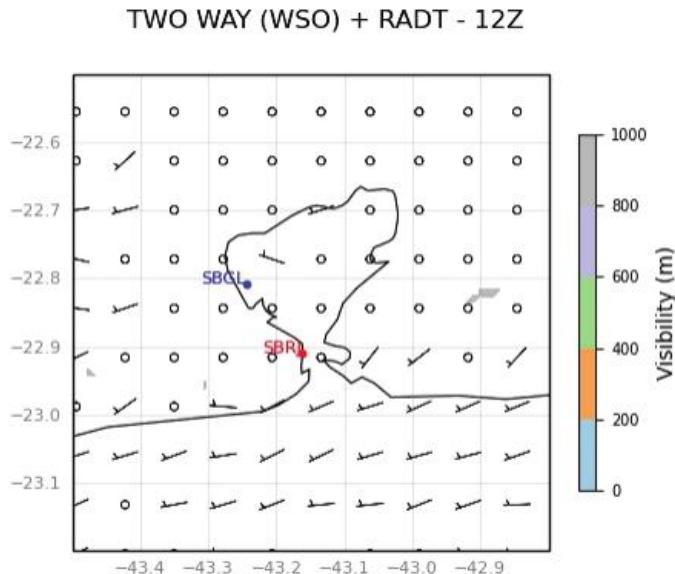
Figura 2 - Índice FSI FSL calculado para o dia 03AGO2023 às 10Z.



Fonte: Vanzan; Pinheiro; Gadelha. (2025).

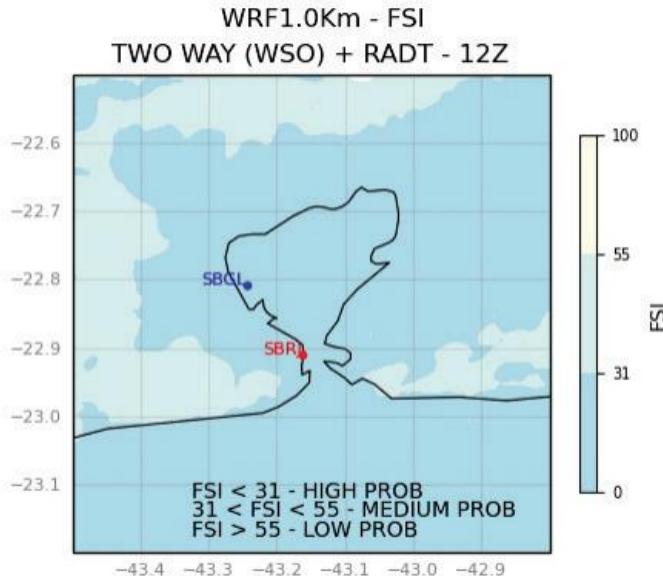
Porém, ao comparar as figuras 3 e 4, percebeu-se que no dia 04AGO23 o resultado FSI apresentou falso alarme. Demonstrando um melhor desempenho ao utilizar o FSL.

Figura 3 - Índice FSL calculado para o dia 04AGO2023 às 12Z.



Fonte: Vanzan; Pinheiro; Gadelha (2025).

Figura 4 - Índice FSI calculado para o dia 04AGO2023 às 12Z.



Fonte: VANZAN; PINHEIRO; GADELHA (2025).

Por fim, os resultados encontrados por Vanzan; Pinheiro e Gadelha (2025) indicaram uma ferramenta promissora e acurada para previsão de nevoeiro na Baía de Guanabara, necessitando ampliar esse experimento para uma quantidade maior de eventos a fim de validá-lo.

3. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é verificar a acurácia das simulações do modelo WRF com o aninhamento das três grades e parametrizações ajustadas, utilizando, por fim, o método FSL para cálculo de visibilidade na Baía de Guanabara. A fim de atingir o desejado, foram cumpridos os seguintes tópicos:

- Identificar possíveis padrões e limitações do modelo para previsão de nevoeiro.
- Calcular métricas estatísticas para avaliar a previsão de visibilidade; e
- Comparar os valores de visibilidade calculada com o estimador FSL, com as observações fornecidas pelo METAR do Santos Dumont e do Galeão;

4. METODOLOGIA

A área de estudo escolhida foi a Baía de Guanabara, que é constantemente monitorada devido a diversidade de atividades realizadas naquela região. Para esta pesquisa, utilizaremos os dados do METAR dos aeroportos Santos Dumont e Galeão, que se caracterizam como relatórios meteorológicos, fornecendo informações reais como vento, visibilidade, teto das nuvens, temperatura e precipitação entre outros.

Conforme encontrado no estudo de Vanzan; Pinheiro e Gadelha (2025), o índice FSL, equação (1), demonstrou bom desempenho, por isso foi utilizado, na estimativa de visibilidade horizontal, em milhas.

$$FSL = 6000 \left(\frac{T - T_d}{RH^{1,75}} \right) \quad (1)$$

Na equação 1, T representa a temperatura ambiente, T_d a temperatura do ponto de orvalho e RH é a umidade relativa do ar.

O modelo WRF foi integrado aplicando as grades aninhadas com 9 km, 3 km e 1 km, mas o estimador FSL foi calculado somente com dados de grade com 1 km, cujo domínio é a região da Baía de Guanabara. O período avaliado foi de, aproximadamente, 1 ano, desde 1º de agosto de 2024 até 31 de julho de 2025. Para calcular tal índice, se faz necessário a temperatura a 2m, a temperatura do ponto de orvalho e a umidade relativa do ar. Os cálculos do índice de visibilidade são executados de hora em hora, bem como as simulações do WRF, dessa forma, tem-se ao longo de cada dia 24 valores previstos. Ressalta-se que todos os valores previstos e observados acima do limite estabelecido de 10 km, foram reduzidos para esse limiar uma vez que distâncias maiores não alteram a classificação de boa visibilidade.

As métricas estatísticas utilizadas para validação foram: raiz do erro médio quadrático (RMSE), viés (BIAS), índice de falso alarme (FAR) e probabilidade de detecção (POD). Com esses valores,

espera-se cumprir o objetivo proposto de avaliar a previsão de visibilidade. Para o cálculo do RMSE e viés, utilizou-se todos os dados de visibilidade, isto é, cada valor previsto com seu respectivo valor observado. Todavia, para obtenção dos índices FAR e POD, levou-se em consideração apenas os casos de visibilidade menor que 1 km.

O RMSE, equação (2), é uma medida de precisão para previsões contínuas não probabilísticas. É calculada através da raiz da diferença quadrada entre os pares dos valores obtidos pela previsão e os valores observados, dividido pela quantidade total de pares. Por possuir as mesmas dimensões das variáveis comparadas, pode ser considerado uma magnitude típica para erros de previsão (WILKS, 2006).

(2)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2}$$

Onde O_k é o valor observado, Y_k é o valor previsto pelo modelo e n o número de pares.

O viés é expresso pelo erro médio, equação (3), e calculado através da diferença entre a média dos valores da previsão com a média dos valores observados. Quando o resultado é maior que zero, indica que as previsões tendem a superestimar a visibilidade observada, e quando menor que zero, indica a tendência de subestimar (WILKS, 2006).

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k) = \bar{y} - \bar{o} \quad (3)$$

O_k é o valor observado, Y_k é o valor previsto pelo modelo e n o número de amostras.

O índice de falso alarme, equação (4), mostra a taxa de alarme falso que o estimador acusou. Seu resultado varia de 0 a 1, e quanto menor for seu valor, melhor a previsão. É determinado pela

divisão entre o número de falsos positivos divididos pelo número total de eventos previstos (WILKS, 2006).

$$\text{FAR} = \frac{b}{a+b}. \quad (4)$$

A variável b indica a quantidade de vezes que o evento foi previsto, mas não ocorreu, e a variável a indica a quantidade de vezes em que o evento foi previsto e realmente ocorreu.

E o índice de probabilidade de detecção, equação (5), se refere a taxa de acerto do previsor. Os valores podem variar entre 0 e 1, o qual quanto maior for o resultado, melhor previsão. Calcula-se através da divisão do valor de acertos positivos pelo total de eventos positivos (WILKS, 2006).

$$H = \frac{a}{a+c}. \quad (5)$$

A variável a se refere ao número de eventos que ocorreram e foram previstos, e c indica a quantidade de eventos que ocorreram, mas não foram previstos.

Outro método utilizado para análise do modelo, foi a avaliação proposta pela NAVEMARINST Nº 10-11A-An-H, conforme anexo A, que é usada para verificação da qualidade das previsões, por meio da comparação entre os valores previstos e observados, cumprindo assim o último objetivo proposto. Para visibilidade, as faixas de previsão são divididas em quatro: muito restrita, restrita, moderada, e boa, onde os valores de visibilidade são respectivamente: menor que 1 km, entre 1 km e 4 km, entre 4 km e 10 km e maior que 10 km. Deste modo, as previsões que estiverem na mesma faixa do dado observado, são classificadas como corretas, as que estiverem em uma faixa acima ou abaixo, classificam-se como aceitáveis, e as que estiverem duas ou mais faixas acima ou abaixo, são incorretas. Para o trabalho em questão, a faixa moderada foi adaptada para a faixa de 4 km até valores menores que 10 km, e a faixa boa apenas para 10 km.

Para o cálculo das métricas citadas acima, foi construído uma planilha contendo todas as fórmulas das métricas, onde eram inseridos todos os valores previstos e observados. A partir disso as análises foram feitas para os dois aeródromos, tanto para o ano inteiro, quanto para cada mês separadamente, a fim de verificar diferença no desempenho do modelo entre cada período e localidade, e assim identificar possíveis padrões e limitações do modelo.

5. RESULTADOS

De antemão ressalta-se que as análises foram realizadas com cuidado, em virtude de evitar comparações tendenciosas e levando em conta as condições climáticas mais comuns de cada mês. A Tabela 1 se refere ao Santos Dumont, na qual se observam os valores das métricas estabelecidas para análise comparativa quantitativa entre a previsão e a observação. Cabe ressaltar que o RMSE e o viés foram calculados considerando o valor da visibilidade horizontal em todos os casos, sem especificar por névoa ou nevoeiro, ou seja, simplesmente analisando a variação do modelo em relação à observação, diferente dos índices FAR e POD, que consideraram apenas os eventos de nevoeiro. Ambas as métricas foram calculadas tanto para o geral, ou seja, para todos os eventos de nevoeiro do ano, quanto para cada mês de estudo. Os meses que possuem “-“ no índice POD indica a não existência de nevoeiro no referido mês, e o “-“ no índice FAR indica que as previsões não indicaram presença de nevoeiro.

Tabela 1 - Comparação entre dados previstos e observados de visibilidade para o aeroporto Santos Dummont.

MÊS	RMSE(KM)	VIÉS(KM)	FAR	POD
AGO24	1,1340	-0,1403	-	-
SET24	1,5958	0,1987	-	-
OUT24	2,2922	0,7868	-	0
NOV24	2,6843	1,3004	1	-
DEZ24	3,498	2,0559	0,7777	0,4
JAN25	3,2929	1,8963	-	0
FEV25	1,9768	0,8226	-	-
MAR25	2,0926	0,9364	-	0
ABR25	2,4470	0,3400	-	-
MAI25	1,8737	0,2035	-	-
JUN25	2,4087	0,8342	0,75	0,5
JUL25	2,9629	0,8194	1	-
ANUAL	2,4844	0,8646	0,8235	0,2500

Fonte: Elaborado pelo autor.

O RMSE geral foi 2,48 km, e os meses indicaram resultados próximos, destacando agosto de 2024 que apresentou o menor valor, e dezembro de 2024 o maior. O viés geral obtido foi de 0,86 km, expõe a tendência do modelo de superestimar os valores de visibilidade. A maioria dos meses analisados mantiveram essa tendência, com exceção de agosto de 2024, que com viés de -0,14 km, subestimando minimamente a visibilidade.

É necessário ressaltar que de maneira geral o modelo se comporta muito bem para a previsão da visibilidade horizontal, tendo o seu maior valor de erro de 3,49 km e maior valor de viés de 2,05 km, valores que são aceitáveis para uma variável tão sensível na área meteorológica.

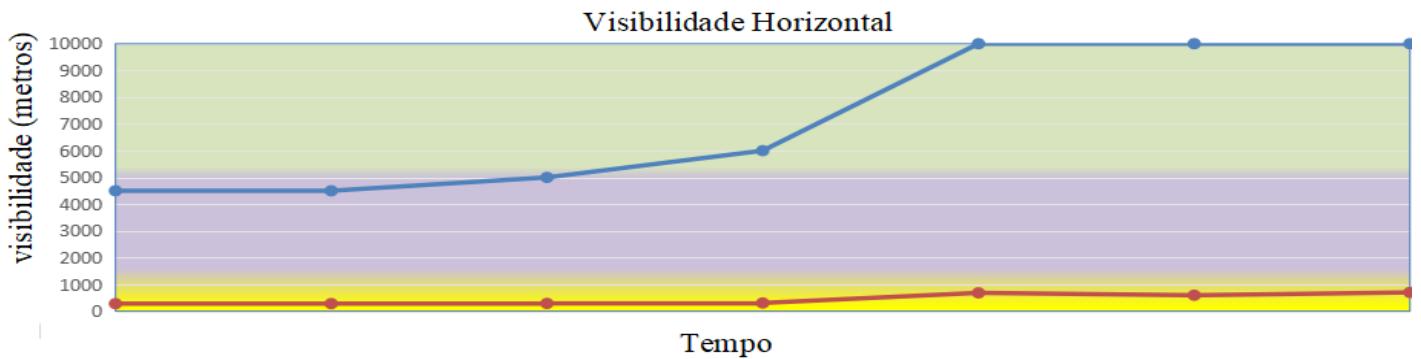
O índice FAR geral igual a 0,82 traduz que existe grande tendência do modelo de indicar falsos alarmes. E o índice POD geral igual a 0,25, sinaliza a carência do modelo em prever os eventos de nevoeiros. Contudo, novamente, é necessário cautela ao analisar essas métricas de forma geral, uma vez que se observam diferentes estações ao longo do ano e essas influenciam diretamente na formação de nevoeiro/névoa. Por exemplo, como agosto é um mês de inverno,

apresenta baixas temperaturas deixando a atmosfera mais estável, é esperada maior quantidade de ocorrência de nevoeiro. Enquanto dezembro que é um mês de verão, com temperaturas mais altas, umidade elevada e maior instabilidade atmosférica, espera-se que a ocorrência de nevoeiro seja menor quando comparada com o inverno. Todavia, neste trabalho, no período de estudo avaliado observou-se o contrário do que era esperado e previsto pela literatura.

Foram observados nevoeiros em cinco meses: outubro e dezembro de 2024 e janeiro, março e junho de 2025. Desses meses, o modelo conseguiu prever alguns nevoeiros que ocorreram em dezembro e junho, resultando em um POD de 0,4 e 0,5, respectivamente.

Com relação ao FAR, quatro meses apresentaram alarmes falsos, ou seja, o modelo previu a ocorrência de nevoeiro indevidamente, uma vez que não foi observado o fenômeno. Analisando os resultados em nível mais específico e observando o mês com maior quantidade de nevoeiros (dezembro de 2024), notou-se que dos sete alarmes falsos detectados, três deles a observação indicou névoa úmida, ou seja, o WRF previu o fenômeno, mas não na intensidade adequada, os demais, foram indicados como boa visibilidade pelo METAR. Na figura 5 é possível visualizar esse comportamento, onde o eixo x varia no tempo e o eixo y indica a visibilidade horizontal em metros, e cada ponto se refere a um evento de nevoeiro previsto (em vermelho) e seu respectivo valor observado pelo METAR (em azul).

Figura 5 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada (dezembro de 2024).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos meses em que não ocorreram nenhum evento de nevoeiro nem alarme falso do modelo, espera-se que a assertividade seja maior, uma vez que a previsão desse fenômeno é um grande desafio para os modelos numéricos. E isso é demonstrado na Tabela 1 por meio dos meses de agosto e setembro de 2024, fevereiro e maio de 2025, que obtiveram os melhores resultados para RMSE e viés. Por outro lado, nos meses de outubro e dezembro de 2024 e janeiro, março e junho de 2025, meses em que o ocorreu nevoeiro, apresentaram os piores valores de RMSE e viés. É possível citar ainda que os meses de novembro de 2024 e julho de 2025, também registraram valores altos para as métricas possivelmente por conta de alarmes falsos gerados pelo modelo.

Em complemento às métricas calculadas anteriormente, a Tabela 2 mostra a avaliação da qualidade das previsões para a visibilidade, de acordo com a classificação da NAVEMARISNT 10-11A, que classifica as diferenças como: correta, aceitável e incorreta.

Tabela 2 – Verificação da qualidade da previsão para o aeroporto Santos Dumont.

MÊS	CORRETA(%)	ACEITÁVEL(%)	INCORRETA(%)
AGO24	85,7527	13,9785	0,2688
SET24	74,0530	25,3788	0,5682
OUT24	66,0714	32,3413	1,5873
NOV24	61,1742	33,9015	4,9242
DEZ24	46,2963	41,6667	12,0370
JAN25	50,8333	37,7778	11,3889
FEV25	75,4386	21,0526	3,5088
MAR25	63,2813	35,1563	1,5625
ABR25	56,0417	40,4167	3,5417
MAI25	70,4167	27,9167	1,6667
JUN25	68,6728	26,3889	4,9383
JUL25	56,7708	35,7639	7,4653
ANUAL	64,4713	30,7348	4,7939

Fonte: Elaborado pelo autor.

A porcentagem geral de previsões corretas foi de 64,47%, indicando que o modelo tem boa capacidade quanto a calcular a visibilidade horizontal, de modo que os resultados se encontrem dentro da mesma faixa de visibilidade do valor observado. Os percentuais de previsões aceitáveis e incorretas, de 30,73% e 4,79 %, respectivamente, mostram que a maioria das previsões foram condizentes com os valores observados, com um índice de previsões incorretas inferior a 5 %. Os meses que mais divergem das avaliações obtidas para o cálculo geral, é dezembro de 2024, o qual a classificação incorreta alcança valor maior, e agosto de 2024, que apresentou classificação incorreta bem pequena. Esses resultados demonstram de um modo geral, que os piores percentuais acompanham os meses com mais eventos de névoa e nevoeiro, assim como observado para os valores de RMSE e viés na Tabela 1.

A Tabela 3 se refere ao Galeão. Os valores obtidos para as métricas foram adquiridos conforme preconizado na Tabela 1.

Tabela 3 - Comparação entre dados previstos e observados de visibilidade para o aeroporto Galeão.

MÊS	RMSE(KM)	VIÉS(KM)	FAR	POD
AGO24	1,6036	-0,5916	-	-
SET24	1,7107	-0,4411	-	-
OUT24	1,9340	-0,5830	-	-
NOV24	1,9646	0,1850	-	-
DEZ24	2,5173	0,2599	-	-
JAN25	2,0806	0,2897	-	-
FEV25	0,4415	0,0187	-	-
MAR25	1,2903	-0,2942	-	-
ABR25	2,3733	-0,3290	-	0
MAI25	1,8533	-0,1206	1	-
JUN25	1,4721	-0,0318	1	-
JUL25	2,3766	-0,2675	1	0
ANUAL	1,9067	-0,1474	1	0

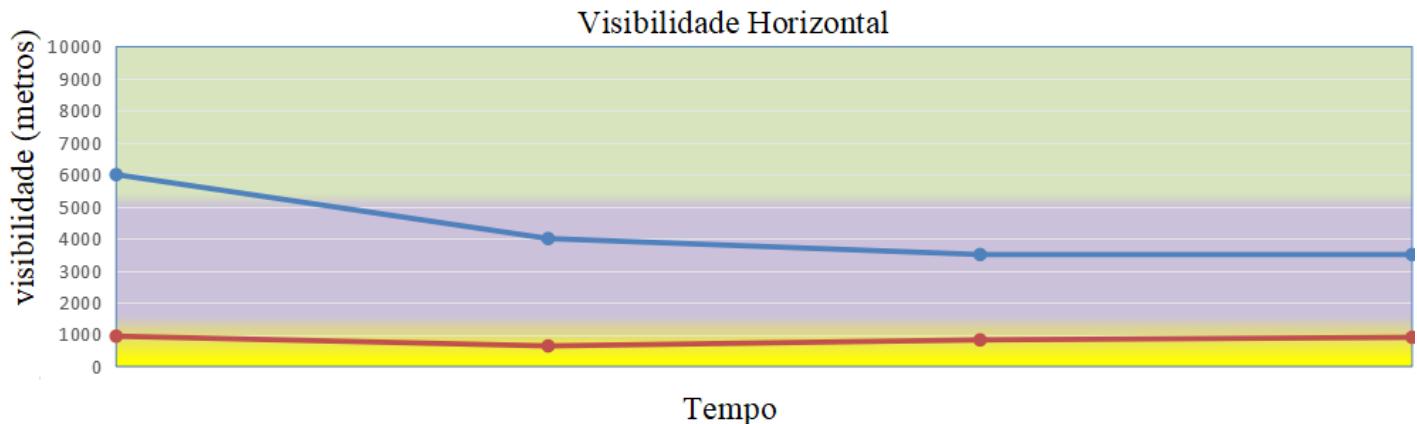
Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor obtido de 1,9 km para RMSE, é similar ao obtido para a área do Santos Dumont (2,4 km). O mês de dezembro de 2024 permanece apresentando maior valor, contudo, o que apresentou menor valor foi o mês de fevereiro. O viés encontrado foi de -0,14 km, mostrando que para a referida região, o modelo apresentou tendência de subestimar a visibilidade observada, porém, com um valor bem pequeno. Uma diferença que se destaca, é que houve 9 meses com viés negativo. Sendo assim, para a área do Galeão, onde o maior erro foi 2,5 km e maior valor de viés -0,59 km, o modelo alcança resultados mais promissores que Santos Dumont para previsão de visibilidade horizontal.

O índice FAR foi 1 e o POD foi 0, entretanto, no período estudado foram observados apenas 2 eventos de nevoeiro na região do Galeão, sendo um em abril de 2025 e outro em julho de 2025, os quais o WRF não conseguiu detectar. Mais uma vez, aprofundando a avaliação e selecionando o mês de junho de 2025, que apresentou maior número de falso alarme, verifica-se que em 3 dos 4 eventos previstos, o valor observado indicava névoa úmida, exemplificando mais uma vez que o

modelo conseguiu prever a restrição de visibilidade, porém em intensidade incorreta. Pode-se visualizar na figura 6 tais acontecimentos, assim como exposto na figura 5.

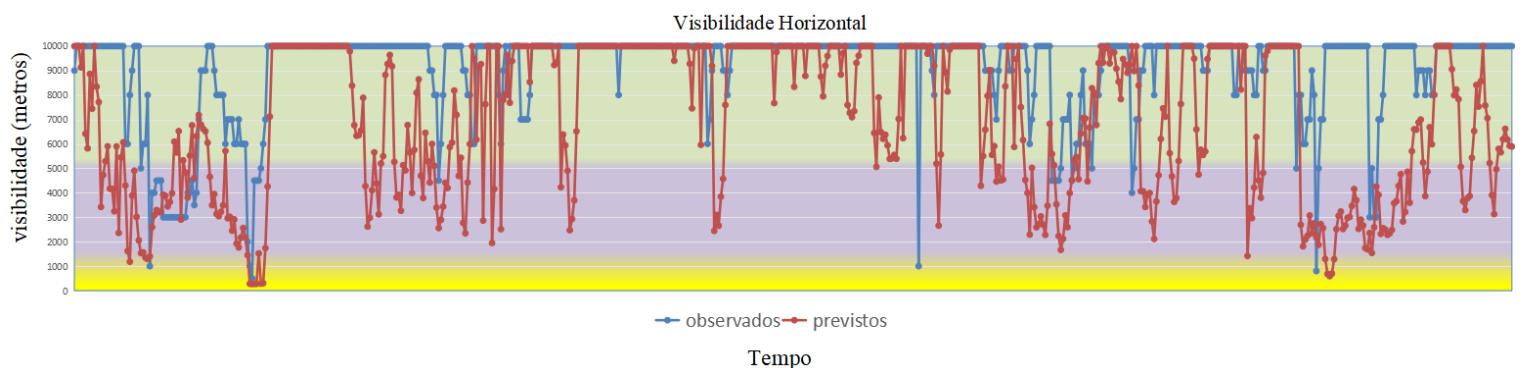
Figura 6 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada (junho de 2025).



Fonte: Elaborado pelo autor.

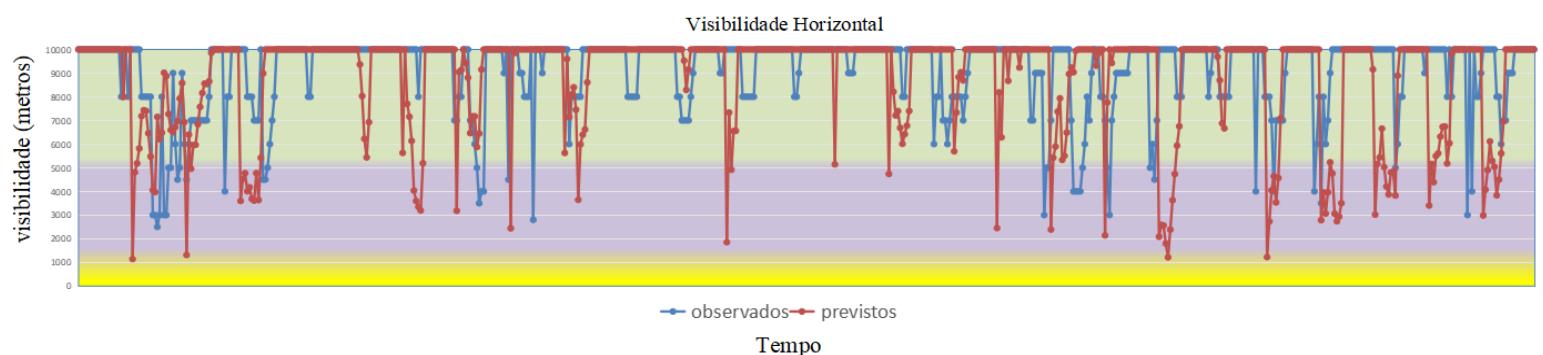
Apesar do menor número de nevoeiros, a visibilidade horizontal ao longo dos meses observada para o Galeão é bem próxima da observada no Santos Dumont, e com isso, sugere-se ao analisar as tabelas 1 e 2, que os meses com maior instabilidade atmosférica apresentaram maiores valores de RMSE e viés, enquanto os meses mais estáveis valores menores. Esse fato pode ser ilustrado ao comparar, por exemplo, o pior e o melhor mês de cada região, para isso, escolheu-se os meses de dezembro de 2024 (pior mês para ambos), agosto de 2024 (melhor mês para o Santos Dumont) e fevereiro de 2025 (melhor mês para o Galeão), dispostos nas figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Esses gráficos variam em tempo no eixo x e indicam a visibilidade prevista (em vermelho) e observada (em azul) no eixo y, onde cada ponto se refere a uma das 24 previsões horárias do dia ao longo do referido mês, com seu respectivo valor de visibilidade observada. As áreas em amarelo, lilás e verde, apresentam visibilidades abaixo de 1 km, entre 1 km e 5 km, e de 5 km e 10 km respectivamente.

Figura 7 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Santos Dumont (dezembro de 2024)



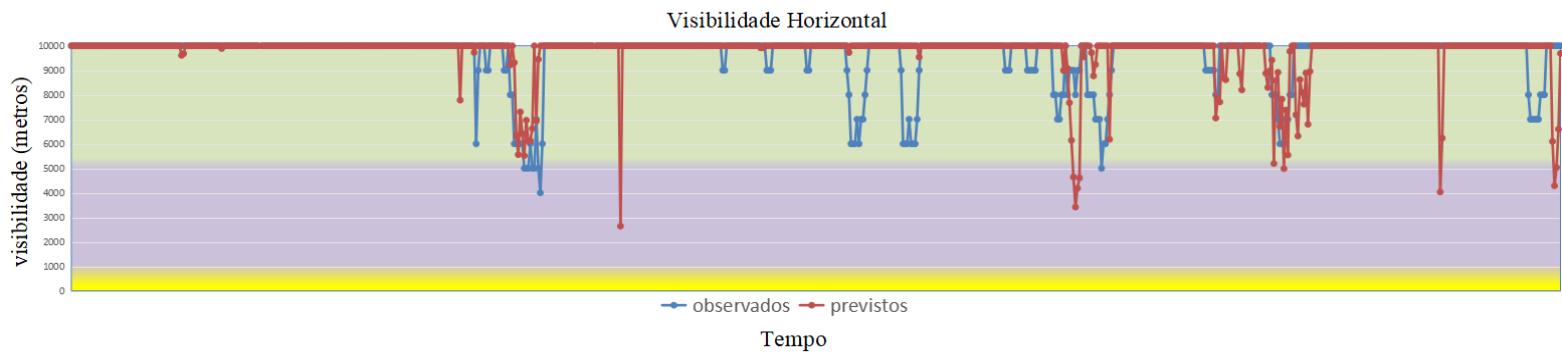
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Galeão (dezembro de 2024)



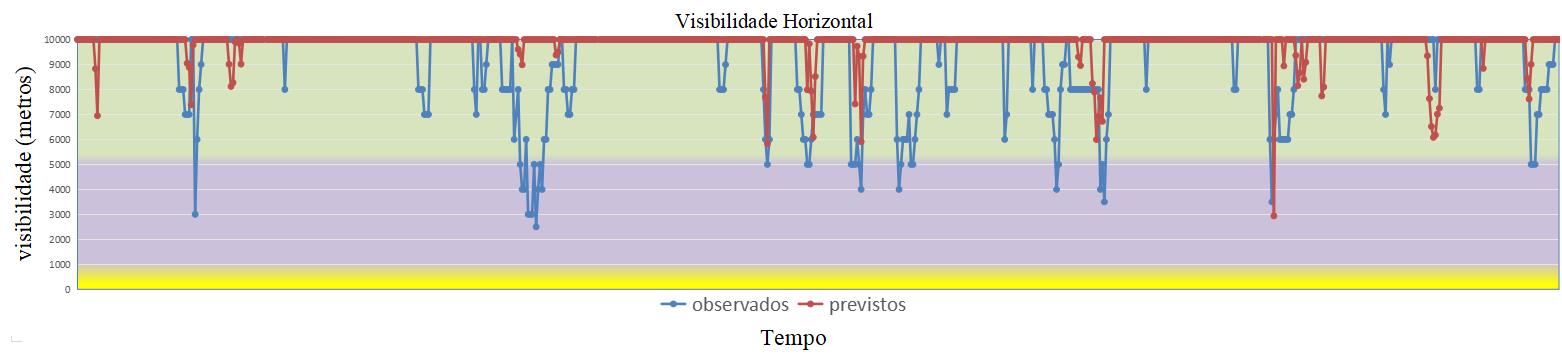
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Santos Dumont (agosto de 2024)



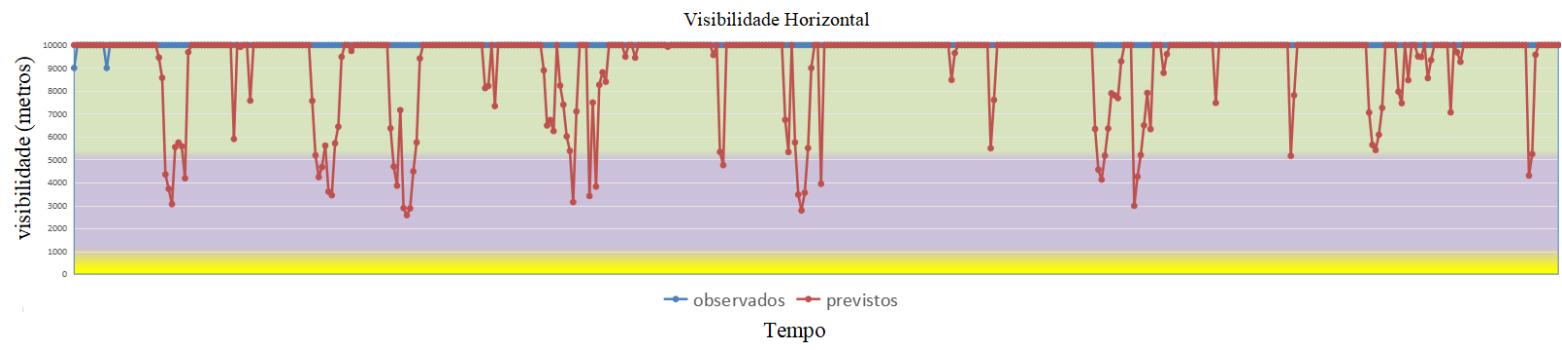
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Galeão (agosto de 2024)



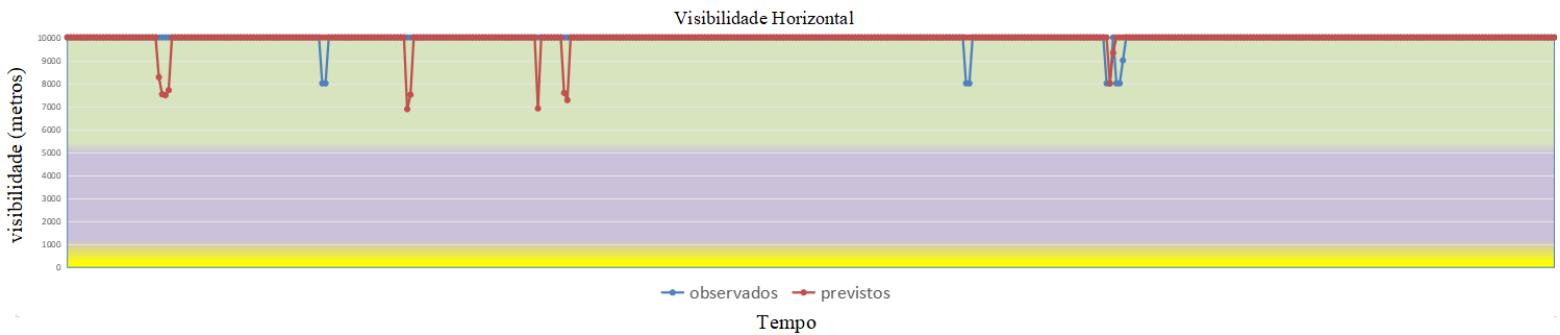
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Santos Dumont (fevereiro de 2025).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Comparação da visibilidade horizontal prevista e observada para Galeão (fevereiro de 2025).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado os gráficos acima, percebe-se que quando os meses apresentam menos variação da visibilidade horizontal, ou seja, quando a linha de visibilidade observada (em azul) tem comportamento linear e se mantém em sua maior parte na faixa de visibilidade boa ou moderada, os valores de RMSE e viés são melhores, bem como os com mais variação acarretam valores piores.

Também foi realizada verificação qualidade das previsões de visibilidade através da tabela 4.

Tabela 4 – Verificação da qualidade da previsão para o aeroporto Galeão.

MÊS	CORRETA(%)	ACEITÁVEL(%)	INCORRETA(%)
AGO24	76,8817	21,5054	1,6129
SET24	74,4318	24,2424	1,3258
OUT24	75,9921	20,0397	3,9683
NOV24	78,4091	18,1818	3,4091
DEZ24	63,5802	31,3272	5,0926
JAN25	74,1667	22,0833	3,7500
FEV25	96,0526	3,9474	0,0000
MAR25	79,4271	19,0104	1,5625
ABR25	62,2917	33,5417	3,9583
MAI25	70,8333	26,8750	2,2917
JUN25	76,2346	22,3765	1,3889
JUL25	61,1111	34,0278	4,8611
ANUAL	73,7157	23,4319	2,8375

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor de 73,71% para classificação correta, mostra-se ainda mais promissor que o observado no Aeroporto Santos Dumont (64,47%). A maior porcentagem foi de 96,05% para fevereiro de 2025, e o menor foi de 61,11% para julho de 2025. Nesta tabela percebe-se também que os melhores percentuais acompanham os meses com métricas de menor valor observadas na tabela 1.

Além das tabelas e figuras apresentadas, os gráficos encontrados nos Apêndices A (para o Santos Dumont) e B (para o Galeão), representam a comparação visual entre dados observados e previstos de cada mês. Os dados observados são ilustrados em azul, e os previstos são ilustrados em vermelho. A área em amarelo apresenta visibilidade abaixo de 1 km, a área em lilás na faixa entre 1 km e 5 km, e a verde de 5 km e 10 km. Com o auxílio dessas figuras, observa-se a tendência das previsões de acompanhar as oscilações da visibilidade observada, bem como de manter-se na faixa, corroborando com os índices encontrados nas análises anteriores.

6. CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo principal avaliar a precisão das simulações do modelo WRF, configurado com três grades aninhadas e parametrizações ajustadas, e aplicou o método FSL para o cálculo da visibilidade na Baía de Guanabara. Além disso, buscou identificar padrões e limitações do modelo na previsão de nevoeiro, e calculou métricas estatísticas para avaliar a qualidade das previsões de visibilidade e comparou os valores de visibilidade previstos com as observações METAR dos aeroportos Santos Dumont e Galeão.

O cálculo das métricas estatísticas dos dados de visibilidade dos aeroportos SDU e GIG mostraram valores de RMSE e viés semelhantes ao longo do ano e no total de dados. Porém, o viés apresentou sinais opostos nos aeroportos, indicando tendência de estimativa diferentes. O mês com melhor RMSE também foi diferente, sendo agosto para o SDU e fevereiro para o GIG. Já o mês de pior RMSE foi dezembro para ambos. Nos índices FAR e POD, ambos os aeroportos apresentaram valores ruins.

Além das métricas, a comparação dos valores de visibilidade prevista e observada também foram comparados de acordo com os critérios da NAVEMARINST 10-11A. Neste caso,

considerando o total de dados, as avaliações corretas e aceitáveis totalizaram mais de 90%. Contudo, a análise mensal mostrou que o aeroporto SDU obteve avaliação "incorrecto" acima de 5% em 4 meses, sendo dois deles superiores a 10%. Mas o aeroporto GIG apresentou mais regularidade no percentual de "incorrecto" ao longo do ano, com apenas o mês de dezembro apresentando valor ligeiramente superior a 5%.

Analizando as métricas estatísticas e as classificações da qualidade da visibilidade prevista é possível inferir que o modelo apresentado é satisfatório para previsão da visibilidade horizontal, uma vez que o RMSE, viés e a classificação pela NAVMARINST Nº10-11A apresentaram valores que reforçaram a adequação do modelo para a previsão de visibilidade horizontal.

Um fato interessante é que o modelo obteve de uma forma geral, valores melhores para o Galeão, o que faz surgir o questionamento dos prováveis motivos que levaram a isso. O sugerido com essa primeira análise feita pelo trabalho é que a menor quantidade de nevoeiros impactou nos resultados. Cabe realizar uma pesquisa posteriormente, que busque investigar outros possíveis motivos, como localização e geografia, e que avalie a representação do modelo com relação à fração terra-água, mudanças na cobertura do solo, acidentes geográficos, entre outros.

No que se refere especificamente á previsão de nevoeiro, demonstrou certa limitação, que diante de uma análise pontual do espaço, pode não representar significativamente a previsão do modelo, sendo necessário incluir outras fontes de informação para aprimorar a validação. Ressalta-se que esse estudo consiste em uma análise preliminar, visto que o modelo necessita de mais ajustes, como o caso de incluir o dado observado da temperatura da superfície do mar na simulação do modelo, trazendo uma possível melhoria na previsão de nevoeiro.

Uma sugestão para trabalhos futuros é analisar uma área maior, para estudar a possibilidade do modelo estar prevendo a ocorrência de nevoeiros, porém posicionando estes nas adjacências dos aeroportos.

7. REFERÊNCIAS

CARDOSO, J. R. et al. Dense fog simulation in southern Brazil using the WRF model with high spatial resolution. **Atmósfera**, v. 38, p. 55–78, 1 ago. 2023

DHN – DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Manual do observador meteorológico**. 3 edição. Niterói. 2015. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1907/manual-observador-completo.pdf>. Acesso em: 19 Abr. 2024.

KUNKEL B.A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1984.

POWERS, J. G. et al. **The Weather Research and Forecasting (WRF) model: overview, system efforts, and future directions**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 98, n. 8, p. 1717-1737, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.

SKAMAROCK, W. C. et al. **A Description of the Advanced Research WRF Version 2**. 2007.

STULL, R. B. **Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science**. Vancouver: UBC, 2017.

VANZAN, Maria; PINHEIRO, Flávia; GADELHA, Alexandre. Previsão de nevoeiros utilizando um modelo atmosférico de alta resolução como um sistema operacional de apoio à decisão. **ANAIS HIDROGÁFICOS TOMO LXXX**. Niterói. P. 140-155. Jan. 2025.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2nd ed ed. Amsterdam Paris: Elsevier, 2006.

APÊNDICE A – VISIBILIDADE HORIZONTAL SANTOS DUMONT

Gráfico 1 - Agosto de 2024.

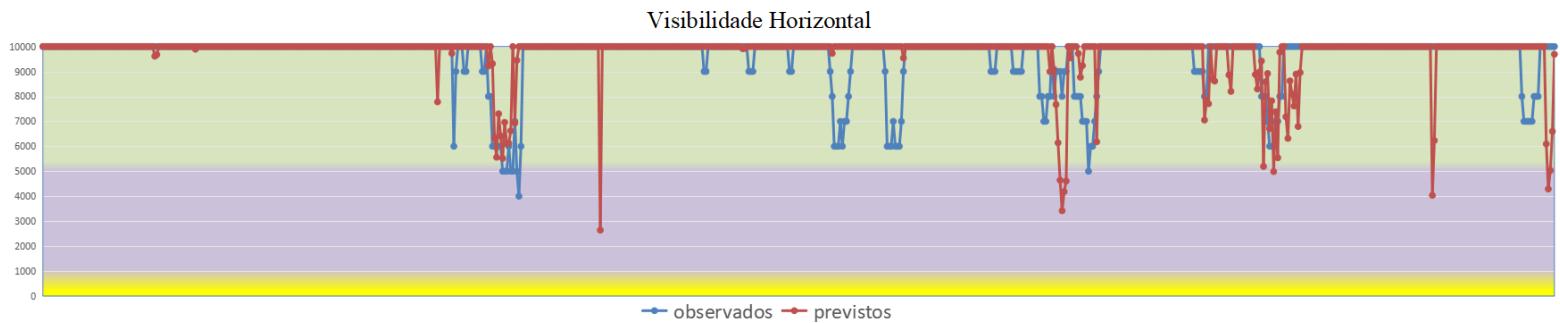


Gráfico 2 - Setembro de 2024.

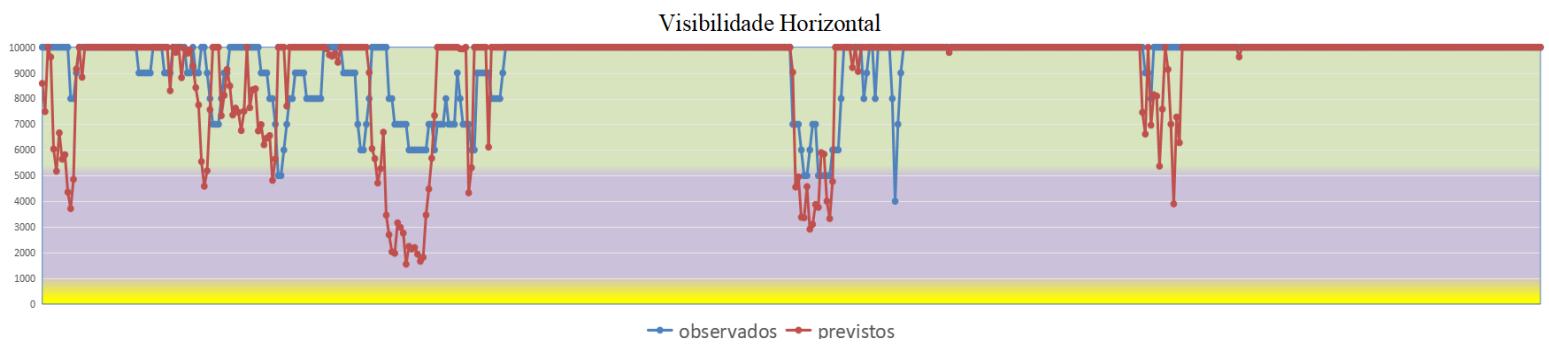


Gráfico 3 - Outubro de 2024

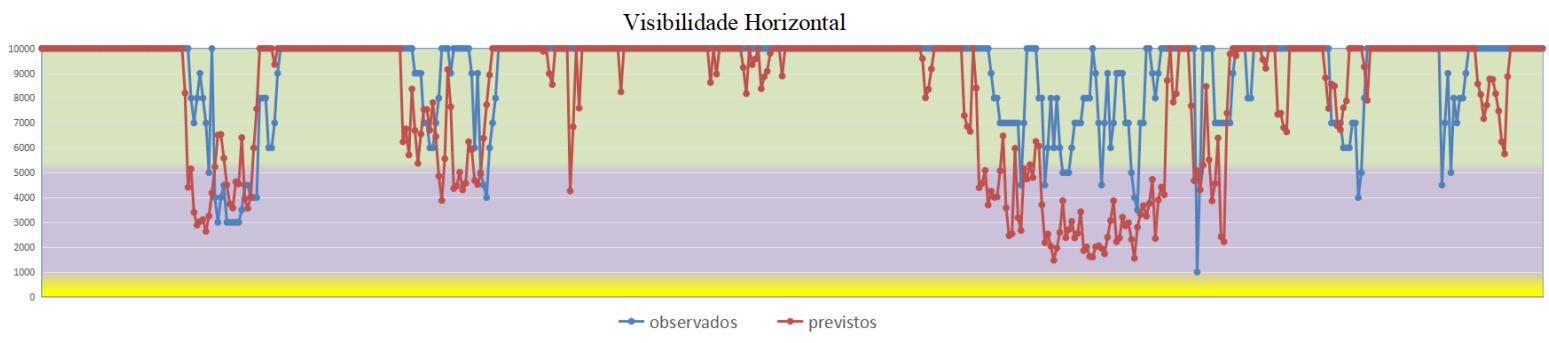


Gráfico 4 - Novembro de 2024

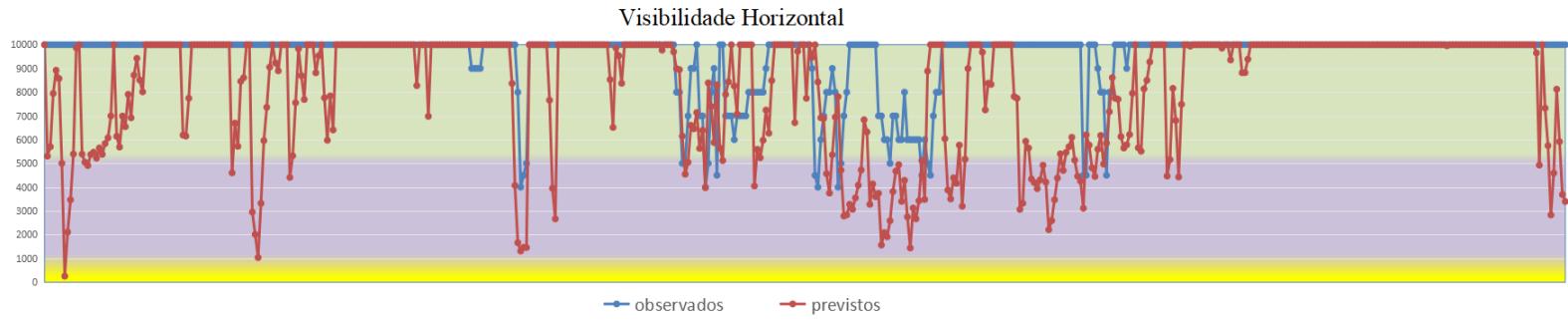


Gráfico 5 - Dezembro de 2024

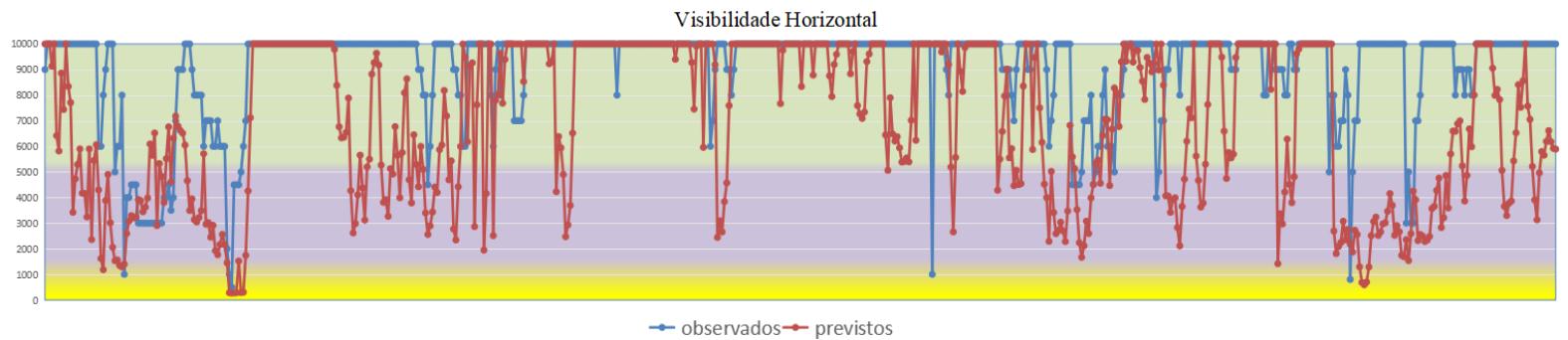


Gráfico 6 - Janeiro de 2025

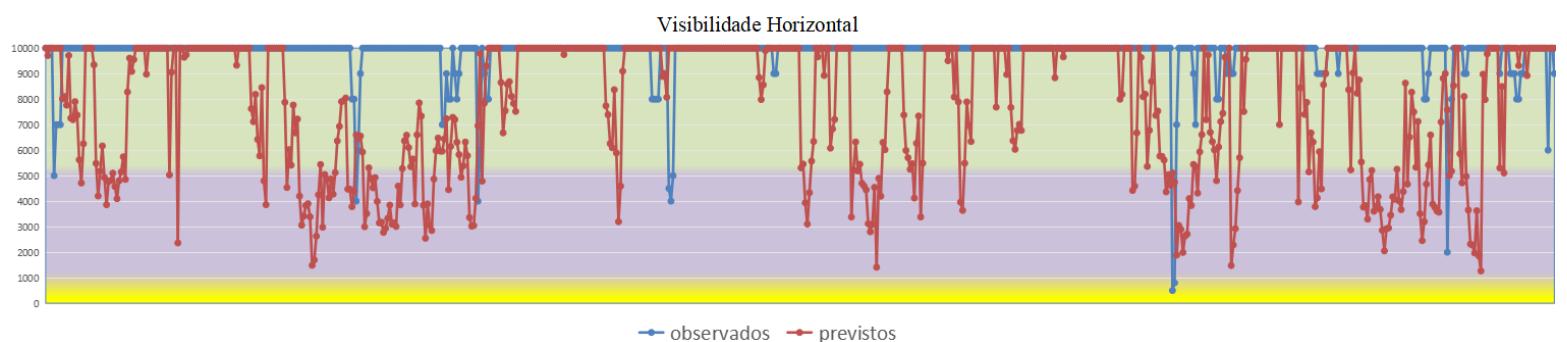


Gráfico 7 - Fevereiro de 2025

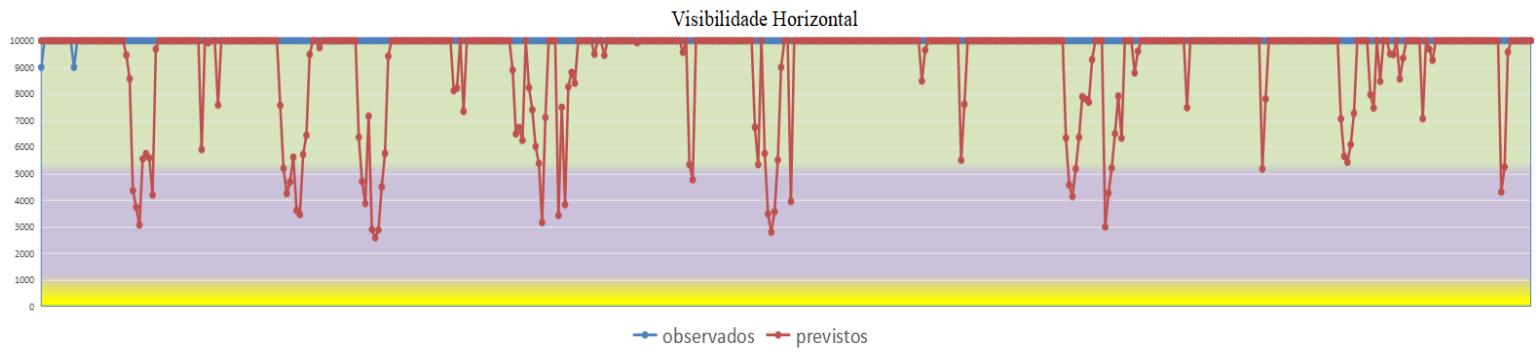


Gráfico 8 - Março de 2025

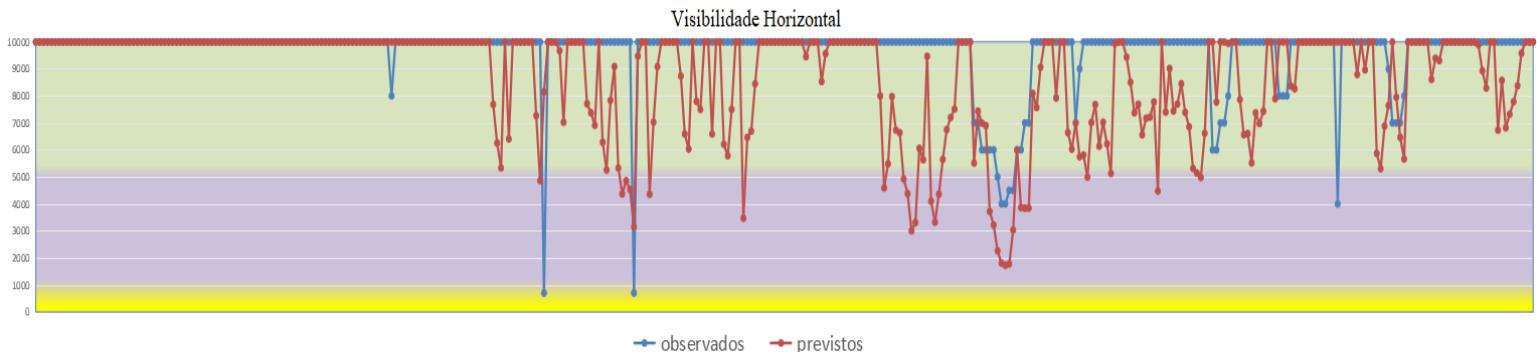


Gráfico 9 - Abril de 2025

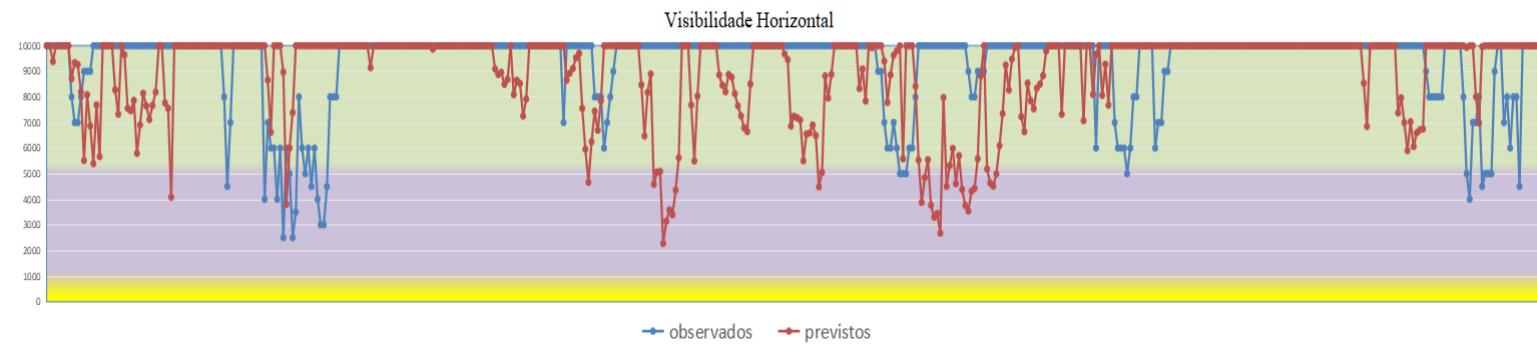


Gráfico 10 - Maio de 2025

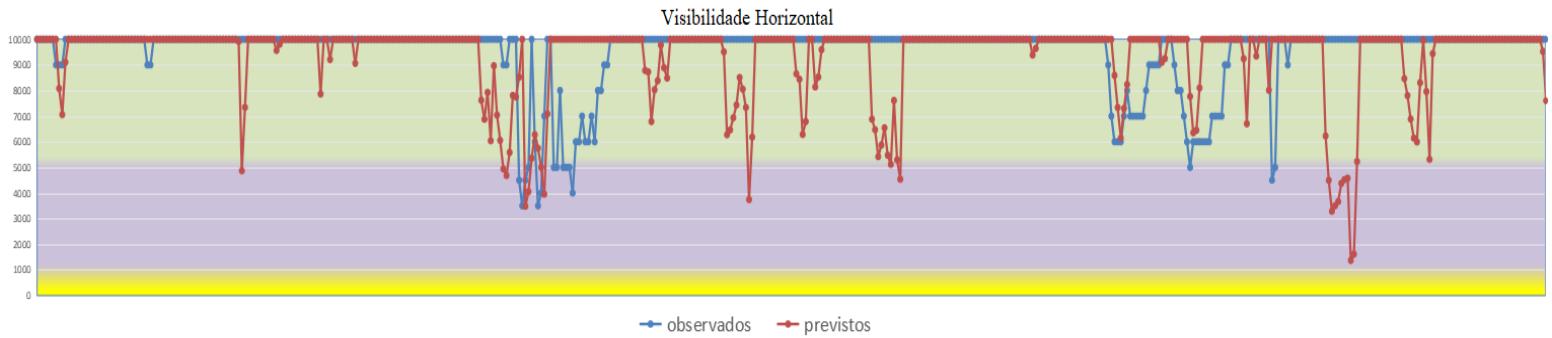


Gráfico 11 - Junho de 2025

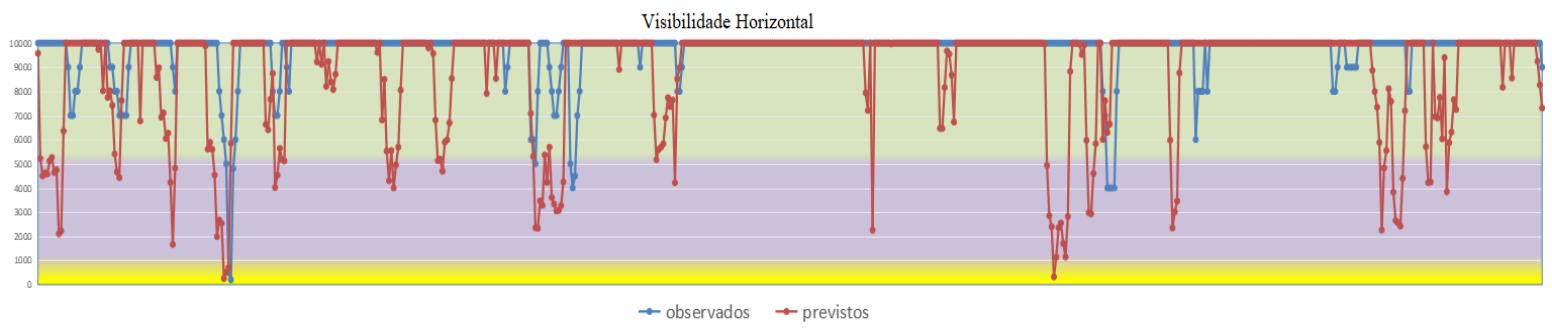
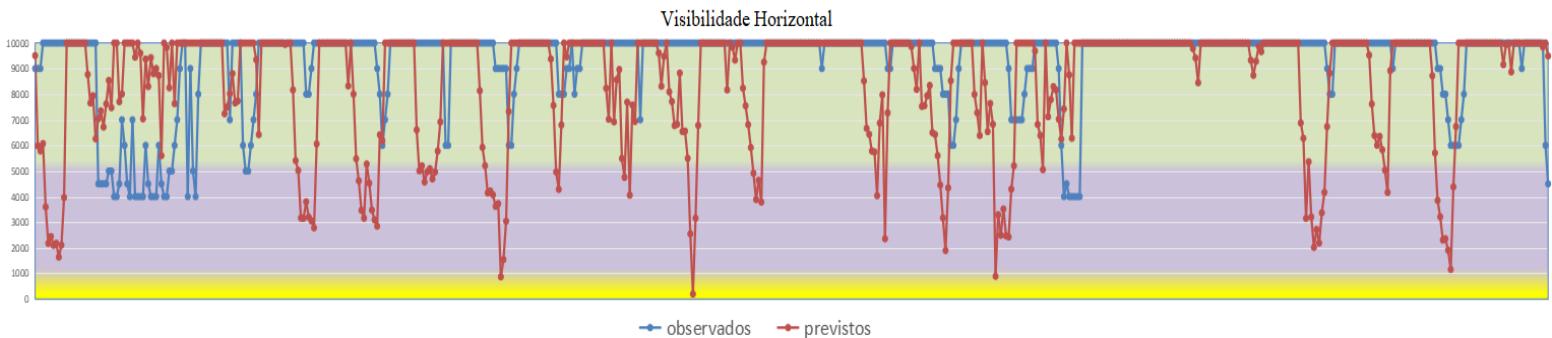


Gráfico 12 - Julho de 2025



APÊNDICE B – VISIBILIDADE HORIZONTAL GALEÃO

Gráfico 13 - Agosto de 2024

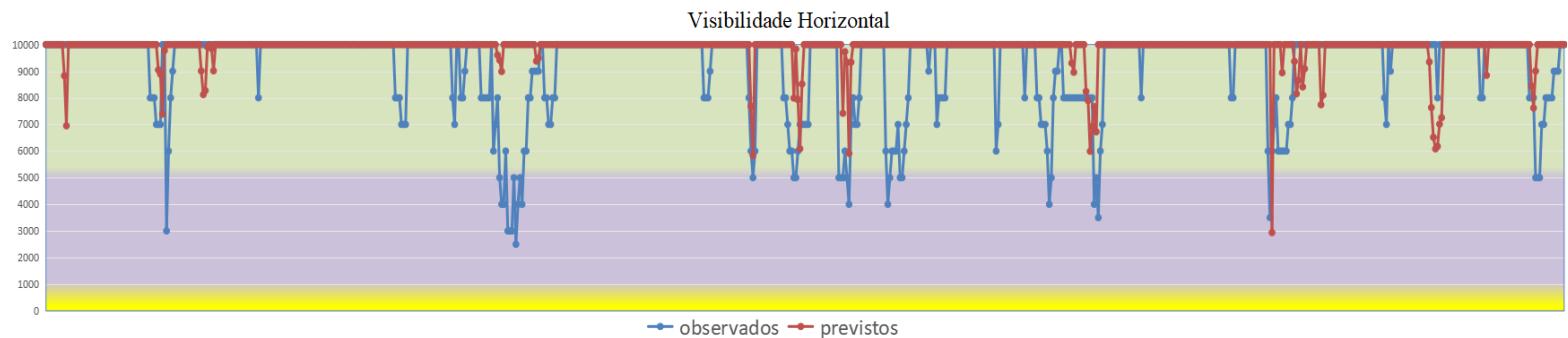


Gráfico 14 - Setembro de 2024

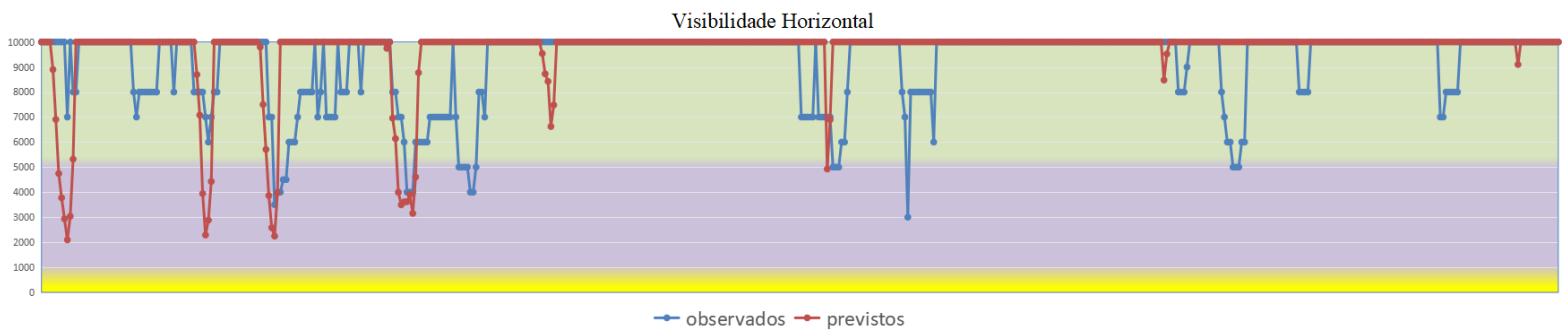


Gráfico 15 - Outubro de 2024

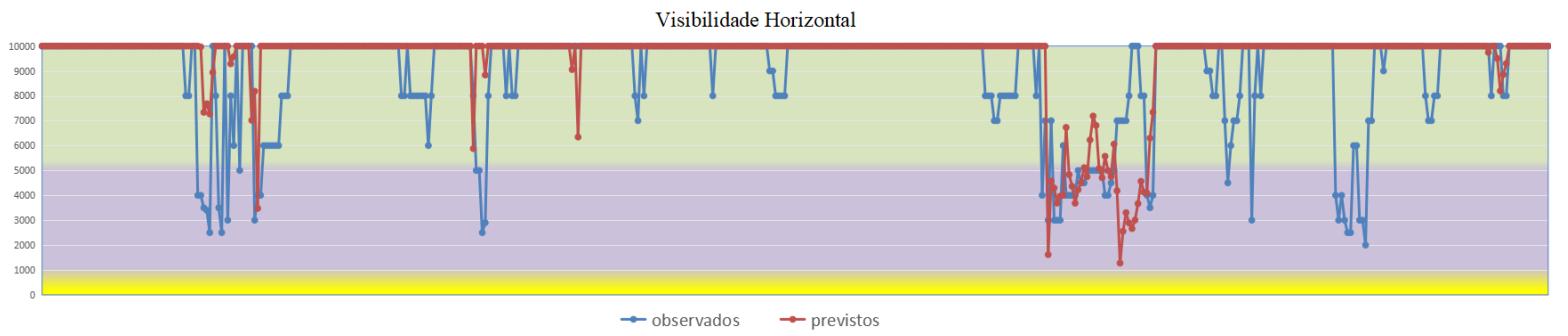


Gráfico 16 - Novembro de 2024

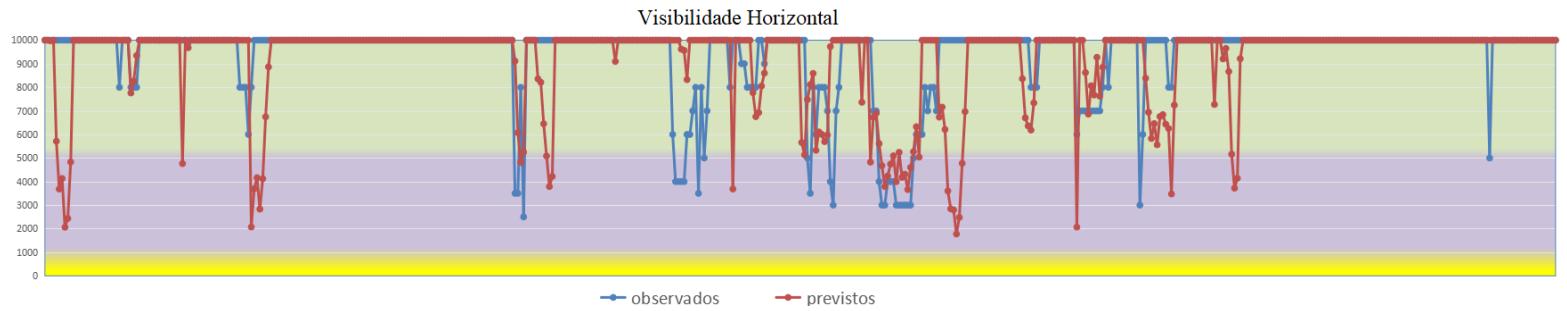


Gráfico 17 - Dezembro de 2024

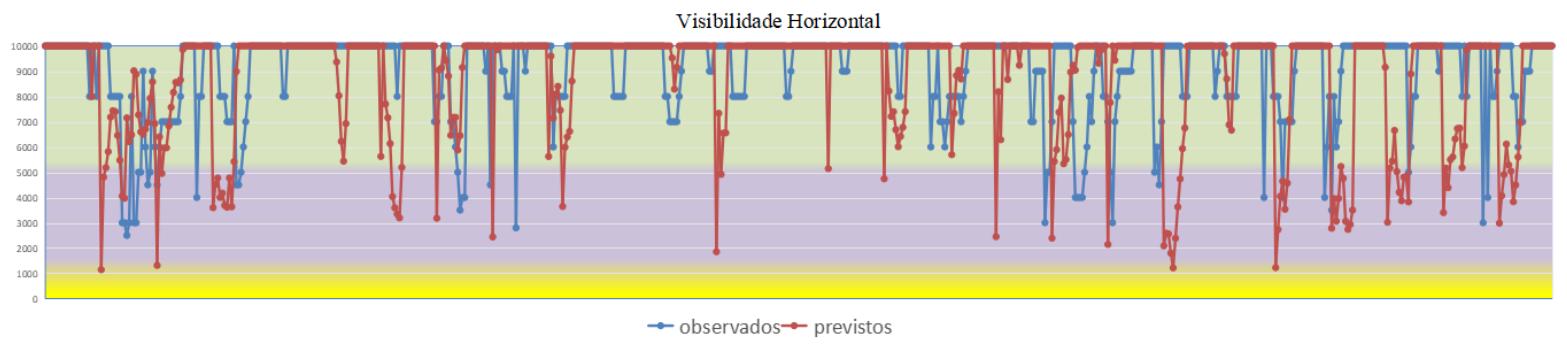


Gráfico 18 - Janeiro de 2025

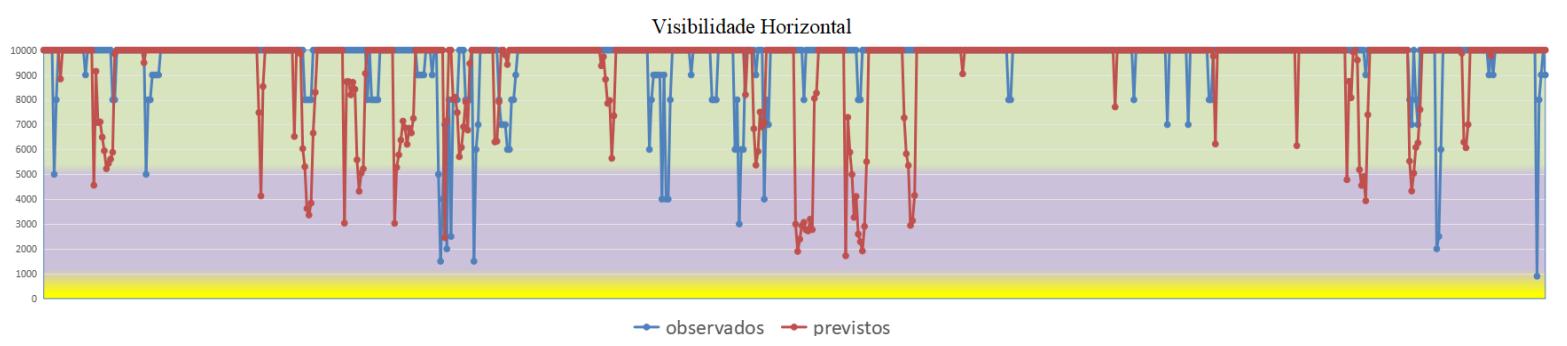


Gráfico 19 - Fevereiro de 2025

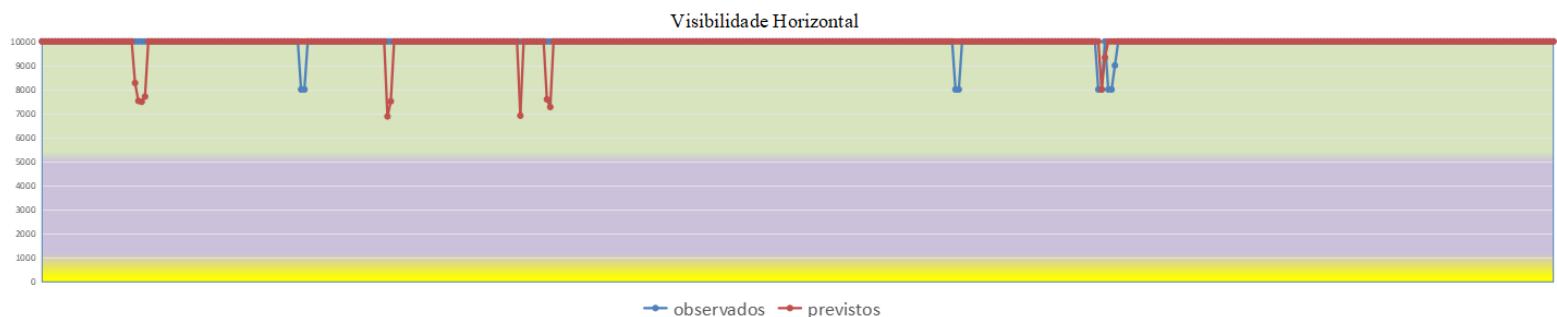


Gráfico 20 - Março de 2025

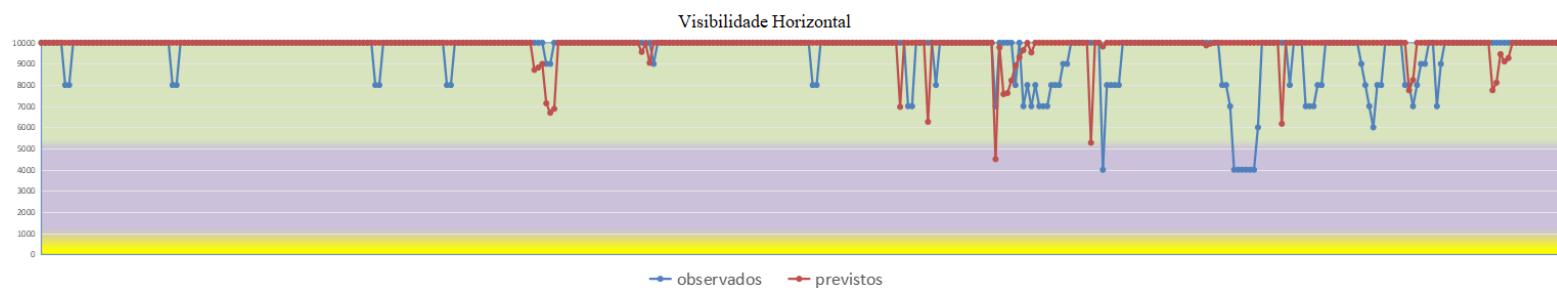


Gráfico 21 - Abril de 2025

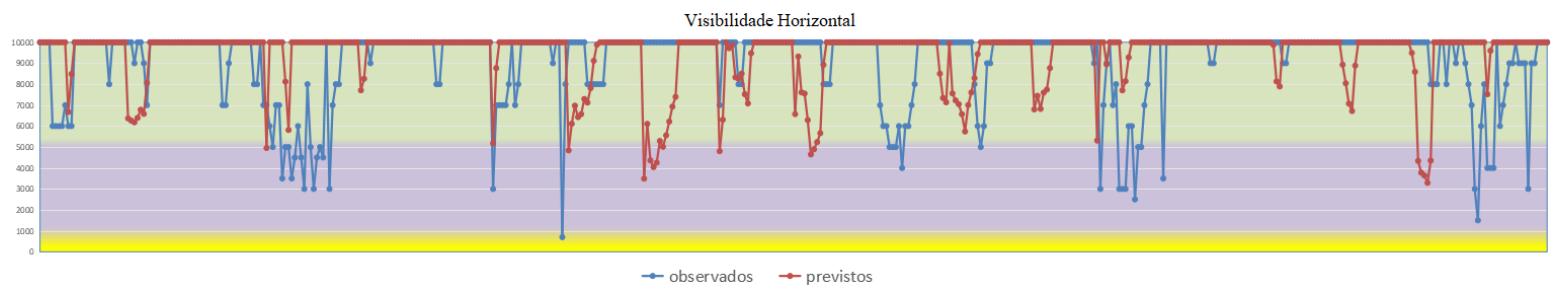


Gráfico 22 - Maio de 2025

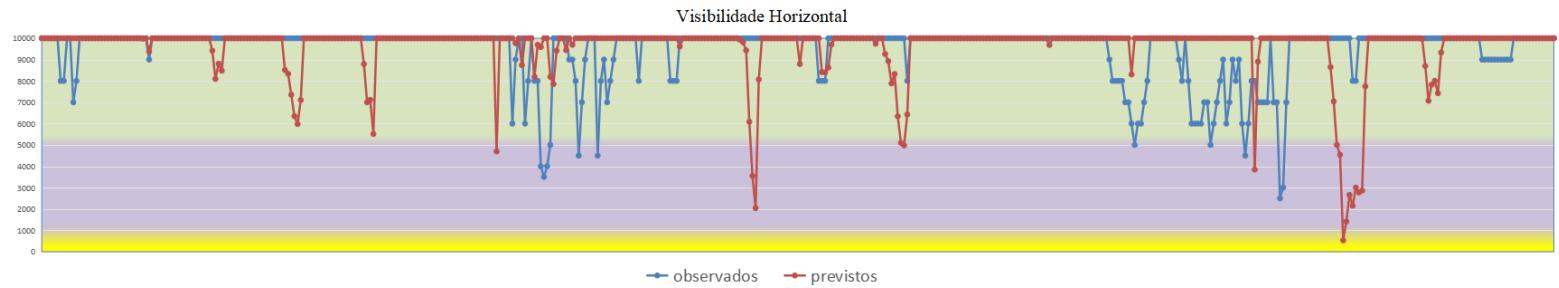


Gráfico 23 - Junho de 2025

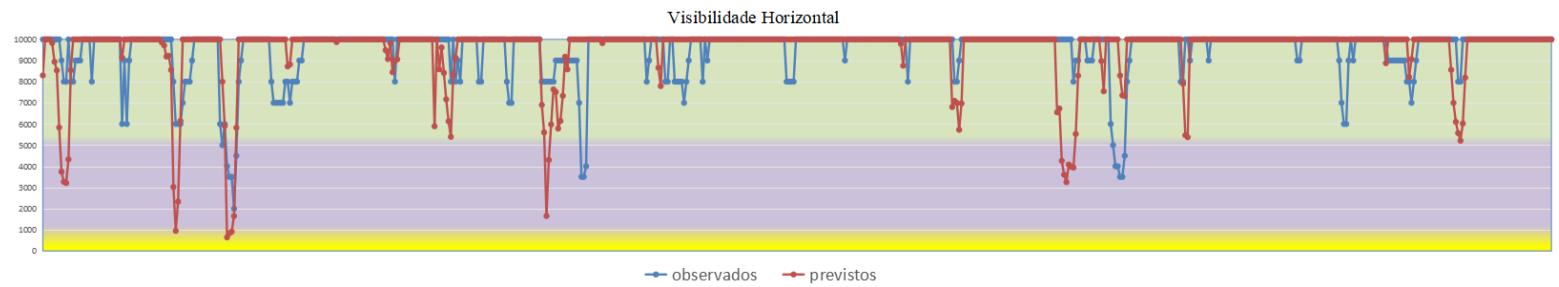
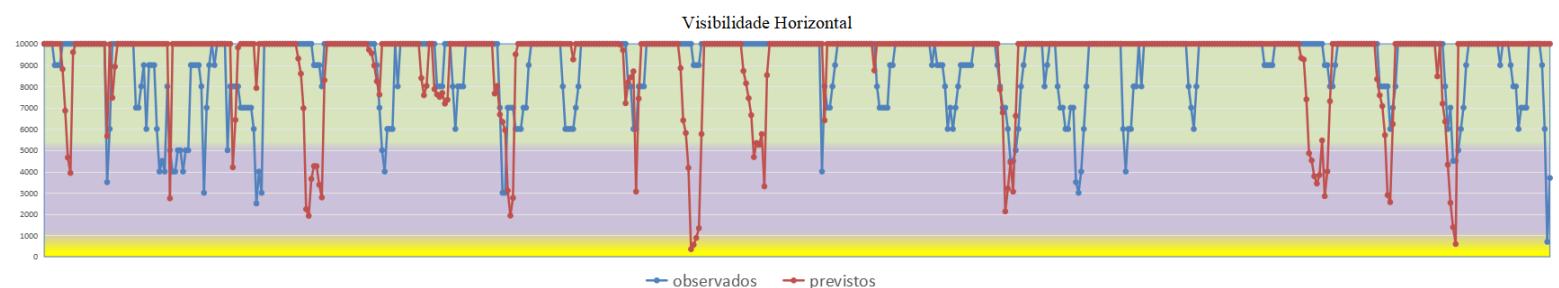


Gráfico 24 - Julho de 2025



ANEXO A – NAVEMARINST N° 10-11^a ANEXO H

NAVEMARINST N° 10-11A

Anexo H

MARINHA DO BRASIL

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

ORIENTAÇÕES PARA A COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS METEOCEANOGRÁFICOS PREVISTOS E OBSERVADOS

A comparação entre os parâmetros meteoceanográficos previstos e observados é importante para a verificação da qualidade das previsões. A tabela a seguir indica as faixas e unidades utilizadas nas previsões dos parâmetros e as variações consideradas como Corretas (C), Aceitáveis (A) e Incorretas (I).

Durante a comissão, o navio deverá elaborar relatório de avaliação dos BPME e preencher a planilha de comparações conforme o anexo J com base na tabela a seguir:

Parâmetro	Faixas de Previsão		Unidade	Avaliação		
				Correta	Aceitável	Incorreta
Visibilidade	Muito restrita	Menor que 1 km	xxx	Dentro da faixa.	Uma faixa acima ou abaixo.	Mais de uma faixa acima ou abaixo.
	Restrita	1 a 4 km				
	Moderada	4 a 10 km				
	Boa	Maior que 10 km				
Cobertura de nuvens	Limpo	Clear	0/8	xxx	Dentro da faixa.	Uma faixa acima ou abaixo.
	Pouco Nublado	Partly cloudy	1 a 2 /8			
	Meio Encoberto		3 a 4 /8			
	Quase Encoberto	Cloudy	5 a 7/8			
	Encoberto	Overcast	8/8			
Altura da base das nuvens	xxx		metros	Entre ± 200	± 200 a 500	Maior que ± 500
Temperatura máxima e mínima	xxx		graus Celsius	Entre ± 2	± 2 a 4	Maior que ± 4
Tendência da temperatura em 24h	Ascensão	> 5°C	xxx	Dentro da faixa.	Uma faixa acima ou abaixo.	Mais de uma faixa acima ou abaixo.
	Ligeira ascensão	entre 2 e 5°C				
	Estável	entre -2 e 2°C				
	Ligeiro declínio	entre -2 e -5°C				
	Declínio	< -5 °C				
Temperatura da Água do Mar	xxx		graus Celsius	Entre ± 1	± 1 a 2	Maior que ± 2
Umidade relativa	xxx		%	Entre ± 5	± 5 a 10	Maior que ± 10