

PREVISÃO DE NEVOEIROS UTILIZANDO UM MODELO ATMOSFÉRICO DE ALTA RESOLUÇÃO COMO UM SISTEMA OPERACIONAL DE APOIO À DECISÃO

Segundo-Tenente (AA) Maria Eduarda Palheiros Vanzan¹

Capitão de Corveta (T) Flávia Rodrigues Pinheiro²

Capitão de Corveta (T) Alexandre Augusto Lopes Gadelha³

RESUMO

A ocorrência de nevoeiro representa um desafio significativo para as previsões numéricas, devido aos seus complexos processos de formação e dissipação. Nevoeiros densos e persistentes afetam atividades rotineiras, impactando imensamente a navegação aérea e marítima, causando prejuízos econômicos devido ao fechamento de portos e aeroportos. No Brasil, dois importantes aeroportos e um porto vultoso, localizados na região da Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, lidam com milhões de deslocamentos aéreos e toneladas de carga, anualmente, tornando as previsões de nevoeiro cruciais. Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar e testar uma ferramenta operacional de suporte decisivo para previsão desse fenômeno a ser utilizada por meteorologistas no Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Para isso, o modelo *Weather Research and Forecast* (WRF) foi empregado

¹Oficial do Quadro Auxiliar da Armada graduada em meteorologia (UFRJ). Mestre em Eng. de Biossistemas (UFF), servindo presentemente no Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Email: eduarda.vanzan@marinha.mil.br

²Oficial do Quadro Técnico graduada em meteorologia (UFRJ). Mestre em Eng. Civil com ênfase em Ciências Atmosféricas (COPPE/UFRJ). PhD em Assimilação de Dados (University of Reading), servindo presentemente no Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Email: flavia.pinheiro@marinha.mil.br

³Oficial do Quadro Técnico graduado em meteorologia (UFRJ), servindo presentemente no Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Email: alexandre.gadelha@marinha.mil.br



em uma configuração aprimorada, atendendo-se às condições únicas da Baía de Guanabara. Considerando os testes preliminares realizados neste artigo, os resultados sugerem que a metodologia proposta pode ser uma ferramenta operacional promissora que poderá auxiliar e melhorar os avisos de baixa visibilidade emitidos pelo CHM, buscando, sempre, a segurança na navegação.

Palavras-chave: Nevoeiro; WRF; Baía de Guanabara.

ABSTRACT

The occurrence of fog represents a significant challenge for numerical predictions due to its complex formation and dissipation processes. Dense and persistent fogs affect routine activities, immensely impacting air and maritime navigation and causing economic losses due to the closure of ports and airports. In Brazil, two important airports and a large port in the Guanabara Bay, region of Rio de Janeiro, handle millions of air movements and tons of cargo annually, making fog forecasts crucial. Therefore, this work aims to present and test an operational decision aid tool for forecasting this phenomenon to be used by meteorologists at the Navy Hydrographic Center (CHM). For this, the Weather Research and Forecast (WRF) model was used in an improved configuration, paying attention to the unique conditions of Guanabara Bay. Considering the preliminary tests in this article, the results suggest that the proposed methodology can be a promising operational tool that can assist and improve low visibility warnings issued by the CHM, always seeking navigation safety.

Keywords: Fog, WRF, Guanabara Bay.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno conhecido como nevoeiro é definido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2024) como a suspensão de gotículas de água muito pequenas no ar, geralmente microscópicas, resultando em redução da visibilidade horizontal inferior a um quilômetro. Se a visibilidade variar entre 1 km e 5 km, o fenômeno é chamado de névoa. A formação e dissipação do nevoeiro de radiação ocorrem após interações complexas entre processos na natureza, geralmente exigindo uma combinação de alta umidade, ventos fracos e pouca nebulosidade. Tal configuração, associada às características locais de cada região, dificulta a previsibilidade do evento para os meteorologistas.

A presença do nevoeiro denso e persistente pode perturbar significativamente a rotina da população, influenciando, principalmente, a navegação aérea e marítima, uma vez que a visibilidade horizontal tende a diminuir de vários quilômetros para alguns metros. Nesse contexto, manobras em navios são, então, realizadas com menos confiabilidade, contando com poucos equipamentos, como apenas os radares de navegação. Além disso, a restrição de visibilidade leva ao fechamento de portos e aeroportos, atrasando voos e acarretando enormes prejuízos para a economia do país.

Todo ano, no Brasil, os aeroportos controlam mais de 1,3 milhão de movimentos aéreos, transportando mais de 100 milhões de pessoas e 1 milhão de toneladas de carga (FAB, 2022). Uma pesquisa da OAG, uma agência internacional de informações de aviação, mostra que o trajeto Rio de Janeiro – São Paulo foi a rota doméstica mais movimentada na América Latina em 2023 (OAG, 2023). Considerando que os aeroportos mais importantes do Rio de Janeiro estão localizados na Baía de Guanabara (Galeão Internacional e Santos Dumont), há uma

grande necessidade de previsões de nevoeiro mais precisas para essa região, uma vez que seus fechamentos resultam em vastos prejuízos econômicos.

Um impacto semelhante é observado no setor marítimo onde, de acordo com as estatísticas da Companhia Docas do Rio de Janeiro (CDRJ), em 2022, o porto do Rio de Janeiro manipulou 8,6 milhões de toneladas de carga (Portos e Navios, 2022). Durante o segundo trimestre de 2023, esse porto foi o quarto mais importante no Brasil para mobilização de contêineres de carga, segundo o Boletim Estatístico Aquaviário, disponibilizado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2023).

O Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) é responsável por prever o tempo em uma extensa área marítima, com aproximadamente dez milhões de quilômetros quadrados, conhecida como Metarea V (NORMAM-701, 2023), que se estende por toda a costa brasileira e inclui o Rio de Janeiro e, consequentemente, a Baía de Guanabara. Essa área é conhecida por, regularmente, experimentar a presença de nevoeiro, perturbando o tráfego aéreo e marítimo e demonstrando, assim, a necessidade do aprimoramento da sua previsão.

A fim de superar os obstáculos no prognóstico de nevoeiros, diversos métodos foram desenvolvidos na tentativa de aprimorar a previsão desse fenômeno (Bari et al., 2023). Ressalta-se que o desenvolvimento e os avanços em modelagem numérica nos últimos anos tornaram possível prever a presença desse evento, em uma área específica, com maior precisão. Segundo, Gultepe et al. (2007), a combinação correta de parametrizações, bem como outros ajustes nos modelos de previsão numérica do tempo, como resolução espacial e vertical, são essenciais para que a previsibilidade seja considerada confiável e mais acurada. Adicionalmente, o tempo de integração de radiação, o *spin-up*

e o aninhamento de grade também devem receber relevância.

Entre os modelos meteorológicos existentes, o WRF destaca-se em inúmeras pesquisas sobre investigação e previsão de nevoeiro. Cardoso et al. (2023), Bartok et al. (2012), Bartoková et al. (2015), Steeneveld et al. (2015) e Nobre et al. (2019) são exemplos de autores que dedicaram suas pesquisas ao tema. Os resultados encontrados por eles demonstram que o WRF é um modelo numérico apropriado para compreender e simular esse tipo de fenômeno. Por esse motivo, foi selecionado para o presente trabalho.

Ressalta-se que o presente estudo tem como base a metodologia central adotada na pesquisa conduzida por Cardoso et al. (2023), na qual foi verificada a habilidade do WRF na previsão de nevoeiros, com três grades aninhadas, em conjunto com ajustes na resolução vertical do modelo, porém para a região Sul do Brasil. Neste contexto, o principal objetivo deste estudo consiste em aplicar tal metodologia para a Baía de Guanabara, realizando algumas modificações adicionais.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Guanabara está localizada no estado do Rio de Janeiro (Figura 1) e é conhecida por ter um grande fluxo marítimo, abrigando o décimo porto mais movimentado do Brasil (ANTAQ, 2023). Além do tráfego marítimo, também contém dois importantes aeroportos, a saber: aeroporto Santos Dumont, localizado na entrada da baía, e o aeroporto internacional Galeão, na parte oeste da baía, os quais estão entre os dez aeroportos mais movimentados do País (AVIAÇÃO BRASIL, 2023).

Ressalta-se que esta área é frequentemente palco de eventos de nevoeiro, sendo este um fenômeno desafiador para os meteorologistas da região. Portanto, uma modelagem atmosférica mais precisa em baixos níveis pode resultar em uma



previsão de nevoeiro mais acurada. Os resultados gerados pelo modelo atmosférico podem ser comparados com dados observados de aeródromos – conhecidos como Relatórios Meteorológicos de Aeródromos (METAR) – localizados na área (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2012).



Figura 1 – Localização do Estado do Rio de Janeiro (área bege no mapa) à esquerda. À direita, o painel superior amplia o estado, e o painel inferior retrata a Baía de Guanabara, localizada na parte sul do estado. Fonte: elaboração própria

3. METODOLOGIA

O presente estudo é baseado em pesquisas realizadas por Cardoso et al. (2023). Sua metodologia foi empregada nesta pesquisa e ajustada a fim de prever nevoeiros na região da Baía de Guanabara, visto que os meteorologistas do CHM, frequentemente, discutem sobre a dificuldade em prognosticar tais fenômenos. Diante desse problema, o propósito consistiu em modificar a configuração operacional do modelo WRF (MMM, 2019), o qual tem 10 km de resolução horizontal, 50 níveis verticais e parametrizações específicas para essa baixa definição de grade. Já na metodologia de previsão de nevoeiros proposta por Cardoso et al (2023), foram inseridas três grades aninhadas, mantendo os 50

níveis verticais e inserindo parametrizações que descrevem de forma adequada uma grade de resolução superior.

Ressalta-se que a Divisão de Previsão Numérica possui dois modelos atmosféricos operacionais (ICONLAM e WRF) e ambos necessitam de desenvolvimento e pesquisa para o aprimoramento e aperfeiçoamento da previsão do tempo. No presente estudo, o WRF foi proposto a fim de replicar, tanto quanto possível, o estudo desenvolvido por Cardoso et al (2023).

3.1. Modelagem Numérica

O modelo atmosférico WRF possui resolução horizontal de 10 km para toda a área marítima ao largo da costa do Brasil.

A fim de implementar a metodologia utilizada por Cardoso et al. (2023), foram criados três domínios aninhados ao redor da Baía de Guanabara, com resoluções horizontais de 9 km, 3 km e 1 km, respectivamente, com o menor domínio centrado na mesma. Apenas a grade de 9 km foi deslocada do centro do aninhamento, com a finalidade de abranger o deslocamento de sistemas da escala sinótica que atingem a região. O aninhamento das grades faz-se necessário para que as informações possam fluir do domínio maior para o menor com o mínimo de distorção possível. A Figura 2 apresenta cada um desses domínios ao redor do Rio de Janeiro e da Baía de Guanabara.

Cardoso et al. (2023) concluíram em seu experimento, para uma previsão de nevoeiro mais precisa, o número mínimo de 50 níveis verticais, com a altitude do primeiro

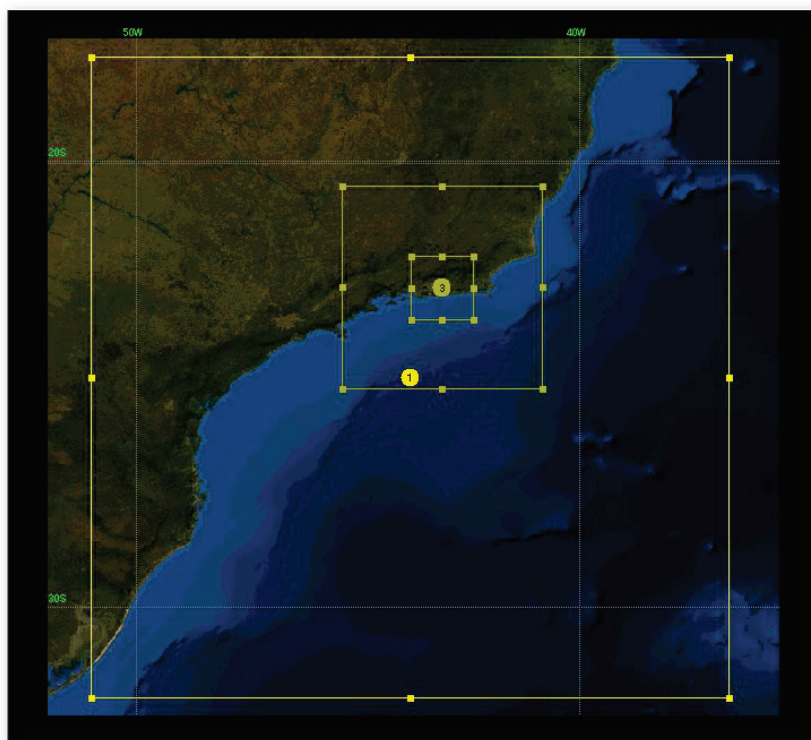


Figura 2 – Representação dos domínios aninhados utilizados nas simulações do WRF. Os pontos amarelos representam os centros dos domínios. Fonte: elaboração própria

nível configurada em 10 metros. Desta forma, o WRF foi ajustado para tais condições. No estudo de referência (Região de Rio Grande – RS) foi escolhida a projeção "*Lambert Conformal Conic*", a qual é adequada para áreas situadas em latitudes mais altas. No entanto, para a região do Rio de Janeiro, a projeção "*Lat-Lon*" encaixa-se melhor e funciona corretamente, além de já ser utilizada na simulação operacional. As condições iniciais e de contorno foram obtidas das análises do Global Forecast System (GFS) do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), com uma resolução horizontal de $0,25^\circ$ (aproximadamente 28 km).

Várias simulações de aninhamento foram realizadas na presente pesquisa, relacionadas à interação entre domínios, sendo definida, neste trabalho, a interação conhecida como two-way nesting (quando há troca de fluxos em ambos os sentidos entre as grades), divergindo da metodologia

apresentada por Cardoso et al. (2023), em que foi utilizado apenas a interação one-way. Adicionalmente, o modelo operacional WRF, no CHM, utiliza um tempo de integração radiativa (RADT) de 30 minutos. O RADT é o intervalo de tempo de integração que o modelo utiliza para atualizar os cálculos da parametrização de radiação em cada ponto de grade. Quanto menor o intervalo de atualização, mais acurados são os fluxos radiativos considerados, porém esta é a parametrização do modelo com o maior custo computacional.

De acordo com Cardoso et al (2023), a execução da rotina associada ao tratamento de radiação é extremamente importante para a gênese de nevoeiros. Assim, o parâmetro que define o intervalo de tempo para a execução dos cálculos de radiação foi alterado em cada domínio para 9 min, 3 min e 1 min, respectivamente. O custo dessa melhoria foi o aumento esperado no tempo de processamento da simulação, sendo ainda considerado exequível em um ambiente operacional.

A fim de equilibrar os prognósticos do modelo às condições iniciais e de contorno, é necessário um tempo preliminar de execução do modelo (BASSO; MACEDO; YAMASAKI, 2014). Esse período inicial de ajuste, chamado de spin-up, é usado para balancear as variáveis do modelo. Dessa forma, algumas simulações foram realizadas com e sem spin-up, com o propósito de verificar sua importância na modelagem



numérica do fenômeno meteorológico objeto deste trabalho. A comparação entre os parâmetros apresentados na bibliografia utilizada como base e no presente estudo são demonstradas na Tabela I.

Dessa forma, para cada instante de tempo dos dias estudados (03AGO2023 09Z, 03AGO2023 10Z, 03AGO2023 12Z e 04AGO2023 12Z) foram realizados três testes, conforme apresentado na Tabela II.

Tabela I - Comparação entre os parâmetros utilizados no modelo WRF operado no CHM, os de Cardoso et al (2023) e os do presente estudo

Parâmetros utilizados no WRF Operacional do CHM	Parâmetros utilizados por Cardoso et al (2023)	Parâmetros utilizados no presente estudo
50 níveis verticais, todos com a mesma altitude	50 níveis verticais e 10 m de altitude no primeiro nível	50 níveis verticais e 10 m de altitude no primeiro nível
Projeção Lat-Lon	Projeção Lambert Conformal Conic	Projeção Lat-Lon
1 única grade de 10 km	3 grades aninhadas de 9 km, 3 km e 1 km	3 grades aninhadas de 9 km, 3 km e 1 km
Não há grades aninhadas	Aninhamento one-way entre as grades	Aninhamento two-way entre as grades
Tempo de integração radiativa (RADT) de 30 minutos	Tempo de integração radiativa (RADT) de 9,3 e 1 minuto de acordo com os domínios da grade	Tempo de integração radiativa (RADT) de 9,3 e 1 minuto de acordo com os domínios da grade
Condições iniciais e de contorno advindas do GFS com resolução horizontal de 0,25°	Condições iniciais e de contorno advindas do GFS com resolução horizontal de 0,25°	Condições iniciais e de contorno advindas do GFS com resolução horizontal de 0,25°

Tabela II - Configurações utilizadas para as simulações realizadas em cada dia de estudo

Configuração A	Configuração B	Configuração C
Aninhamento two-way	Aninhamento two-way	Aninhamento two-way
Sem spin-up (NSO)	Com spin-up (WSO)	Com spin-up (WSO)
Tempo de integração (RADT) de 30 minutos	Tempo de integração (RADT) de 9, 3 e 1 minuto para as grades de 9, 3 e 1 km, respectivamente	Tempo de integração (RADT) de 9, 3 e 1 minuto para as grades de 9, 3 e 1 km, respectivamente
Cálculo do FSL	Cálculo do FSL	Cálculo do FSL

3.2 Estimativa de Nevoeiro

A ocorrência de nevoeiro é principalmente medida pela visibilidade horizontal. Alguns métodos empíricos são utilizados na tentativa de estimar tal parâmetro e, conseqüentemente, indicar a presença desse fenômeno. Cardoso et al. (2023) testaram três métodos empíricos para reproduzir eventos de nevoeiro: o primeiro método é o de Kunkel (KUNKEL, 1984), o segundo proveniente do Forecast Systems Laboratory (FSL) (DORAN et al., 1999) e o terceiro, conhecido como Índice de Estabilidade de Nevoeiro (FSI) (FREEMAN E PERKINS, 1998). Cardoso et al. (2023) concluíram que o parâmetro FSI mostrou sensibilidade à ocorrência de nevoeiro, embora suas estatísticas resultassem em números elevados de falsos alarmes. No caso do índice de Kunkel, Cardoso et al. (2023) observaram que o parâmetro às vezes apresenta falhas em seus resultados, devido à sua dependência do cálculo

do conteúdo de água líquida (LWC), que pode ter valores muito próximos de zero. Uma vez que o LWC está no denominador da equação usada no índice de Kunkel, a visibilidade (km) tende ao infinito, tornando este índice ineficiente para o produto desejado. Também, na presente pesquisa, este índice apresentou descontinuidades nos resultados, sugerindo que pode não ser uma ferramenta operacional ideal para os meteorologistas do CHM. Finalmente, Cardoso et al. (2023) concluíram que o FSL apresentou o melhor desempenho na previsão de nevoeiro em sua área de estudo, assim como poucos sinais de alarme falso. Portanto, neste artigo foram utilizados apenas os índices FSL (Eq. [1]) e FSI (Eq. [2]) na investigação proposta.

O método de visibilidade FSL estima a visibilidade horizontal em milhas por meio da seguinte equação:

$$FSL = 6000 \left(\frac{T - T_d}{RH} \right)^{1.75}$$



onde T e T_d são as temperaturas do ar e do ponto de orvalho em $^{\circ}\text{C}$, respectivamente, e RH é a umidade relativa em %. O resultado final do FSL foi transformado para metros, em que valores abaixo de 1000 metros correspondem ao fenômeno de nevoeiro.

Já o índice FSI é calculado da seguinte forma:

$$FSI = 2(T_{sfc} - T_{850}) + 2(T_{sfc} - T_{dsfc}) + U_{850}$$

onde T_{sfc} e T_{dsfc} são as temperaturas do ar e do ponto de orvalho próximas à superfície em $^{\circ}\text{C}$, T_{850} é a temperatura do ar a 850 hPa em $^{\circ}\text{C}$, e U_{850} é a velocidade do vento a 850 hPa em nós. Como resultado, valores do FSI abaixo de 31 indicam uma alta probabilidade de nevoeiro de radiação. Valores entre 31 e 55 indicam uma probabilidade moderada, e valores acima de 55 indicam uma baixa probabilidade de ocorrência de nevoeiro.

3.3 Estudo de Casos

Para investigar o desempenho do modelo WRF na previsão de casos de nevoeiro, foram selecionados dois dias em agosto de 2023. No primeiro caso, em 03AGO2023, foi relatada a presença de nevoeiro sobre a Baía de Guanabara, e no segundo, em 04AGO2023, a ausência de nevoeiro. Relatórios METAR de ambos os aeródromos localizados no Rio de Janeiro, Galeão (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ),

foram coletados para verificação e comparação com os resultados do modelo, possibilitando, assim, avaliar a confiabilidade das simulações. Ambos os aeródromos estão no lado oeste da Baía, sendo o primeiro (SBGL) na parte mais interna e o último (SBRJ) em sua entrada.

4. RESULTADOS

Os primeiros testes foram realizados no dia 3 de agosto de 2023, quando o nevoeiro foi relatado nas observações meteorológicas realizadas entre 0900Z e 1000Z no aeródromo SBGL e nas observações entre 1000Z e 1200Z no aeródromo SBRJ, conforme dados das mensagens METAR apresentadas nas Tabelas III e IV. Note que nos relatórios METAR a informação de ocorrência de nevoeiro é codificada como "FG" e está em destaque nas tabelas.

O primeiro experimento foi realizado com o objetivo de comparar o desempenho de cada resolução de grade na detecção de nevoeiro por meio do método FSL. Na figura 3, o índice foi representado em metros para as respectivas resoluções de grade aplicadas neste estudo: 9 km, 3 km e 1 km. Observa-se o impacto da resolução espacial nos resultados, de modo que a grade de 1 km detecta o nevoeiro e o representa de forma bem mais detalhada que as demais. Devido a esse primeiro resultado, todas as simulações e testes neste artigo são apresentadas com o aninhamento de 1 km, com o objetivo de buscar uma representação mais refinada do fenômeno estudado.



Tabela III - Dado da observação meteorológica de superfície do aeródromo SBGL para o dia 03AGO2023. As observações são codificadas como METAR nas horas cheias ou SPECI nos intervalos inferiores a uma hora. Fonte: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET)

Aeródromo	METAR
SBGL	METAR SBGL 030900Z VRB02KT 0050 R10/0350N R28/0350N R33/0350N R15/0400N FG VV010 17/17 Q1017=
SBGL	SPECI SBGL 030918Z 04003KT 360V060 0050 R28/0250N R15/0250N R33/0275N R10/0325N FG VV010 17/17 Q1017=
SBGL	METAR SBGL 031000Z 01002KT 0800 R33/0200U R28/0650U R15/1400U R10/1900U FG VV003 17/16 Q1018=

Tabela IV – Dado da observação meteorológica de superfície do aeródromo SBRJ para o dia 03AGO2023. As observações são codificadas como METAR nas horas cheias ou SPECI nos intervalos inferiores a uma hora. Fonte: Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET)

Aeródromo	METAR
SBRJ	SPECI SBRJ 030935Z 33007KT 300V010 1600 BR SCT002 BKN006 19/18 Q1017=
SBRJ	METAR SBRJ 031000Z 36007KT 0600 FG BKN001 OVC004 19/18 Q1017=
SBRJ	METAR SBRJ 031100Z 35007KT 0300 FG OVC002 19/19 Q1018=
SBRJ	METAR SBRJ 031200Z 36007KT 310V010 0800 FG BKN002 19/19 Q1018=

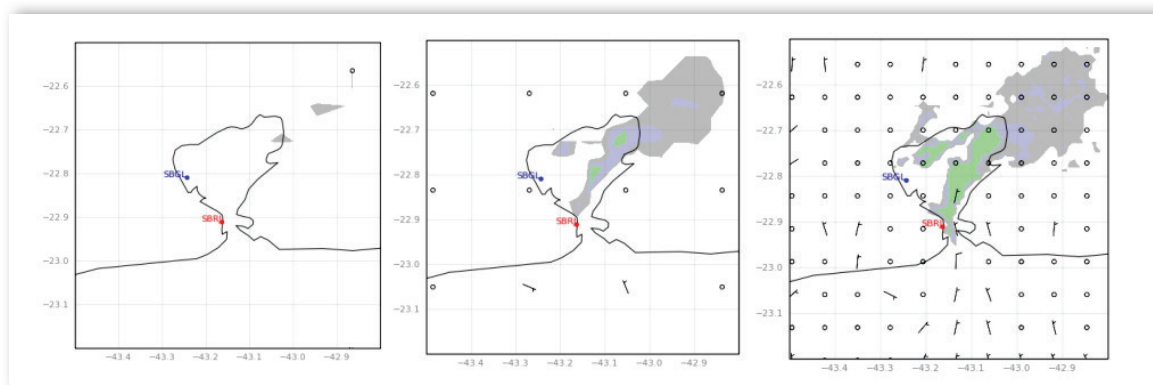


Figura 3 – Representação do índice FSL para o dia 03AGO2023 com diferentes resoluções espaciais. Da esquerda para a direita são apresentadas as resoluções de grade aninhada de 9 km, 3 km e 1 km. As áreas sombreadas representam visibilidade horizontal inferior a 1000 metros. Fonte: elaboração própria

O experimento seguinte utilizou modificações no tempo de integração de radiação (RADT). A configuração do modelo WRF para a previsão operacional no CHM considera o passo de tempo de 30 minutos para a atualização da parametrização de radiação, porém, neste estudo, foram utilizados passos de tempo de 9 min, 3 min e 1 min para as grades de 9 km, 3 km e 1 km, respectivamente. Além disso, a simulação foi executada com a opção *two way nesting* – quando há troca de fluxos em ambos os sentidos entre as grades. Outro ponto considerado foi a presença (WSO) ou ausência (NSO) de *spin-up* do modelo. A Figura 4 evidencia o índice FSL, onde observa-se que quando o modelo é configurado com *spin-up* (WSO), interação "two-way" e RADT menor, o resultado amplifica a detecção do nevoeiro, expandindo o fenômeno mais ao sul. Essa previsão parece refletir melhor as condições observadas,

visto que, às 09Z, o Galeão já reportava o nevoeiro e o Santos Dumont, às 0935Z, já começava a reportar névoa úmida (código BR na mensagem SPECI), conforme dados das Tabelas III e IV. Contudo, a simulação sem *spin-up* (NSO) não indica restrição de visibilidade na área dos aeroportos.

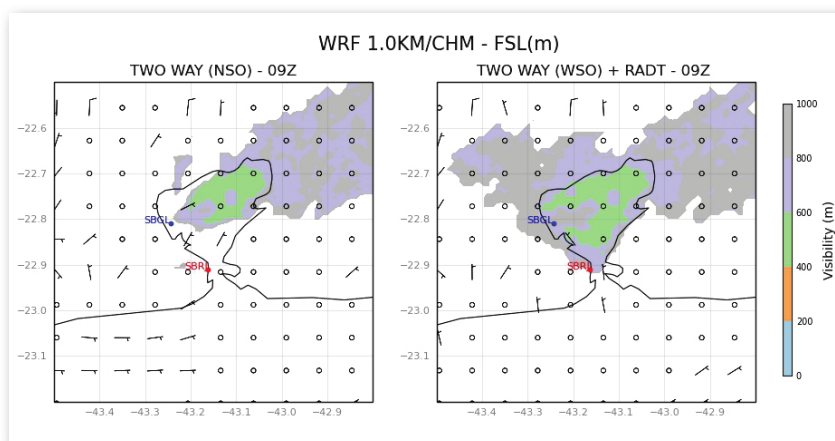


Figura 4 – Índice FSL(m) entre simulações no modo "two-way". À esquerda, simulação realizada com a configuração A (Tabela II) e à direita com a configuração B (Tabela II) para o dia 03AGO às 09Z. Ambas as figuras são da grade aninhada de 1 km. Fonte: elaboração própria

Um terceiro experimento foi realizado para o dia 03AGO23, porém utilizando-se o índice FSI. O resultado deste experimento para o mesmo horário do experimento anterior é apresentado na Figura 5. Nesta, o índice FSI identifica alta

probabilidade de ocorrência de nevoeiro em ambos os aeroportos. Valores do índice inferiores a 31 aparecem em quase toda a área da Baía de Guanabara.

Evoluindo no tempo, às 1000Z, ambos os aeroportos relataram a presença de nevoeiros. Uma nova comparação, utilizando-se o método FSL, entre o modo "two-way" sem *spin-up* e o modo "two-way" com modificações na radiação (RADT) gera diferenças significativas (Figura 6). O modelo prevê nevoeiro no aeródromo SBGL em ambos os casos. No entanto, no SBRJ, apenas uma detecção sutil é observada no modo sem *spin-up* (painel à esquerda), enquanto na simulação com modificações na radiação (painel à direita), o nevoeiro foi completamente previsto, estendendo-se também até a entrada da Baía de Guanabara. Observa-se que SBRJ relatou 600 metros de visibilidade horizontal (Tabela IV), tendo sido previsto pelo modelo corretamente.

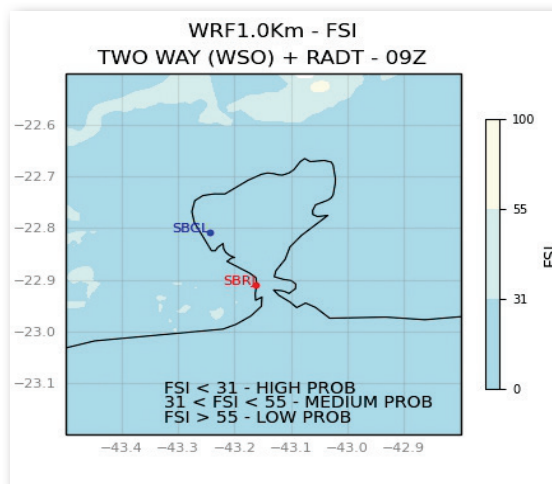


Figura 5 – Índice FSI com simulação no modo two-way. Simulação realizada com a configuração C (Tabela II) para o dia 03AGO23 às 09Z na grade aninhada de 1 km. Valores de FSI inferiores a 31 (tom mais escuro de azul) indicam alta probabilidade de restrição de visibilidade inferior a 1 km. Fonte: elaboração própria

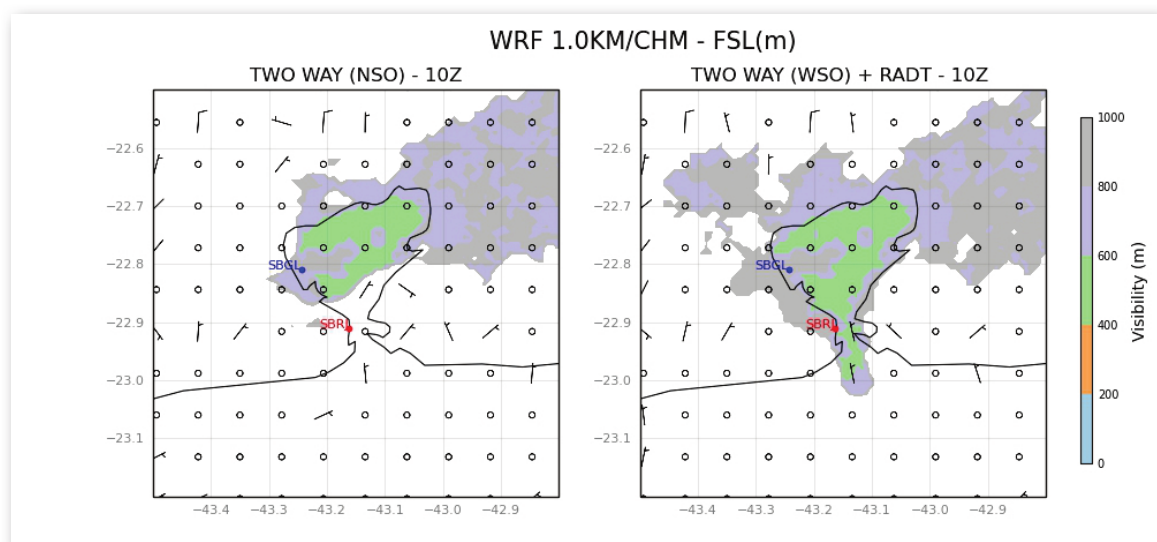


Figura 6 – Índice FSL (m) entre simulações no modo "two-way". À esquerda, simulação realizada com a configuração A (Tabela II) e, à direita, com a configuração B (Tabela II) para o dia 03AGO2023 às 10Z. Ambas as figuras são da grade aninhada de 1 km. Fonte: elaboração própria



Mais uma vez, o índice FSI foi calculado com a melhor configuração definida ("two-way" WSO e RADT), prevenindo corretamente a presença do fenômeno na região (Figura 7).

Uma última avaliação para o dia 03AGO2023 foi realizada utilizando-se o horário de 12Z. Neste horário, o SBGL não relatou ocorrência de nevoeiro, pois seu último METAR reportando o evento foi às 10Z. Enquanto que no SBRJ o fenômeno persistiu até 12Z.

Na figura 8, são apresentadas, novamente, simulações do índice FSL, com aninhamento *two-way*, para a grade de maior resolução espacial (1 km). Comparando os resultados entre *two-way*, sem *spin-up* e com RADT padrão (à esquerda) e "two-way" com *spin-up* e RADT com alterações (à direita), observa-se a correta ausência de nevoeiro no SBGL e a presença sutil do evento no SBRJ, em ambos os casos. A simulação com RADT alterada, no entan-

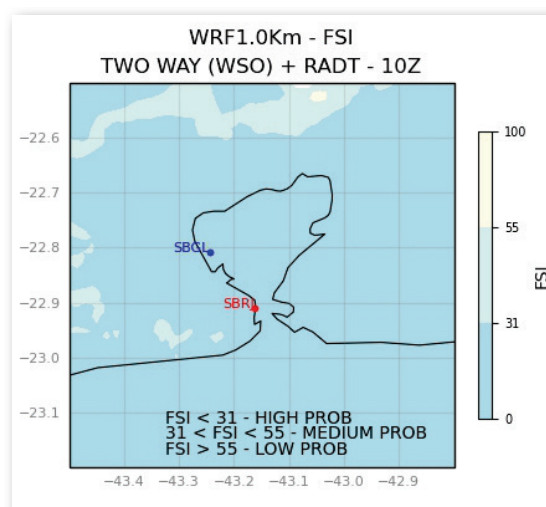


Figura 7 – Índice FSI com simulação no modo *two-way*. Simulação realizada com a configuração C (Tabela II) para o dia 03AGO23 às 10Z na grade aninhada de 1 km. Valores de FSI inferiores a 31 (tom mais escuro de azul) indicam alta probabilidade de restrição de visibilidade inferior a 1 km. Fonte: elaboração própria

to, mostra o processo de dissipação de forma mais avançada no nordeste da Baía e sutilmente no seu interior, em comparação com o outro caso simulado.

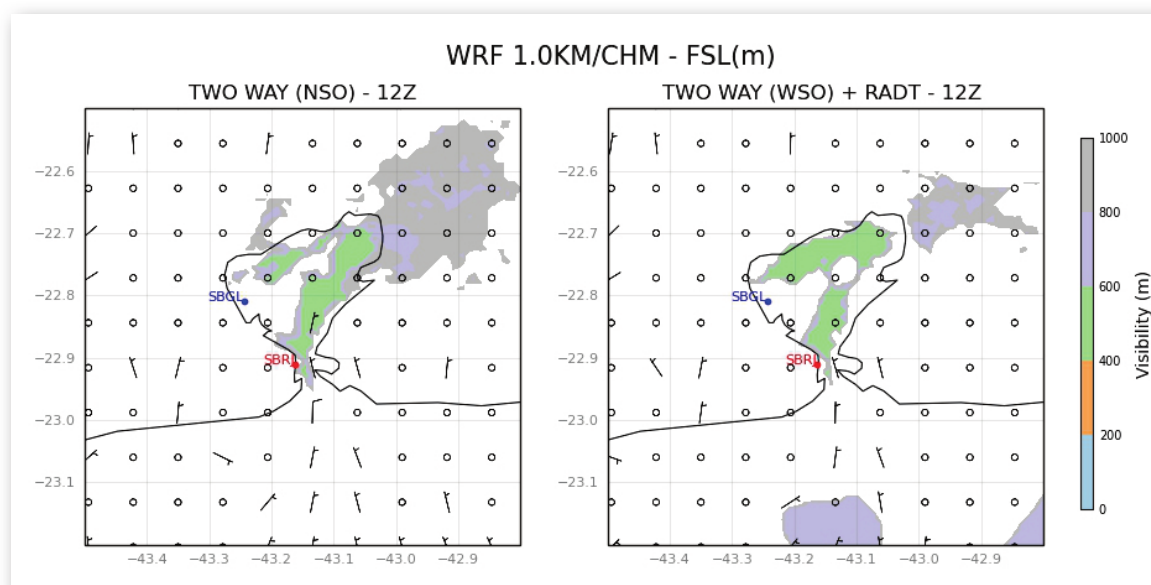


Figura 8 – Índice FSL (m) entre simulações no modo "two-way". À esquerda, simulação realizada com a configuração A (Tabela II) e, à direita, com a configuração B (Tabela II) para o dia 03AGO2023 às 12Z. Ambas as figuras são da grade aninhada de 1 km. Fonte: elaboração própria

Complementando as simulações para 12Z do dia 03AGO23, também foi calculado o índice FSI, que indicou incorretamente a presença de nevoeiro no SBGL (FSI

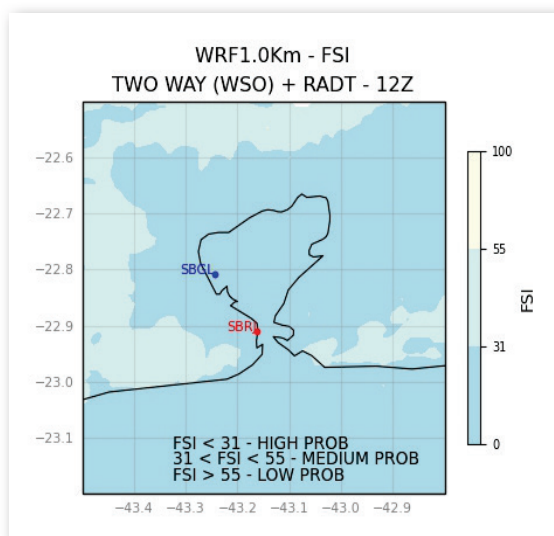


Figura 9 – Índice FSI com simulação no modo two-way. Simulação realizada com a configuração C (Tabela II) para o dia 03AGO23 às 12Z na grade aninhada de 1 km. Valores de FSI inferiores a 31 (tom mais escuro de azul) indicam alta probabilidade de restrição de visibilidade inferior a 1 km. Fonte: elaboração própria

< 31), demonstrando assim uma situação de alarme falso (Figura 9).

Já que o índice FSI apresentou um alarme falso durante a dissipação do nevoeiro no Aeroporto do Galeão no dia 03AGO23, às 12Z, um dia sem nevoeiro foi selecionado (04AGO23) a fim de realizar mais simulações e experimentos.

O experimento com o índice FSL para o dia sem nevoeiro foi realizado com interação *two-way*, com *spin-up* e com RADT alterado (9 min, 3 min e 1 min para cada grade). A configuração foi definida considerando os melhores resultados de FSL para a previsão do nevoeiro. A Figura 10 apresenta valores de FSL superiores a 1000 m, ou seja, o modelo representou corretamente a ausência de nevoeiro,

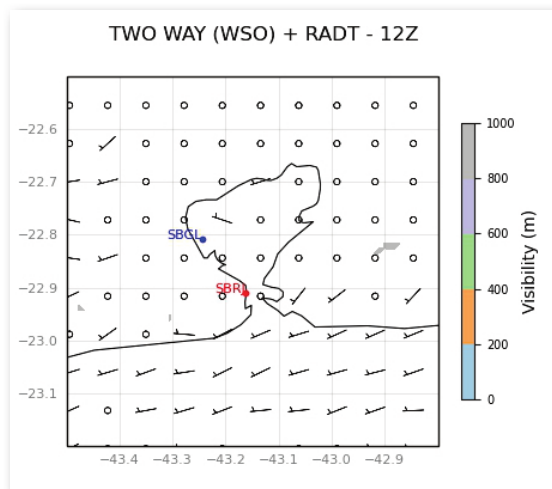


Figura 10 – Índice FSL (m). Simulação realizada com a configuração B (Tabela II) para o dia 04AGO23 às 12Z na grade aninhada de 1 km. Fonte: elaboração própria

sem alarmes falsos para este índice, nesta data, às 12Z.

O índice FSI também foi calculado para o dia 04AGO23, às 12Z. Contudo, neste caso, ele apresentou valores inferiores a 31 (Figura 11), representando novamente um alarme falso, já que neste dia não foi registrado ocorrência de nevoeiro de acordo com as observações meteorológicas dos aeródromos.

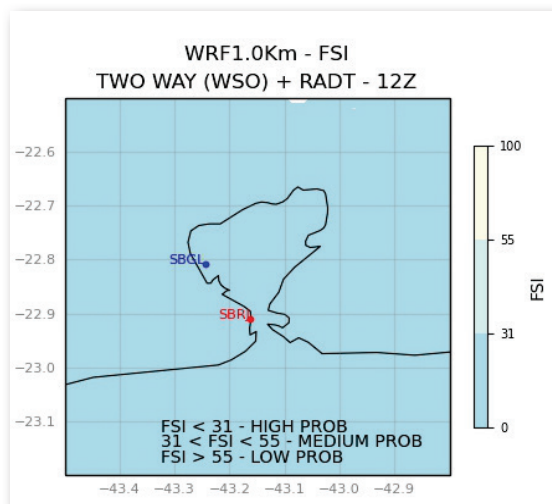


Figura 11 – Índice FSI. Simulação realizada com a configuração C (Tabela II) para o dia 04AGO23 às 12Z na grade aninhada de 1 km. Valores de FSI inferiores a 31 (tom mais escuro de azul) indicam alta probabilidade de restrição de visibilidade inferior a 1 km. Fonte: elaboração própria



5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram realizados experimentos numéricos com dois índices para detecção de nevoeiros na Baía da Guanabara. Os índices selecionados foram usados por Cardoso et al. (2023) no sul do Brasil e apresentaram bom desempenho.

Foi verificado que o uso de alta resolução espacial representa fator essencial para uma previsão bem-sucedida de nevoeiro. Conforme apresentado aqui, a utilização de uma grade aninhada à grade operacional do modelo WRF do CHM, com 1 km de resolução, ofereceu as melhores previsões de nevoeiro em relação às grades aninhadas com 9 km e 3 km de espaçamento horizontal. Além da alta resolução horizontal, foram usados os seguintes recursos numéricos: modo *two-way nesting*, *spin-up* de pelo menos 24 horas e menor passo de tempo para a parametrização de radiação. Notou-se que sem o *spin-up* (configuração A, na Tabela II), o nevoeiro aparece nas proximidades – com ênfase na parte nordeste –, sem atingir exatamente as áreas dos aeroportos. Ou seja, o modelo não conseguiu detectar a presença do nevoeiro no oeste e entrada da Baía. Portanto, a combinação da alta resolução com os recursos numéricos citados (configuração B) provou ser ideal para gerar melhores resultados nos casos estudados.

Os parâmetros de estimativa de visibilidade foram calculados usando os campos de temperatura, umidade e vento prognosticados pelo modelo WRF para dois dias de agosto de 2023 e em horários variados. Um dia com registro de nevoeiro nos aeroportos do Galeão e Santos Dumont e outro sem restrição de visibilidade nos mesmos aeroportos. Tanto o índice FSI quanto o parâmetro FSL indicaram corretamente a presença de nevoeiro. Mas o primeiro indicou falsos alarmes no horário em que as observações já não registravam restrição de visibilidade e no dia sem registro de nevoeiro, corroborando com os resultados de Cardoso et al. (2023).

Os experimentos realizados indicaram resultados promissores para a previsão de nevoeiro com uso de métodos objetivos a partir dos dados do modelo WRF. Considerando os testes preliminares realizados neste estudo, a resposta sugere que o conjunto de configurações implementadas pode ser uma ferramenta operacional importante para auxiliar a previsão de nevoeiros na Baía da Guanabara. Nesse contexto, ampliar os testes para um número maior de eventos contribui para avaliar o potencial de aplicação operacional desta metodologia no Centro de Hidrografia da Marinha, auxiliando na segurança da navegação na área.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ. Boletim Estatístico Aquaviário 2º Trimestre 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/antag/pt-br/central-de-conteudos/estudos-e-pesquisas-da-antag-1/BoletimEstatstico2T-2023vfinal.pdf>>. Acesso em: 13 Fev. 2024.

AVIAÇÃO BRASIL. Ranking de Aeroportos Brasileiros – Passageiros Embarcados. Disponível em: <<https://aviacao brasil.com.br/ranking-de-aeroportos-brasileiros-passageiros/>>. Acesso em: 2 Abr. 2024.

BARI, D.; BERGOT, T.; TARDIF, R. Fog Decision Support Systems: A Review of the Current Perspectives. *Atmosphere*, v. 14, n. 8, p. 1314, 2023.

BARTOK J., BOTT A., GERA M. Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012.

BARTOKOVÁ I., BOTT A., BARTOK J., GERA M. Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region: Improvement of nowcasting skills by the machine-learning approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015.

BASSO, J. L. M.; MACEDO, L. R.; YAMASAKI, Y. Avaliação da extensão dos horizontes de integração temporal do WRF nos prognósticos de vento. *Ciência e Natura*, v.36, Ed. Especial II, p. 491-496, 2014.

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

COMANDO DA AERONÁUTICA. Códigos Meteorológico METAR e SPECI. Disponível em: <<http://dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/aca-0522/referencias/manual%20METAR.pdf>>. Acesso em: 2 Abr. 2024.

DHN – DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima – NORMAM-701, 2023. Niterói, 2023. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dhn/normam/normam-701.html>>. Acesso em: 13 Fev. 2024.

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.

FAB – FORÇA AÉREA BRASILEIRA. Entenda como é o trabalho do Controlador de Tráfego Aéreo. Disponível em: <<https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/39904/DATA%20COMEMORATIVA%20-%20Entenda%20como%20C3%A9%20o%20trabalho%20do%20Controlador%20d%20Tr%20C3%A1fego%20A%20C3%A9reo>> . Acesso em: 04 Fev. 2023.



FREEMAN, L.E., PERKINS, J.S. Meteorological techniques. Air Force Weather Agency. Technical. 1998. Disponível em: <<http://www.novalynx.com/manuals/tn98002.pdf>>. Acesso em: 13 Fev. 2024.

GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES SC, CERMAK J, BOTT A, BENDIX J, MÜLLER MD, PAGOWSKI M, HANSEN B, ELLROD G, JACOBS W, TOTH G, COBER SG. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. Pure and Applied Geophysics. 2007.

KUNKEL B.A. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 1984. 23:34-41. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0034:PODTVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0034:PODTVA>2.0.CO;2)

MMM - MESOSCALE & MICROSCALE METEOROLOGY LABORATORY. WRF Users Page, 2019. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 4.1. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_v4/v4.1/contents.html>. Acesso em: 02 Abr. 2024.

NOBRE J.P.G., FEDOROVA N., LEVIT V., DOSSANTOS A.S., LYRA M.J.A. Nova metodologia para previsão de eventos de nevoeiro para o Aeroporto Zumbi dos Palmares em Maceió (Alagoas). 2019. Anuário do Instituto de Geociências 42: 527-535. https://doi.org/10.11137/2019_3_527_535

OAG. The busiest flight routes in 2023. Disponível em: <<https://www.oag.com/busiest-routes-world-2023>>. Acesso: 13 Fev. 2024.

OMM – ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. Fog compared with mist. Disponível em: <<https://cloudatlas.wmo.int/en/fog-compared-with-mist.html>>. Acesso em: 09 Fev. 2024.

PORTOS E NAVIOS. Porto do Rio de Janeiro movimentou 8,6 milhões de toneladas de carga até outubro. Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/porto-do-rio-de-janeiro-movimentou-8-6-milhoes-de-toneladas-de-cargas-ate-outubro>>. Acesso em: 13 Fev. 2024.

STEENEVELD G.J., RONDA R.J., HOLTSLAG A.A.M. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. Boundary-Layer Meteorology. 2015.