



Inserção de Dados de SODAR no WRF Usando Análise Objetiva de Cressman Insertion of SODAR Data into WRF Using Cressman Objective Analysis

Luiz Felipe Neris Cardoso; Wallace Figueiredo Menezes & Ricardo Marcelo Silva

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza,
Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia - Avenida Athos da Silveira Ramos, 274
Bloco G – Cidade Universitária – 21941-916 - Rio de Janeiro – RJ, Brasil
E-mails: felipenc2@gmail.com; wallace.menezes@ufrj.br; rmsilva@inea.rj.gov.br*

Recebido em: 15/01/2019 Aprovado em: 30/05/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_274_281

Resumo

O controle do tráfego aéreo é uma atividade de alta relevância para a sociedade, que sofre influência direta das condições meteorológicas, e tem recebido grande atenção nos últimos tempos em razão dos eventos de nível internacional sediados no Brasil, como a Copa do Mundo de 2014 e as Olimpíadas 2016. Por outro lado, a inserção de dados em modelos numéricos de previsão do tempo (MNPT) tem se mostrado uma ferramenta que promove melhorias nas simulações com estes tipos de modelos determinísticos, por possibilitarem o uso de condições iniciais mais próximas da realidade. Há cerca de dois anos, a equipe do Laboratório de Meteorologia Aplicada (LMA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) junto à Organização Brasileira para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Controle do Espaço Aéreo (CTCEA) vem realizando estudos e experimentos com dois equipamentos SODAR (Sonic Detection and Ranging) instalados no Aeroporto de Guarulhos (SBGR). Tais instrumentos possibilitam, dentre outras, estimativas da direção e da intensidade do vento nos primeiros níveis da atmosfera com alta frequência temporal (15 minutos). Neste sentido, há cerca de 1 ano, esta parceria iniciou uma linha de pesquisa que teve como objetivo analisar os impactos causados pela utilização de dados de SODAR em simulações com o modelo WRF. Tendo isso em vista, o presente trabalho visou avaliar o impacto da inserção dos dados dos dois equipamentos de SODAR na simulação de um caso de tesoura de vento (wind shear) ocorrido nas proximidades do aeródromo no dia 12 de junho de 2013. Foi realizado um experimento com a inserção dos dados e um segundo sem a inserção dos dados de SODAR. Em seguida, para verificar se a inserção incorporou melhorias significativas na simulação, os campos do perfil vertical do vento horizontal da simulação com a inserção foram comparados com os do experimento sem a inserção. Os resultados mostraram que, de maneira geral, a inserção dos dados de SODAR na simulação possibilitou uma melhor representação das condições iniciais. Como trabalhos futuros, sugere-se que esta metodologia seja repetida para outros casos de tesoura de vento com o intuito de se gerar uma mais ampla base estatística, a fim de viabilizar uma análise mais consistente deste tipo de fenômeno, que permita estabelecer conclusões mais bem subsidiadas pelos resultados.

Palavras-chave: alteração de condições iniciais; WRF; tesoura de vento; SODAR; aeronáutica

Abstract

The air traffic control is an activity of high relevance to society, which is directly influenced by weather conditions, and has received great attention recently due to all the international events held in Brazil. On the other hand, the data insertion in numerical weather prediction (NWP) models has proved to be a valuable tool to improve simulations in such deterministic models, as it allows the use of more realistic initial conditions. For two years, the staff of the Laboratory of Applied Meteorology (LAM) of the Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ) in conjunction with the Brazilian Organization for Scientific and Technological Development of Airspace Control (CTCEA), has been conducting studies and experiments with two SODAR (Sonic Detection and Ranging) devices installed at Guarulhos Airport (SBGR). Such devices provide, among others, estimates of the direction and intensity of the wind in the first levels atmosphere with high temporal frequency (15 minutes). As a further consequence, for about 1 year, this partnership began a research aiming to analyze the impacts caused by the insertion of SODAR data in simulations with the WRF model. To access such goal, this paper aimed to evaluate the impact of the insertion of SODAR data in a simulation of a wind shear event occurred near the airfield on June 12th of 2013. Two experiments have been conducted: one with the insertion of the SODARs data and a second one without it. After that, the vertical profile of the horizontal wind from both experiments were compared in order to determine whether the insertion incorporated significant improvements to the simulation. The results showed that, in general, SODARs data insertion in the simulation provided a better representation of the observed phenomenon. As future works, it is suggested to apply this methodology for a broader number of wind shear situations, aiming to get a statistical basis and to provide a more consistent analysis of this type of phenomenon, allowing the conclusions to be better subsidized by the results.

Keywords: changing initial conditions; WRF; wind shear; SODAR; aeronautic



1 Introdução

O tráfego aéreo é uma atividade de alta relevância para a sociedade, que sofre influência direta das condições meteorológicas e tem recebido grande atenção nos últimos tempos em razão dos eventos de nível internacional sediados no Brasil. Neste contexto, o fenômeno conhecido como “tesoura de vento” (“wind shear”), variação local do vetor vento ou de qualquer uma de suas componentes numa dada direção, apresenta-se como um dos mais nocivos ao transporte aéreo.

Diante disto, a modelagem numérica vem se apresentando como uma ferramenta indispensável no planejamento da gestão dentro de um aeródromo. O modelo regional Weather Research and Forecasting (WRF) tem sido largamente utilizado, tanto na comunidade científica/acadêmica, quanto na área operacional. Diversos estudos com este modelo, sobre o território nacional e internacional, apresentam resultados promissores, inclusive na previsão de wind shear próximo a aeroportos (eg.: Härter et al., 2008; Chen et al., 2009; Padilha, 2011; Feroni et al., 2013; Da Silva & Fisch, 2014).

Em razão da previsão numérica do tempo ser um problema de condições iniciais (Kalnay, 2003) – ou seja, altamente influenciada pelas mesmas – faz-se indispensável, que estas condições sejam tão próximas da realidade quanto possíveis, a fim de se garantir uma previsão mais realística. Neste sentido, diversos métodos de análise objetiva foram desenvolvidos com o intuito de gerar condições iniciais que se aproximem ao máximo da atmosfera observada, utilizando as observações disponíveis nas condições iniciais dos modelos numéricos.

Uma nova forma de observação meteorológica do vento recentemente difundida são os SODAR (Sonic Detection and Ranging). Tais instrumentos possibilitam, dentre outras, estimativas da direção e da intensidade do vento nos primeiros níveis da atmosfera com alta frequência temporal (ex.: 15 min). Muitos estudos têm se utilizado destes instrumentos, sobretudo para avaliar a estrutura da atmosfera dentro da camada limite planetária (ex.: Beyrich, 1994, 1997; Argentini et al., 2012). Apesar da sua validade, não foi notado que tais dados tenham sido empregados

em nenhum método de alteração de condições iniciais, tampouco em assimilação de dados.

Existem diversos métodos de assimilação, desde os mais complexos, como os variacionais (3D-Var e 4D-Var), até os mais básicos/simples como os empíricos. Dentre os métodos mais básicos, encontra-se o esquema de correções sucessivas de Cressman (1959), um método de análise objetiva que tem sido utilizado em diversos estudos para a geração de condições iniciais visando a previsão numérica, inclusive com algumas modificações em relação à proposta original (Benjamin & Seaman, 1985; Faccani et al., 2003; Faccani & Ferretti, 2005; Ferretti & Faccani, 2005; Jiang et al., 2009).

No desenvolvimento de qualquer modelo físico-matemático (como o de previsão do tempo), inicia-se com as leis mais fundamentais sem inserir processos mais complexos, visando possibilitar uma melhor percepção das falhas e comportamentos das leis em interação.

Tendo-se em vista os fatores acima, inclusive a necessidade de compreender o que envolve um processo de inserção de dados em modelos numéricos, o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da inserção de dados de vento do SODAR na simulação da direção e da velocidade do vento de um evento de tesoura de vento (wind shear) com o modelo WRF, utilizando o método de análise objetiva de Cressman.

2 Método de Análise Objetiva de Cressman

O primeiro SCM (successive correction method) usado em 4DDA (assimilação de dados em 4 dimensões) foi desenvolvido por Bergthórsson & Döös (1955), na Suécia, e por Cressman (1959) do Serviço Meteorológico Americano. Nele, a primeira estimativa é dada por um campo de background (equação 1), de forma que f_i^o é o campo do background avaliado no i -ésimo ponto de grade regular f_i^o e é a iteração inicial do campo regular.

$$f_i^0 = f_i^b \quad (1)$$

Após a primeira estimativa, as iterações subsequentes (f_i^{n+1}) são realizadas de acordo com a expressão (2), onde em cada iteração são feitas correções sucessivas.

$$f_i^{n+1} = f_i^n + \frac{\sum_{k=1}^{K_i^n} w_{ik}^n (f_k^0 - f_k^1)}{\sum_{k=1}^{K_i^n} w_{ik}^n + \varepsilon^2} \quad (2)$$

Onde os w_{ik}^n pesos de cada observação é dado por Cressman (1959) da seguinte forma:

$$\begin{cases} w_{ik}^n = \frac{R_n^2 - r_{ik}^2}{R_n^2 + r_{ik}^2}, & \text{para } r_{ik}^2 \leq R_n^2 \\ w_{ik}^n = 0 & , \text{para } r_{ik}^2 > R_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

Nestas expressões, R_n é o raio de influência (RIN) que pode ser considerado a partir do ponto i da grade regular ou do ponto k de observação, n é o número da iteração; K_i^n é o total de observações dentro do raio de influência da n -ésima iteração; f_i^n é a n -ésima (estimativa anterior) do ponto i da grade regular do campo; f_k^0 é uma das observações (k -ésima) dentro do raio de influência do ponto de observação k ; f_k^n é a estimativa anterior do ponto i -ésimo para o ponto k da observação (é feita uma interpolação dos pontos de grade mais próximos) e ε^2 é uma estimativa da razão entre a variância do erro observacional e a variância do erro do background. O peso definido na equação 3 é o considerado padrão, no qual se prevê uma área de influência circular dentro do R_n , como mostra a Figura 1.

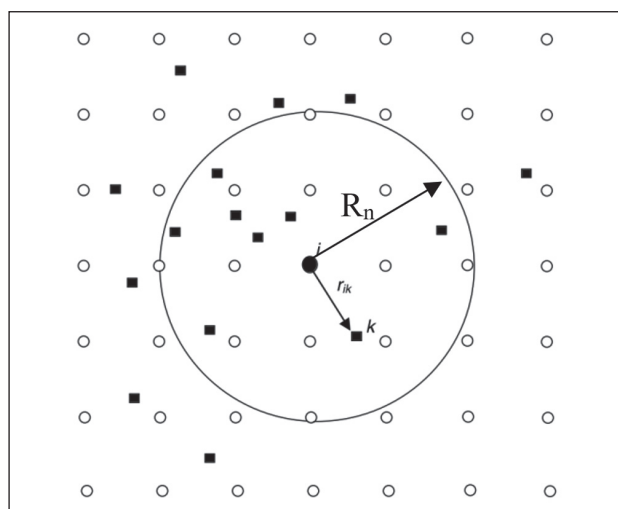


Figura 1 Esquema SCM de Cressman, função peso no ponto i da grade regular em função das observações irregularmente distribuídas (Kalnay, 2003).

Contudo, nas análises de vento e umidade relativa, sendo campos como este (escalares) altamente influenciados pelo vento, os círculos tradicionais são alongados para valores de vento superiores a um valor crítico (v_c) que depende do nível de pressão, podendo ser 25 m/s ($P > 500$ mb) ou 15 m/s ($P \leq 500$ mb), formando elipses. E nos casos em que, além de ventos intensos, o escoamento apresenta uma curvatura significativa – isto é, quando o Raio de Curvatura (r_k) for menor que 3x o raio de influência da primeira iteração - o formato da função peso pode vir a assumir a forma de um círculo alongado deformado nas extremidades.

Atentos a estes efeitos, Benjamin & Seaman (1985), de agora em diante chamado de BS, propuseram a função peso “banana” (Figura 2), que segue a formulação de Cressman (1959) para a situação circular, porém faz correções podendo assumir um formato elíptico ou de banana de acordo com as condições do escoamento seguindo esses critérios. Na ausência de vento significativo, ou seja, aquele abaixo do limiar de v_c , este esquema assume uma forma elíptica ou retorna à sua forma circular.

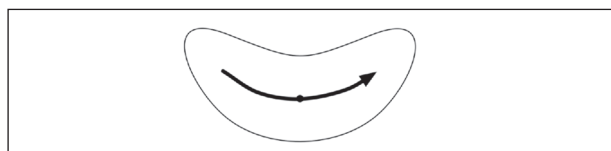


Figura 2 Área de influência do tipo banana, de acordo com a proposta de Benjamin & Seaman, 1985 (Adaptado de Skamarock et al., 2008).

Esta proposta permite uma expressão semelhante à circular de Cressman, tal que:

$$w_{ijk} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_m^2}{R^2 + d_m^2}, & \text{para } d_m^2 < R^2 \\ 0, & \text{para } d_m^2 \geq R^2 \end{cases} \quad (4)$$

Contudo, a distância (agora,) fica:

$$d_m^2 = \left[\frac{r_k^2 (\theta_k - \theta_{ij})^2}{1 + \beta |\mathbf{V}_k|} + (|r_k| - r_{ij})^2 \right] = \left(\frac{x'_b{}^2}{E_k^2 (|\mathbf{V}|)} + y'_b{}^2 \right) \quad (5)$$

Na expressão 5, temos que:

- r_k é o raio de curvatura da linha de corrente que passa no ponto de observação k . Encontrado pela equação da vorticidade relativa em coordenadas naturais;

- r_{ij} é a distância de C_k (centro de curvatura da linha de corrente para o ponto de observação k) até o ponto (i, j) da grade regular. Determinada após a definição do centro de curvatura;
- θ_k é o ângulo azimutal no centro de curvatura (C_k) traçado desde a direção positiva do eixo x (direção leste) seguindo no sentido anti-horário até o ponto de observação k . Para a direção do vento D (ângulo matemático em radianos), e o sinal do raio de curvatura S (giro ciclônico positivo), $\theta_k = D - S\pi/2$;
- θ_{ij} é o ângulo azimutal no centro de curvatura (C_k) traçado desde a direção positiva do eixo x (direção leste) seguindo no sentido anti-horário até o ponto de grade (i, j) . Estas variáveis e suas relações geométricas são expostas na Figura 3.

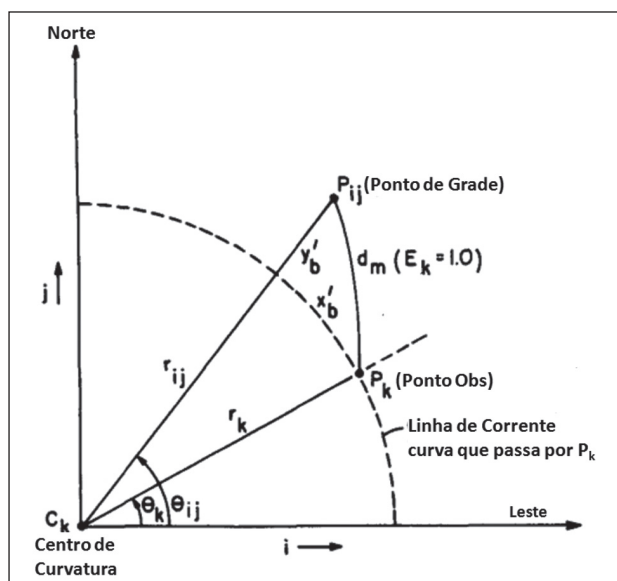


Figura 3 Representação das variáveis utilizadas na função de peso banana e suas relações geométricas (Benjamin & Seaman, 1985).

3 Metodologia e Dados

Para a aferição do impacto da inserção dos dados de SODAR, foram realizados, neste primeiro momento da pesquisa, dois experimentos: a) uma simulação com o WRF utilizando condições iniciais e de contorno contendo as informações do SODAR (análises + SODAR) e b) uma simulação cujas análises não continham tais informações (somente análises).

O first guess, ou a primeira aproximação para o campo inicial, utilizado para a geração de análises nos experimentos foi extraído do modelo global americano GFS (Global Forecast System) com $0,5^\circ$ de resolução horizontal.

A inserção utilizando o método de AOC (Análise Objetiva de Cressman) se deu através do módulo OBSGRID do WRF, que realiza as iterações previstas na formulação de BS. Este módulo ainda realiza uma série de testes de controle de qualidade das observações (checagem de erros grosseiros, remoção de outliers etc). As opções selecionadas foram: i) 4 iterações em cada ponto de grade e ii) o raio de influência foi calculado a partir de uma estimativa da densidade de observações num raio de 325 km a partir do ponto de grade.

Posteriormente, os resultados foram comparados com os perfis estimados pelos instrumentos de SODAR para se determinar qual dos experimentos foi o mais próximo da referida estimativa do vento observado.

O modelo foi configurado para uma grade final com uma resolução horizontal (Δx) de aproximadamente 685 m e vertical (Δz) de 60 níveis sigma (vide Tabela 1), variando de um espaçamento menor nos primeiros níveis (próximo à superfície e próximo ao topo da camada limite planetária), uma vez que se pretendia obter um maior detalhamento para a camada limite planetária, até um espaçamento quase fixo de cerca de 377 m. Além disso, o modelo foi configurado para disponibilizar saídas, ou campos de variáveis atmosféricas, numa frequência temporal de 1 hora.

No primeiro experimento, foram gerados campos de vento a partir de uma simulação forçada pelas análises de 6-6h do modelo global do NCEP (GFS) de $0,5^\circ$ de resolução horizontal ($\Delta x \cong 55$ km), sem nenhum tipo de inserção de dados. Estes gráficos foram gerados com a mesma formatação do software que manipula os dados do SODAR (APRun) para facilitar a análise e comparação dos resultados do modelo com os dados do SODAR, os quais são considerados representativos da realidade observada. O objetivo desta etapa foi o de realizar uma análise comparativa destes resultados com os que serão gerados a partir da inserção de dados.

Num segundo experimento, foram utilizados os dados provenientes dos dois instrumentos de SODAR instalados no aeródromo de Guarulhos mesclados com os dados provenientes das análises do GFS, através do método AOC. As demais configurações utilizadas no primeiro experimento são repetidas neste segundo. A Tabela 1 mostra a correspondência entre os níveis do modelo e os do SODAR que foram usados na comparação. Destaca-se que o primeiro nível do modelo (0 m) difere significativamente do primeiro nível do SODAR (30 m), o que torna a comparação inadequada para este nível. Os demais níveis foram encontrados pela média aritmética dos níveis mais próximos, de forma que a velocidade de um dado nível do modelo, $v_{\text{model}}(z=244,7\text{m})$, é comparada com a velocidade composta, $v_{\text{sodar}}(z=245,0\text{m})$, do nível imediatamente superior, $v_{\text{sodar}}(z=250,0\text{m})$, e do imediatamente inferior, $v_{\text{sodar}}(z=240,0\text{m})$. Portanto, $v_{\text{sodar}}(z=245,0\text{m})$ é encontrada pela soma de $v_{\text{sodar}}(z=250,0\text{m})$ com $v_{\text{sodar}}(z=240,0\text{m})$ dividida por 2.

Eta (níveis modelo)	Níveis do Modelo (m)	Níveis SODAR (m)
1	0,0	30,0
2	56,6	55,0
3	137,9	135,0
4	244,7	245,0
5	377,6	375,0
6	546,3	520,0

Tabela 1 Equivalência entre os primeiros 6 níveis (σ) do modelo e os níveis das observações do SODAR.

Tal comparação foi feita tanto visual quanto estatisticamente. Na visual, a comparação é feita por duas formas: i) campos de perfil vertical do vento (direção + intensidade) a partir das simulações, de forma similar à apresentação do programa de visualização do software do SODAR e ii) gráficos da intensidade do vento nas duas simulações. Na estatística, foi elaborada uma tabela com índices estatísticos, tais como o erro absoluto e o erro percentual, a partir da intensidade do vento.

4 Resultados e Discussão

Como se pode observar pela Tabela 2, dois níveis de cada ponto de grade próximo aos instrumentos foram alterados pela análise objetiva.

Níveis Metgrid (hPa)	met_* (noda)	met_* (da)
1013	1,53764	1,53764
1000	2,14623	0,44215
975	2,11831	4,92756
950	2,07774	2,07774
925	2,09487	2,09487
900	2,78971	2,78971

Tabela 2 Intensidade do vento nos níveis do first guess (GFS) corrigidos pelos SODAR 09R.

Na Figura 4, a ordenada mostra a intensidade do vento, enquanto a abscissa mostra evolução temporal; as linhas pretas representam as observações de SODAR, as vermelhas são os resultados do experimento sem inserção de dados e as azuis são os resultados do experimento com inserção de dados.

Os níveis 2 e 3 do modelo foram escolhidos porque foram os modificados pelo processo de análise objetiva, e sobretudo pelo fato de que acima da altitude referente ao nível 3 do modelo (~138 m) os dados do SODAR são esparsos, o que impossibilita a comparação. Por questões de espaço, foi selecionado o horário de ocorrência do fenômeno de tesoura de vento reportado pelo observador (15Z).

Na etapa de comparação estatística, apresentam-se as Tabelas 3 e 4, contendo informações sobre o erro das simulações para os dois pontos mais próximos dos locais de instalação de SODAR. As Tabelas estão dispostas de forma que, da esquerda para a direita, as colunas contém, respectivamente: i) a altura relativa aos níveis do modelo, em m; ii) velocidade do vento estimada pelos SODAR transposta para os níveis do modelo, em m/s; iii) diferença entre os erros/desvios das velocidades das simulações com (DI) e sem inserção (NODI) de dados (DI - NODI); iv) diferença entre os erros/desvios percentuais das velocidades das simulações com (DI) e sem inserção (NODI) de dados (DI - NODI) em relação ao valor estimado pelo SODAR, em %. Logo, quando ocorre valor positivo na diferença do erro da velocidade, é um indicativo de que o experimento com inserção de dados apresentou resultado mais distante do observado, i.e., apresentou maior erro. Do contrário, valor negativo, o experimento sem inserção apresentou maior erro.

Verifica-se que não houve uma diferença significativa entre os experimentos com e sem a inser-

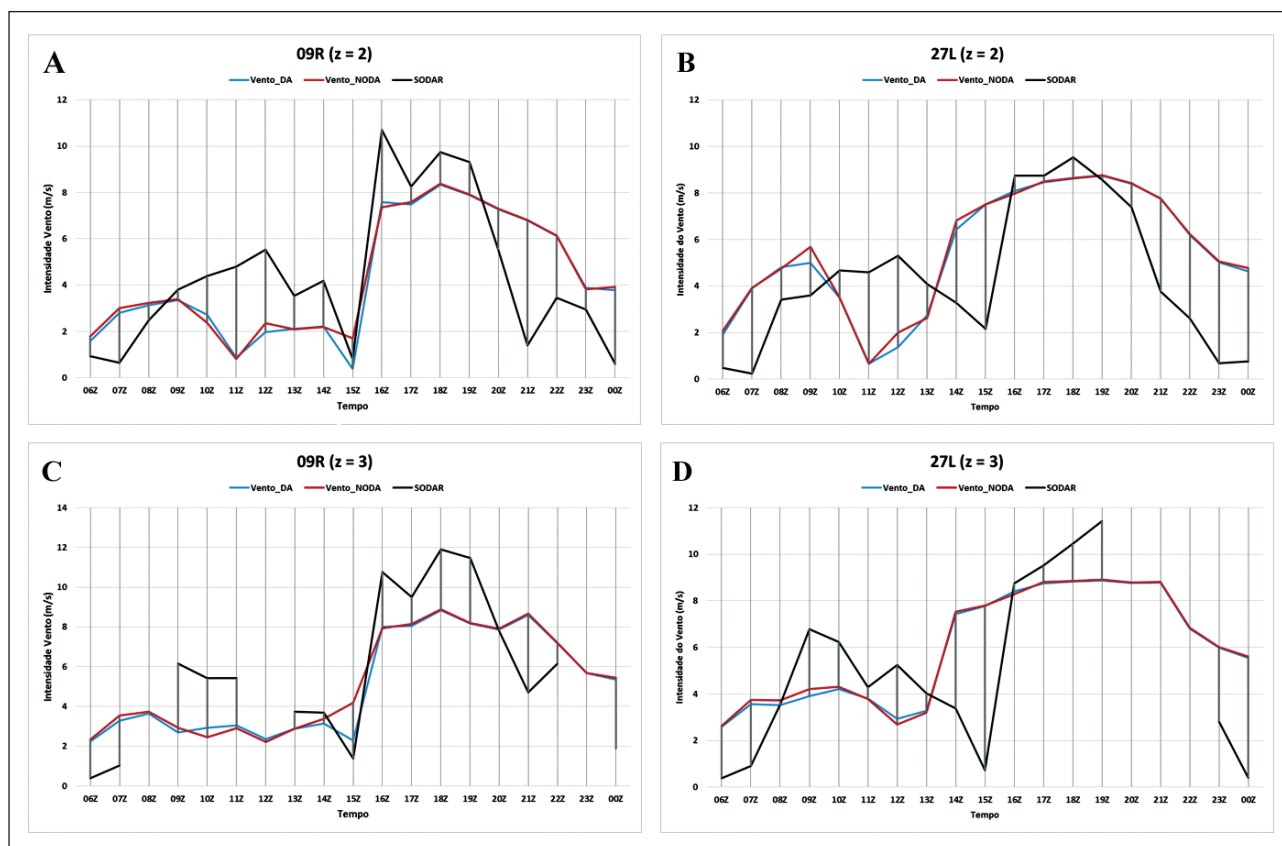


Figura 4 Evolução temporal da velocidade do vento do SODAR (preto), do experimento sem inserção de dados (vermelho) e do experimento com inserção de dados (azul) para (A) o nível 2 da pista 09R, (B) o nível 2 da pista 27R, (C) o nível 3 da pista 09R e (D) o nível 3 da pista 27R.

z_modelo (m)	SODAR (m/s)	ERR DI-NODI (m/s)	ERR_% DI-NODI (%)
0,0	2,24	0,02	1,00
56,6	2,17	0,01	0,51
137,9	0,73	-0,03	-3,79
244,7	5,09	-0,08	-1,64
377,6	9,75	0,11	1,12

Tabela 3 Verificação estatística da diferença do erro absoluto e do erro relativo entre o experimento com e sem inserção para o SODAR da pista 27L no horário das 15Z do dia do evento.

z_modelo (m)	SODAR (m/s)	ERR DI-NODI (m/s)	ERR_% DI-NODI (%)
0,0	1,33	-0,04	-2,81
56,6	0,82	-0,45	-54,80
137,9	1,38	-1,90	-137,35
244,7	4,48	-1,18	-26,25
377,6	8,99	0,20	2,23

Tabela 4 Verificação estatística da diferença do erro absoluto e do erro relativo entre o experimento com e sem inserção para o SODAR da pista 09R no horário das 15Z do dia do evento.

ção. Numa análise mais detalhada, percebe-se que em alguns momentos o experimento com a inserção apresenta resultados mais próximos dos dados observados; enquanto noutros, os resultados do experimento sem inserção se aproximam mais. Visando resumir estes eventos, foi confeccionada a Tabela 5, que apresenta a porcentagem de resultados mais próximos das observações para cada uma das simu-

lações. Para gerar estes resultados, foi determinada a diferença entre os resultados e as observações; caso a menor diferença fosse, por exemplo, do experimento com inserção de dados, este evento era contado para este experimento num universo de pontos de comparação entre o modelo e o SODAR com um total de 67 para a pista 09R e 74 para a 27R.

SODAR	NODI	DI
09R	41,79	58,21
27R	44,59	55,41

Tabela 5 Porcentagem de melhoria das simulações para os níveis 2 e 3 do modelo.

Observa-se que o experimento com a inserção de dados apresenta um número ligeiramente maior de resultados mais próximos do observado, com um total de 58,21%, para a pista 09R, e 55,41%, para a pista 27R.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Apesar da inserção dos dados do SODAR, permitindo que o modelo recebesse a informação da ocorrência de um cisalhamento da velocidade do vento, os resultados demonstraram que a inserção dos dados possibilitou uma melhoria pouco significativa na simulação do fenômeno analisado.

No horário das 15Z, a Figura 4 mostra que a inserção de dados possibilitou um menor erro entre a previsão (linha azul) e a observação do SODAR (linha preta) da pista 09R em relação àquela apresentada pela simulação sem inserção (linha vermelha). Este padrão se repetiu para outros níveis que foram afetados pela inserção (6 primeiros níveis do modelo) ao longo da integração (06Z-24Z), o que também foi evidenciado pela Tabela 4. Os resultados são resumidos na Tabela 5, que exibe a porcentagem de casos em que a discrepância entre os dados observacionais e as simulações foi menor. Verifica-se que na maioria dos casos (sem filtro de velocidade), a simulação com a inserção de dados implicou um erro menor em relação às observações, 58,21% (09R) e 55,41% (27R). Algumas possíveis explicações para estes resultados podem ser resumidas como:

a) baixo número de informações observacionais: apenas dois níveis, em dois pontos (total de 4 pontos), foram alterados do first guess, o que é muito pouco em relação aos 4.362.720 pontos do domínio mais refinado, utilizado como referência para a aplicação do método de inserção de dados;

b) o peso relativamente baixo dado às observações em função dos parâmetros assumidos: decor-

re disto que um maior peso foi dado ao first guess, em virtude das premissas das quais a assimilação parte (maior confiabilidade das previsões numéricas em relação às observações); isso nem sempre é constatado, sobretudo quando se tem um controle criterioso da qualidade das observações, como é o caso em questão.

Como trabalhos futuros, pretende-se: a) incorporar outras bases de dado à inserção (ex.: METAR, radiossondas etc) para que o uso de mais informações observacionais possam aumentar o peso das observações no first guess e garantir melhores correções; b) modificar parâmetros do esquema de Cressman, como o valor raio de influência para cada iteração, possibilitando uma melhor representação de escalas menores; e c) aplicar métodos de assimilação de dados propriamente ditos, como 3D-Var e 4D-Var, visando aproveitar melhor as informações observacionais disponíveis e garantir o balanço do modelo concomitantemente.

6 Referências

- Argentini, S.; Mastrantonio, G.; Petenko, I.; Pietroni, I. & Viola, A. 2012. Use of a high-resolution sodar to study surface-layer turbulence at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 143(1): 177-188.
- Benjamin, S.O. & Seaman, N.L. 1985. A simple scheme for objective analysis in curved flow. *Monthly Weather Review*, 113(7): 1184-1198.
- Bergthörsson, P. & Döös, B.R. 1955. Numerical Weather Map Analysis I. *Tellus*, 7(3): 329-340.
- Beyrich, F. 1994. SODAR observations of the stable boundary layer height in relation to the nocturnal low-level jet. *Meteorologische Zeitschrift (N.F.)*, 3: 29-34.
- Beyrich, F. 1997. Mixing height estimation from sodar data - a critical discussion. *Atmospheric Environment*, 31(23): 3941-3953.
- Chen, M.; Fan, S.Y.; Zhong, J.; Huang, X.Y.; Guo, Y.R.; Wang, W. & Kuo, B. 2009. A WRF-based rapid updating cycling forecast system of BMB and its performance during the summer and Olympic Games 2008. In: *WMO Symposium on Nowcasting (Vol. 30)*.
- Cressman, G.P. 1959. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 87(10): 367-374.
- Da Silva, A.F.G. & Fisch, G.F. 2014. Avaliação do Modelo WRF para a Previsão do Perfil do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2): 259-270.
- Faccani, C.; Ferretti, R. & Visconti, G. 2003. High-resolution weather forecasting over complex orography: Sensitivity to the assimilation of conventional data. *Monthly Weather Review*, 131(1): 136-154.

- Faccani, C. & Ferretti, R. 2005. Data assimilation of high-density observations. I: Impact on initial conditions for the MAP/SOP IOP2b. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(605): 21-42.
- Feroni, R.; Galvão, E.; Santiago, A. & Albuquerque, T. 2013. Análise do Desempenho do Modelo WRF na Previsão de Evento Severo em Vitória-ES. *Ciência & Natura*, 473-475.
- Ferretti, R. & Faccani, C. 2005. Data assimilation of high-density observations. II: Impact on the forecast of the precipitation for the MAP/SOP IOP2b. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(605): 43-61.
- Härter, F.; Barros, F.; Braga, T.; Raposo, R.; Bonatti, G.; Mo, J. & Guedes, J.M. 2008. Um Sistema Previsor Baseado no WRF em Fase de Testes no INMET. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, 32: 35-41.
- Jiang, J.; Tambke, J. & Wolff, M. 2009. Cressman Correction of NWP for further Improvements of Wind Power Forecasts. *In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN WIND ENERGY CONF. AND EXHIBITION (EWEC) 2009 CONFERENCE, MARSEILLE, FRANCE*, p. 16-19.
- Kalnay, E. 2003. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press, 342 p.
- Padilha, S.F. 2011. *Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 83 p.
- Skamarock, W.C.; Klemp, J.B.; Dudhia, J.; Gill, D.O.; Barker, D.M.; Wang, W. & Powers, J.G. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). *National Center For Atmospheric Research Boulder CO Mesoscale and Microscale Meteorology Division*.