

# AUXÍLIO À DECISÃO DE VISIBILIDADE: UM PRODUTO OPERACIONAL DE ALTA RESOLUÇÃO PARA SINALIZAÇÃO DE NEVOEIROS PREVISTOS EM DERROTAS COSTEIRAS

Visibility Decision Aid: a high-resolution operational product for forecasting fog along coastal routes

Maria Eduarda Palheiros Vanzan<sup>1</sup>, Flávia Rodrigues Pinheiro<sup>2</sup>,  
Alexandre Augusto Lopes Gadelha<sup>3</sup>, Thainá Castro da Silva<sup>4</sup>

**Resumo:** A previsão de nevoeiros representa um desafio significativo para os meteorologistas em razão da alta complexidade de seus processos de formação e dissipação. Nevoeiros densos afetam atividades rotineiras devido à baixa visibilidade, impactando fortemente a navegação marítima e aérea, além de causar prejuízos econômicos em decorrência do fechamento de portos e aeroportos. Este trabalho teve como objetivo apresentar uma nova ferramenta operacional de suporte à decisão para previsão de nevoeiros: o ADVIS (Auxílio à Decisão de VISibilidade). Tal produto destina-se a ser utilizado por usuários da Marinha do Brasil que necessitem de uma informação concisa e direta sobre a previsão de visibilidade ao longo de uma trajetória de interesse no mar ou em terra, no caso de operações aeronavais. Para isso, empregou-se um modelo atmosférico de alta resolução em uma área piloto, a costa do Rio de Janeiro, com configuração computacional aprimorada e direcionada às características da região. A ferramenta tem demonstrado uma precisão inédita entre os produtos de visibilidade já gerados no Centro de Hidrografia da Marinha. Além disso, apresenta grande possibilidade de portabilidade da metodologia para outras regiões, permitindo a geração deste produto operacional em diversas áreas da costa brasileira, auxiliando o planejamento e, sobretudo, a segurança da navegação em situações de visibilidade restrita.

**Palavras-chave:** Nevoeiro. Visibilidade. Decisão. Modelagem.

**Abstract:** Fog prediction represents a significant challenge for meteorologists due to the high complexity of its formation and dissipation processes. Dense fogs affect routine activities as a result of low visibility, heavily impacting maritime and air navigation, also causing economic losses related to the closure of ports and airports. This work aimed to present a new operational decision aid tool for fog forecasting—the Auxílio à Decisão de VISibilidade (ADVIS). Such a product is intended to be used by Brazilian Navy personnel who require concise and direct information on visibility forecasts along a trajectory of interest at sea or on land, in case of naval aviation operations. To this end, a high-resolution atmospheric model was employed in a pilot area, Rio de Janeiro coast, with an improved computational configuration directed to the region characteristics. The tool has demonstrated special precision among the visibility products ever produced by the Navy Hydrographic Center. In addition, it presents a great possibility of a methodology portability to other areas, allowing the generation of this operational product in various areas of the Brazilian coast, assisting planning and, above all, navigation safety in restricted visibility situations.

**Keywords:** Fog. Visibility. Decision. Modelling.

1. Segundo-Tenente. Mestre em Engenharia de Biosistemas pela Universidade Federal Fluminense. Ajudante da Seção de Modelagem Atmosférica do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: eduarda.vanzan@marinha.mil.br

2. Capitão de Corveta. Doutora em Assimilação de Dados em Modelos não Lineares pela University of Reading (UK). Encarregada da Seção de Assimilação de Dados do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: flavia.pinheiro@marinha.mil.br

3. Capitão de Corveta. Meteorologista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Encarregado da Seção de Modelagem Atmosférica do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: alexandre.gadelha@marinha.mil.br

4. Primeiro-Tenente. Mestre em Modelagem Estatística, Matemática e Computacional aplicada à saúde pela Escola Nacional de Saúde Pública (Fiocruz). Ajudante da Seção de Assimilação de Dados do Centro de Hidrografia da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: thaina.castro@marinha.mil.br

## 1. INTRODUÇÃO

Nevoeiros são fenômenos que se formam pela suspensão de gotículas de água muito pequenas no ar, geralmente microscópicas, resultando em redução da visibilidade horizontal para menos de 1 km. Caso a visibilidade se restrinja entre 1 km e 5 km, o fenômeno é chamado de névoa úmida (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2021). A formação e a dissipação de um nevoeiro ocorrem após interações complexas entre processos na natureza, geralmente exigindo uma combinação de valores sutis de variáveis como umidade, temperatura, vento, nebulosidade, radiação e turbulência, dentre outras de menor escala. Essa configuração, associada às características específicas de cada região, dificulta a previsibilidade do evento, tornando a previsão de nevoeiros um dos maiores desafios para os meteorologistas.

A presença de nevoeiros impacta significativamente a navegação marítima e aérea, uma vez que a restrição de visibilidade pode resultar no fechamento de portos e aeroportos, em razão do risco à segurança envolvido nessas atividades, ocasionando grandes prejuízos econômicos. A habilidade de prever com maior precisão o início e o término da formação destes fenômenos auxiliaria enormemente no planejamento de rotas, entrada e saída de portos e em pousos e decolagens mais seguros.

O Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) é responsável pela previsão meteorológica e oceanográfica de extensa área marítima, com aproximadamente 12.000.000 de km<sup>2</sup>, conhecida como Metarea V. O CHM tem trabalhado para otimizar a complexa previsibilidade de nevoeiros por meio de avançada modelagem numérica computacional, baseada em equações matemáticas que definem a atmosfera e a descem, projetando seu estado futuro. No campo acadêmico, diversos métodos foram desenvolvidos na tentativa de aprimorar a previsão desse fenômeno (BARI; BERGOT; TARDIF, 2023). Contudo, tais métodos só poderão ser bem-sucedidos se o modelo numérico utilizado for devidamente configurado. Isso envolve ajustes refinados nas chamadas parametrizações da física do modelo—equações que modelam processos de microescala—, bem como outros ajustes, como a resolução espacial. A resolução está relacionada à malha da grade (área) de operação do modelo e traduz seu refinamento. No caso dos nevoeiros, um modelo com alta resolução horizontal é extremamente desejável, já que se trata de fenômeno que envolve processos refinados de escala micrometeorológica.

Neste trabalho, foi utilizado o Weather Research and Forecasting (WRF, pesquisa e previsão meteorológica) — modelo atmosférico já operado no CHM para previsão de tempo regional (em toda a Metarea V). Apesar de seu foco não ser a previsão de nevoeiros, o WRF se destaca entre os demais modelos numéricos em inúmeras pesquisas sobre esse tipo específico de previsão (CARDOSO et al., 2023; PELÁEZ-RODRÍGUEZ et al., 2023; PARDE et al., 2022). O WRF é gratuito e já está implementado no CHM há anos, assim o presente trabalho pode focar apenas na lapidação computacional de suas parametrizações e demais configurações, sem onerar o CHM com a implementação de novos sistemas.

Nesse escopo, este trabalho expõe os resultados otimizados de previsão de nevoeiros obtidos para a área da Baía de Guanabara e da costa do Rio de Janeiro (RJ), os quais demonstram precisão inédita entre os produtos de visibilidade existentes no CHM. Dada sua relevância, tais resultados foram transformados em nova ferramenta operacional de suporte à decisão para previsão de nevoeiros: o ADVIS (Auxílio à Decisão de VISibilidade). A ferramenta visa a ser utilizada por quaisquer usuários que necessitem de previsão de visibilidade ao longo de uma trajetória de interesse, seja no mar ou em terra. A primeira área a ser configurada e refinada foi a região da Baía de Guanabara (RJ), com configuração computacional aprimorada e direcionada às características locais. Como a metodologia adotada na configuração do modelo permite portabilidade, já estão previstos, em trabalhos futuros, a expansão para novas regiões portuárias, o que propiciará a geração deste produto operacional para diversas áreas da costa brasileira, auxiliando no planejamento e, sobretudo, na segurança da navegação em situações de visibilidade restrita.

## 2. OBJETIVOS

Os principais objetivos deste projeto foram:

- O avanço científico na desafiadora área de previsão de nevoeiros, primeiramente na costa do RJ, buscando o estado da arte nos prognósticos desse fenômeno na região;
- Consequente ganho de precisão nos avisos de baixa visibilidade emitidos pelo CHM na região de estudo; e
- A criação de uma nova ferramenta para os navegantes e pilotos — o ADVIS — que sinaliza, de forma concisa e direta, a previsão de visibilidade ao longo de uma trajetória de interesse.

### 3. METODOLOGIA

A base do desenvolvimento deste trabalho foi o modelo atmosférico WRF, cujo acesso é gratuito, amplamente difundido pela comunidade científica para fins de previsão regional de tempo e já operacional como modelo de contingência no CHM, para gerar prognósticos de diversas variáveis meteorológicas para toda a Metarea V. A versão operacional 4.6.0 do WRF está configurada no CHM para uma resolução horizontal compatível com toda a área marítima de responsabilidade da Marinha do Brasil. Isso significa que a física do modelo está configurada de forma genérica para abranger uma área oceânica de grande extensão. Para que fenômenos de menor escala tenham seus processos captados por qualquer modelo numérico, é necessário que sua configuração esteja direcionada ao fenômeno de interesse, o que requer um estudo mais aprofundado das parametrizações. Tais parametrizações envolvem processos físicos da atmosfera, que incluem formação de nuvens, microfísica, radiação e interações ocorridas na camada entre a superfície da Terra e a atmosfera adjacente.

Assim, o presente estudo visou modificar a configuração operacional do modelo WRF (SKAMAROCK et al., 2019), a fim de torná-lo capaz de detectar as sutilezas do processo de formação de nevoeiro e gerar previsões acertadas sobre o horário de seu surgimento e dissipação. O nível de complexidade deste tipo de previsão é alto, considerando-se a microescala dos processos envolvidos no fenômeno. Para tanto, foram realizadas modificações importantes e inéditas na versão operacional do modelo WRF do CHM, primordialmente envolvendo uma grade com resolução horizontal de grande refinamento, focada na área de estudo, microfísica direcionada ao fenômeno de nevoeiro e cálculos dos parâmetros de radiação com intervalos menores, tornando os fluxos radiativos mais acurados.

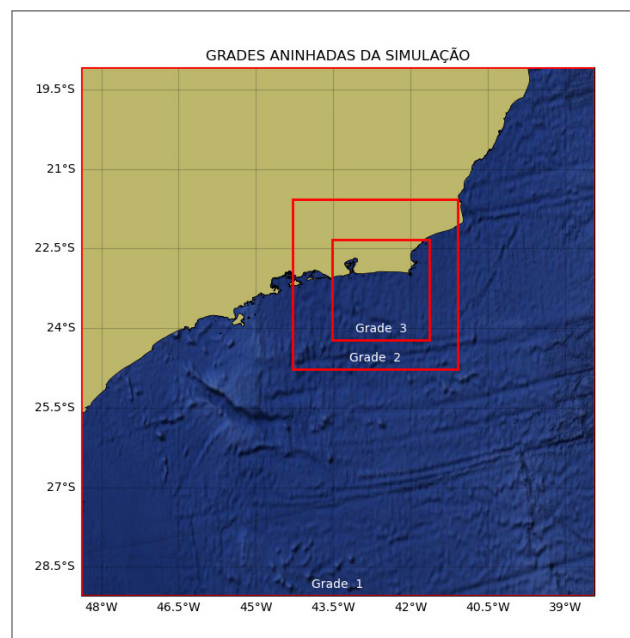
Os resultados gerados pelo modelo atmosférico foram comparados com dados observados dos aeródromos Santos Dumont e Galeão, localizados na Baía de Guanabara, com base no chamado Relatório Meteorológico de Aeródromo (METAR). A verificação visual da ocorrência dos eventos também se mostra importante, pela escassez de outros dados na área.

#### 3.1 MODELAGEM NUMÉRICA

O modelo atmosférico WRF é rotineiramente operado no CHM com uma grade que abrange toda a Metarea V, apresentando resolução horizontal de 10 km. Essa resolução

corresponde ao espaçamento entre dois pontos adjacentes da malha numérica, sobre os quais são calculadas as equações que descrevem a dinâmica da atmosfera. Quanto menor este espaçamento, maior a resolução horizontal do modelo e mais precisa a representação dos processos físicos atmosféricos. Neste estudo, foram criadas três áreas distintas, nas quais as grades maiores alimentam as menores com as condições físicas, aprimorando assim o refinamento das previsões e minimizando distorções. Tal procedimento, conhecido como aninhamento, foi aplicado ao redor da costa do Rio de Janeiro, com resoluções horizontais de 9 km, 3 km e 1 km, correspondendo às grades 1, 2 e 3, respectivamente, sendo a grade 1 (9 km) a de maior extensão (Figura 1).

Os cálculos da microfísica do modelo utilizaram o esquema “Double Moment 5–class and 6–class”, que se mostra particularmente adequado na simulação de eventos de nevoeiro, como sugerido por Cardoso et al. (2023). Essa configuração permite a previsão de diversas variáveis referentes à umidade, incluindo a concentração de gotículas em cada ponto de grade, proporcionando uma representação mais acurada de processos como a ativação de gotículas, a interação com partículas em suspensão e a evolução da distribuição do tamanho das gotas.



**Figura 1.** Representação das grades aninhadas utilizadas no WRF, com as resoluções horizontais de 9 km (grade 1), 3 km (grade 2) e 1 km (grade 3). (Fonte: os autores).

As condições iniciais e de contorno para o processamento da grade inicial 1 foram obtidas das análises do modelo Global Forecast System (GFS), produzidas pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP), assim como o WRF operacional no CHM. Uma diferença importante entre a configuração operacional e a voltada à previsão de nevoeiros reside na frequência temporal das previsões: enquanto a primeira gera prognósticos a cada 3 horas, a segunda produz previsões a cada 1 hora, para um horizonte de até 48 horas — aspecto crucial para fenômenos de rápida evolução, como a formação e a dissipação de nevoeiros.

### 3.2 ESTIMATIVA DE NEVOEIRO

A ocorrência de nevoeiro é medida pela visibilidade horizontal. Alguns métodos empíricos são desenvolvidos na tentativa de estimar esse parâmetro, tais como os utilizados por Cardoso et al. (2023), que testaram a estimativa de visibilidade de Kunkel e índices como o Fog Stability Index (FSI) e o Forecast Systems Laboratory (FSL) (DORAN et al., 1999). Em seus estudos, focados na cidade de Rio Grande (RS), os autores encontraram as melhores estimativas de visibilidade com o parâmetro FSL. Assim, no presente estudo, foi adotado o índice FSL, que estima a visibilidade horizontal em milhas por meio da seguinte equação:

$$FSL = 6000 \left( \frac{T - Td}{RH1,75} \right)$$

Onde:

$T$  = temperatura do ar (°C);

$Td$  = temperatura do ponto de orvalho (°C); e

$RH$  = umidade relativa (%).

O resultado do FSL é então convertido em metros: valores inferiores a 1.000 metros correspondem ao fenômeno de nevoeiro, e valores entre 1.000 e 5.000 metros caracterizam-se como névoa úmida. O cálculo utilizou  $T$ ,  $Td$  e  $RH$  provenientes dos prognósticos da grade 3 do WRF, ou seja, a grade com resolução mais refinada e detalhada.

### 3.3 DADOS ANALISADOS

Para avaliar o desempenho do WRF na previsão de nevoeiros, foram usadas observações meteorológicas dos aeródromos Santos Dumont (código SBRJ), na entrada da Baía de

Guanabara e Galeão (código SBGL), situado no interior da Baía. A limitação de dispor apenas dessas duas fontes oficiais de registro decorre de sua localização nos setores oeste e interior da Baía, impedindo a validação oficial de nevoeiros formados em outras áreas, sendo possível somente a verificação visual. Ressalta-se que o fenômeno frequentemente ocorre sob a forma de bancos de nevoeiros, que podem se deslocar para dentro ou para fora da Baía. Assim, os registros dos aeródromos, embora úteis, não determinam de forma abrangente sua ocorrência em toda a região. As comparações entre modelo e observação consideraram eventos ocorridos entre 25/07/24 e 25/07/25.

### 3.4 O PRODUTO ADVIS (AUXÍLIO À DECISÃO DE VISIBILIDADE)

Os resultados promissores obtidos pelo WRF na caracterização do processo de formação de nevoeiros por meio do índice FSL motivaram o desenvolvimento de um produto voltado a atender às demandas de navios e esquadrões de aeronaves quanto à visibilidade horizontal durante a navegação. O produto apresenta, de forma concisa e objetiva, a previsão de visibilidade ao longo da trajetória definida pelo usuário, codificada por cores: verde para visibilidade boa (acima de 5 km), amarela para moderada (entre 1 e 5 km) e vermelha para restrita (abaixo de 1 km). A metodologia é ligeiramente diferente da adotada na Tabela de Visibilidade do CHM, mas optou-se por essa categorização para facilitar a interpretação dos produtos gerados, associando as cores diretamente aos fenômenos. A informação possibilita o replanejamento da rota, ajustando o horário de passagem por trechos potencialmente restritos, e auxilia a gestão de atracação, desatracação, pouso ou decolagem — operações que podem se tornar particularmente desafiadoras sob condições de nevoeiro intenso.

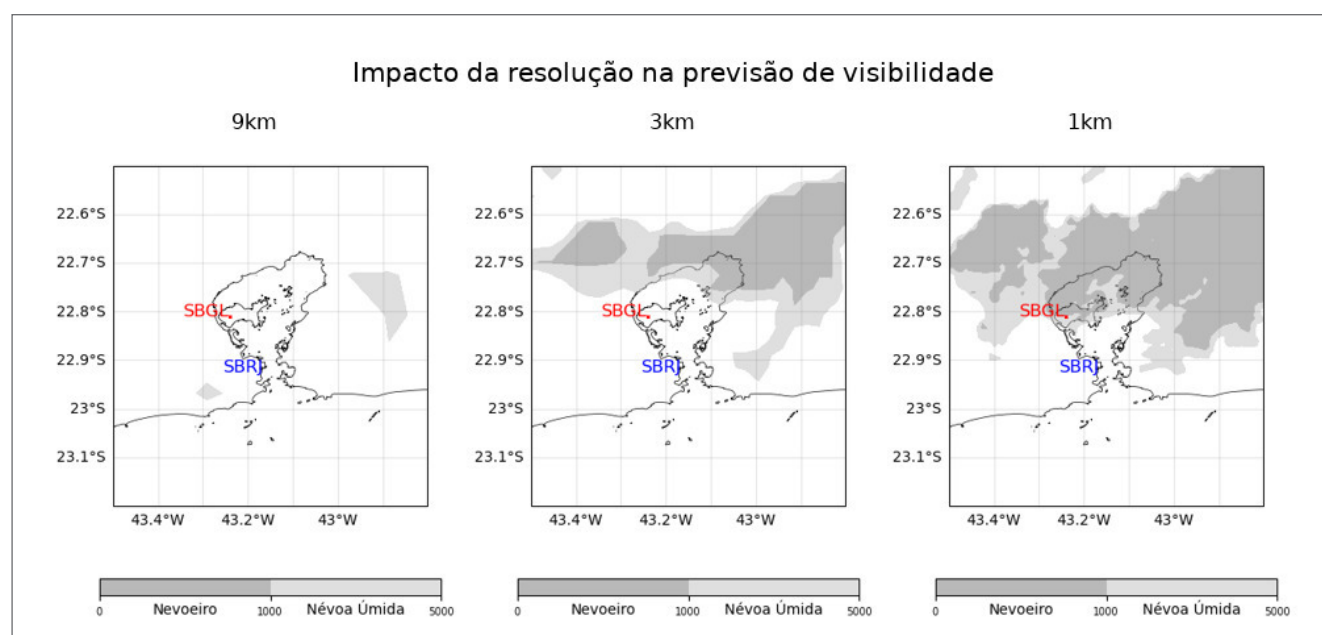
## 4. RESULTADOS

O primeiro resultado relevante diz respeito ao impacto do incremento da resolução horizontal do modelo. Como já explicado, neste estudo, foram utilizadas três grades, com resoluções de 9 km, 3 km e 1 km. Quanto menor o espaçamento horizontal entre os pontos de grade, maior o detalhamento dos fenômenos a serem representados pelo modelo. Para avaliar a sensibilidade do modelo à resolução horizontal configurada, foi selecionado um caso de ocorrência de nevoeiro no aeródromo do Galeão,

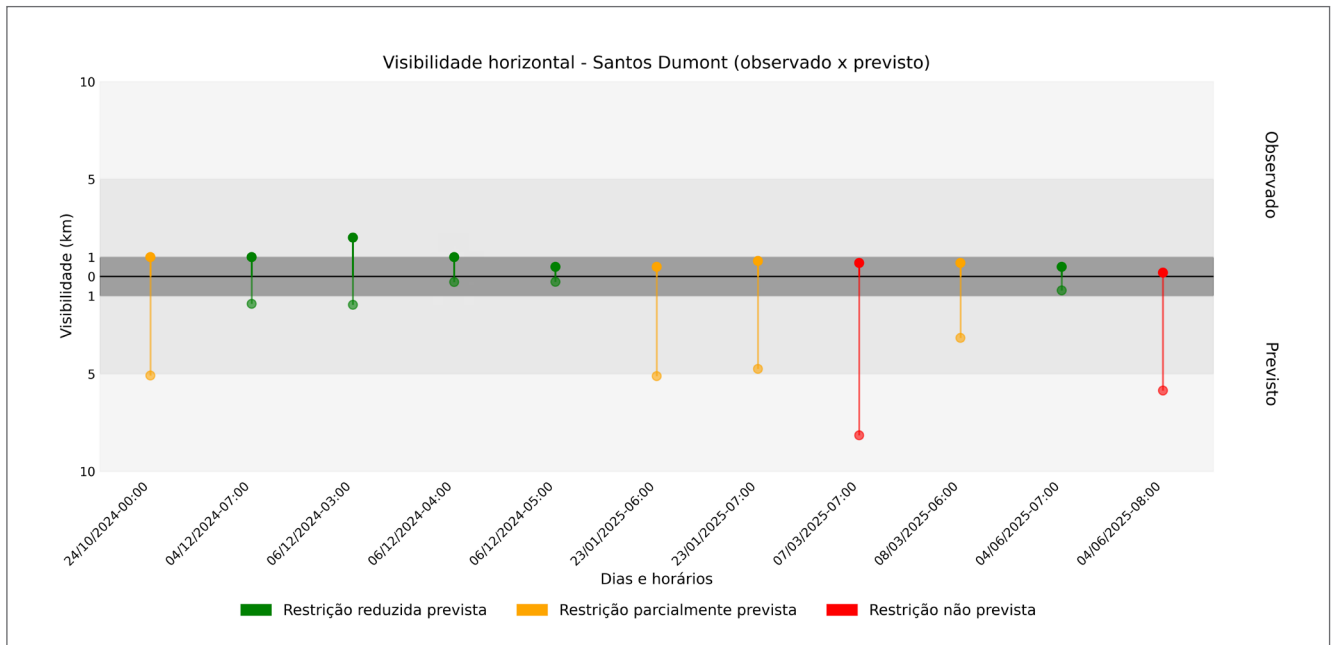
enquanto no aeródromo Santos Dumont, situado na saída da Baía, não foi observada qualquer restrição de visibilidade. Dada a distância de apenas 14 km entre os dois aeródromos, trata-se de um evento de previsão particularmente desafiadora, devido à sua ocorrência extremamente localizada. A Figura 2 ilustra a previsão de visibilidade do modelo para este caso. Utilizando a grade com 9 km, semelhante à configuração operacional no CHM para a Metarea V, o modelo não apresentou refinamento suficiente e, portanto, não foi possível representar qualquer redução de visibilidade na Baía. O domínio de 3 km de resolução identificou redução da visibilidade em alguns pontos da grade; porém, não identificou o fenômeno ocorrido no aeródromo do Galeão. Por outro lado, a grade de 1 km captou o fenômeno com detalhamento, prevendo nevoeiro para o Galeão e excluindo o Santos Dumont do evento, conforme observado. Esse exemplo demonstra o impacto do refinamento da resolução horizontal num modelo numérico atmosférico. A configuração do WRF desenvolvida neste estudo mostrou-se capaz de compreender melhor a microfísica atmosférica e de prever a gênese de um fenômeno tão sutil quanto o nevoeiro de forma adequadamente pontual. Entretanto, é importante ressaltar a contribuição das grades de 9 km e 3 km nesta estrutura. Elas alimentam de forma gradual a grade refinada de 1 km, assegurando continuidade nos cálculos, sem perda de informações ou geração de dados

espúrios à medida que o refinamento ocorre. Essa configuração inovadora do modelo WRF, com 1 km de resolução horizontal e parametrização dedicada à previsão de nevoeiros oferece previsões atualmente indisponíveis em outros centros meteorológicos no Brasil, como o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), as Defesas Civis do Rio de Janeiro e de Niterói, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Como os testes indicaram que a grade de 1 km foi a mais eficaz na representação do fenômeno, o estudo concentrou-se nesta resolução. Foi realizado um comparativo entre as previsões de visibilidade horizontal e os dados METAR do Santos Dumont, aeródromo com informações mais próximas do oceano por se localizar na saída da Baía de Guanabara. Embora se trate de uma informação pontual e, por consequência, não abranja os bancos de nevoeiros ocorridos em toda a área da Baía, a análise do desempenho do modelo em diferentes situações naquela localização revela aspectos relevantes de sua capacidade preditiva. Sete casos de eventos de nevoeiro foram analisados, que afetaram especificamente o aeródromo do Santos Dumont no período de estudo. Tais casos restringiram a visibilidade horizontal entre 200 metros e 1 km, interrompendo as operações do aeródromo. A Figura 3 mostra a comparação entre as observações METAR (valores acima da linha zero) e as previsões do modelo WRF



**Figura 2.** Previsão de visibilidade (sombreado) na Baía de Guanabara, com diferentes resoluções espaciais. Da esquerda para a direita, são apresentadas as resoluções de grade aninhada de 9 km, 3 km e 1 km.



**Figura 3.** Comparação entre os prognósticos de visibilidade do modelo WRF (abaixo da linha do zero) e os dados observados do aeródromo Santos Dumont (acima da linha do zero). Áreas sombreadas: cinza escuro = nevoeiro; cinza intermediário = névoa úmida; e cinza claro = nenhuma restrição de visibilidade.

(valores abaixo da linha zero). Os círculos representam a visibilidade em quilômetros. Valores na área em cinza escuro indicam visibilidades associadas a nevoeiros, ou seja, restrições abaixo de 1 km. Os valores na área em cinza intermediário correspondem à névoa úmida, entre 1 e 5 km. Valores na área em cinza claro indicam visibilidades acima de 5 km, ou seja, pouca a nenhuma restrição de visibilidade. Assim, quando o valor previsto pelo modelo (na linha abaixo do zero) estiver dentro da margem de erro estatística de  $\pm 1$  km em comparação ao observado, tem-se um prognóstico acertado de restrição, e as linhas são ilustradas na cor verde. As linhas em amarelo representam os casos em que o modelo detectou restrição apenas sob a forma de névoa úmida, e as linhas vermelhas representam os casos em que o modelo não previu a restrição. É possível observar a ocorrência de nevoeiros nos meses de outubro e dezembro de 2024 e janeiro, março e junho de 2025, compreendendo os períodos de primavera, verão e inverno. Em alguns dias, foi registrado mais de um horário de ocorrência do fenômeno. O modelo previu acertadamente a ocorrência, o horário e a intensidade dos nevoeiros nos dias 04/12/24, 06/12/24 e 04/06/25. Destaca-se o exemplo do dia 06/12, quando o modelo foi capaz de acompanhar corretamente as nuances na visibilidade, que baixou de 2 km às 03:00 para 500 metros às 05:00. O modelo previu essa

dinâmica de forma adequada e precisa, de acordo com os horários de ocorrência. No dia 04/06, o modelo previu corretamente o horário de início e a intensidade do nevoeiro que restringiu a visibilidade para 500 metros às 07:00. Embora o fenômeno tenha se dissipado às 08:30, aumentando a visibilidade para 4.800 metros, o modelo determinou sua dissipação com meia hora de antecedência. Ressalta-se, porém, que prever com precisão o horário de formação e dissipação de um nevoeiro constitui tarefa extremamente complexa, e que a própria detecção do fenômeno já representa um desafio de elevada dificuldade. Nos dias 24/10/24, 23/01/25 e 08/03/25, o modelo demonstrou sensibilidade em representar restrição na visibilidade, porém não tão intensa quanto a observada, prevendo névoa úmida em lugar de nevoeiro. No entanto, a representação dessa restrição já denota resultado mais eficiente do que a previsão eventualmente gerada pelos atuais modelos, com resolução mais degradada. No dia 07/03/25, o modelo não foi capaz de detectar a formação do nevoeiro sobre o aeródromo do Santos Dumont, mas representou névoa úmida nas proximidades (figura não mostrada por restrição de páginas). Isso ainda pode ser caracterizado como detecção aceitável por parte do modelo, já que o fenômeno geralmente possui escala maior do que a da pista de um aeródromo.

Casos de nevoeiros oceânicos, observados visualmente pelos previsores do Serviço Meteorológico Marinho (SMM), também já puderam ser prognosticados pelo modelo WRF. A Figura 4 destaca um exemplo desse tipo de caso. O modelo previa, no dia 18/10/24, uma restrição de visibilidade na área oceânica, adentrando a Baía de Guanabara e alongando-se de forma muito localizada entre a Urca e a Fortaleza de Santa Cruz. A foto mostra a entrada da Baía e foi tirada quando o nevoeiro já iniciava sua ascensão para posterior dissipação, confirmando a previsão. Tratava-se de um banco de nevoeiro, o qual restringiu severamente a visibilidade naquele dia.

Considerando-se tais resultados promissores, que corroboram os excelentes resultados obtidos por Cardoso et al. (2023) em estudo similar para uma região igualmente desafiadora, o produto ADVIS foi concebido a fim de mostrar, de forma geográfica, a situação da visibilidade horizontal em cada ponto da derrota de um plano de navegação. A Figura 5 apresenta um exemplo do produto. Simulou-se o recebimento de uma derrota fictícia de um navio hidroceanoográfico, que estaria fundeado nas proximidades de Arraial do Cabo no dia 04/06/25 e envolvido em uma operação SAR (Search and Rescue). A embarcação tinha partida planejada por volta das 06:00, com realização de buscas junto à costa entre Arraial do Cabo e a entrada da Baía de Guanabara. É habitual que

os navios da Marinha do Brasil enviem ao SMM derrotas de comissões, com os pontos de sua trajetória e horários previstos, solicitando previsões que auxiliem seu planejamento. Assim, com base no modelo WRF, com configuração aprimorada para nevoeiros e seus prognósticos de visibilidade, foi gerado o produto de auxílio à decisão ADVIS, apresentando todos os pontos da derrota planejada a cada horário de prognóstico. Quando a previsão indica que um ponto da derrota será afetado por névoa úmida (visibilidade moderada) ou nevoeiro (visibilidade restrita), o sistema destaca, respectivamente, as cores amarela ou vermelha, representando de forma gráfica e objetiva a condição esperada. Observa-se na Figura 5 um exemplo dessa dinâmica, em que os pontos 1 e 3 da derrota se mostram com visibilidade restrita entre 06:00 e 08:00 (em vermelho). Às 08:00, o nevoeiro (área sombreada em cinza nas figuras, apenas para ilustrar a evolução do fenômeno) tende a se deslocar e se expandir para o oceano, tornando também o ponto 4 vermelho. Somente a partir das 10:00 o modelo previu a melhoria das condições de visibilidade, quando os pontos 1, 3 e 4 tornaram-se amarelos, e o ponto 2 deixou a condição de visibilidade moderada dos outros horários e se tornou verde (visibilidade boa). O navegante que receber esta informação poderá reorganizar seu planejamento, caso as condições de visibilidade restrita representem riscos. Em muitos

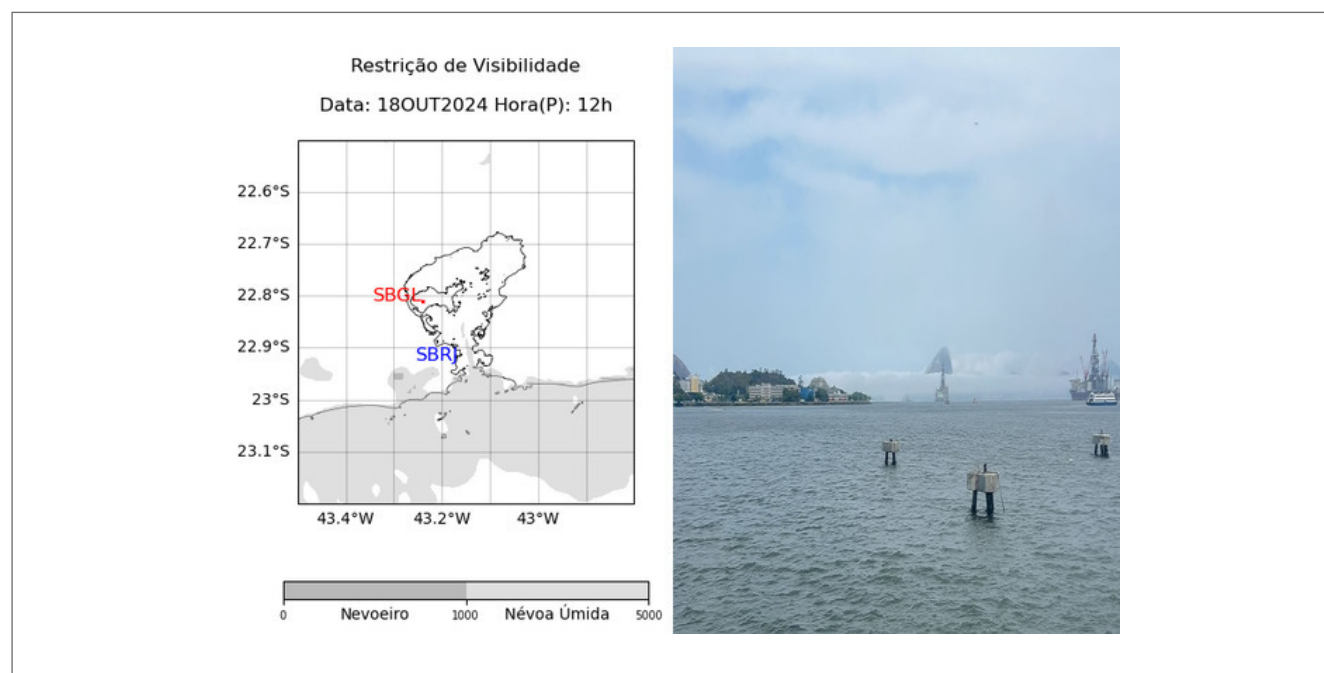
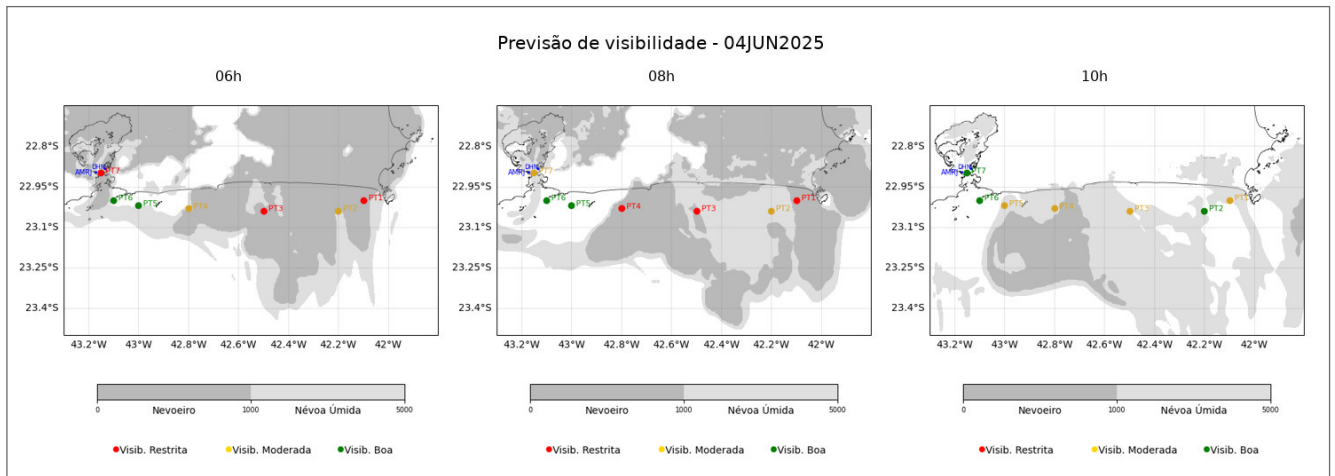


Figura 4. Previsão de visibilidade do modelo WRF (esquerda). Foto da entrada da Baía de Guanabara (direita).



**Figura 5.** Auxílio à Decisão de Visibilidade (ADVIS) para o dia 04/06/25, com uma derrota fictícia. Área sombreada: nevoeiro (cinza escuro) ou névoa úmida (cinza claro).

casos, o remanejamento de horários de chegada aos pontos da derrota em poucas horas — ou até minutos — pode evitar a passagem da embarcação por bancos de nevoeiro marítimo isolados, tornando a navegação mais eficiente. É importante ressaltar que o ADVIS pode ser gerado para auxiliar também operações aéreas ocorridas, por exemplo, entre as cidades de São Pedro da Aldeia e Rio de Janeiro. Considerando-se a relevância de um prognóstico de nevoeiros tanto para pilotos de asa fixa quanto, principalmente, para pilotos de asa rotativa, o produto tem grande potencial no auxílio ao planejamento de voo dos esquadrões desses meios.

## 5. CONCLUSÕES

Neste estudo, foi criada uma nova ferramenta para o navegante, o ADVIS, que sinaliza de forma concisa e direta a previsão de visibilidade horizontal ao longo de uma trajetória de interesse. Por trás desse simples produto, encontra-se um avanço científico na desafiadora área de previsão de nevoeiros, atingindo o estado da arte nos prognósticos desse fenômeno na costa do Rio de Janeiro, em razão de seu ineditismo nesta região. Além de auxiliar no planejamento de trajetórias, os avanços no modelo atmosférico WRF permitem ganho significativo de qualidade na emissão dos avisos de baixa visibilidade do CHM para a região de estudo.

O trabalho demonstrou que o refinamento da resolução horizontal e a implementação de uma microfísica dedicada no

modelo WRF são fatores cruciais para a detecção e a previsibilidade de nevoeiros. Ao comparar os casos de restrição de visibilidade mais severa reportados pelo aeródromo Santos Dumont com a previsão do modelo durante o período estudado, observa-se a detecção da redução de visibilidade em todos os casos, exceto em um deles, em que o modelo não apresentou redução sobre o aeródromo, mas nas proximidades da pista, errando por apenas algumas centenas de metros em relação ao fenômeno.

Os resultados inovadores obtidos neste estudo sugerem que as configurações implementadas podem ser expandidas para outras áreas de interesse da Marinha do Brasil, especialmente as mais críticas no que tange à ocorrência de nevoeiros, tais como os litorais de São Paulo (porto de Santos), de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, sobretudo na região portuária de Rio Grande. Naquela área, os nevoeiros podem durar até 48 horas, impactando fortemente as atividades de atracação e desatracação da praticagem. Assim, a ideia consiste em expandir a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida. Além disso, os avanços apresentados neste artigo já despertam a atenção de outros centros meteorológicos, como as Defesas Civis do Rio de Janeiro e de Niterói, que mostraram interesse nas previsões para seus Centros de Operações. Nesse contexto, ampliar as áreas de abrangência do modelo e refinar ainda mais os resultados contribuirão para a expansão da aplicação operacional desta metodologia, incluindo navegantes e pilotos da Marinha, previsores do CHM e, conseqüentemente, a sociedade civil, em suas mais diversas atividades que dependam da segurança da navegação marítima, aérea e terrestre.

## REFERÊNCIAS

BARI, D.; BERGOT, T.; TARDIF, R. Fog Decision Support Systems: A Review of the Current Perspectives. *Atmosphere*, v. 14, n. 8, p. 1314, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14081314>

CARDOSO, J. R.; MARTON, E.; PINHEIRO, F. R.; COSSICH, W.; MORAES, N. O. Dense fog simulation in southern Brazil using the WRF model with high spatial resolution. *Atmosfera*, v. 38, 2023. <https://doi.org/10.20937/atm.53232>

COMANDO DA AERONÁUTICA. *ICA 105-15*. Estações Meteorológicas de Superfície. 2021.

DORAN J. A. et al. The MM5 at the Air Force Weather Agency - New products to support military operations. *The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology Dallas, Texas*. 1999.

PARDE, A. N.; GHUDE, S. D.; DHANGAR, N. G.; LONKAR, P.; WAGH, S.; GOVARDHAN, G.; BISWAS, M.; JENAMANI, R. K. Operational

Probabilistic Fog Prediction Based on Ensemble Forecast System: A Decision Support System for Fog. *Atmosphere*, v. 13, n. 10, 1608, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13101608>

PELÁEZ-RODRÍGUEZ, C.; MARINA, C. M.; PÉREZ-ARACIL, J.; CASANOVA-MATEO, C.; SALCEDO-SANZ, S. Extreme Low-Visibility Events Prediction Based on Inductive and Evolutionary Decision Rules: An Explicability-Based Approach. *Atmosphere*, v. 14, n. 3, 542, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14030542>

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; LIU, Z.; BERNER, J.; WANG, W.; POWERS, J. G.; DUDA, M. G.; BARKER, D. M.; HUANG, X.-Y. *A Description of the Advanced Research WRF Version 4*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. 2019. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>