

Análise de índices de instabilidade simulados pelo modelo WRF durante um evento de chuva extrema ocorrido na cidade de Nova Iguaçu

Daniela Dantas da Silva¹; Fabricio Polifke da Silva¹; Gisele Dornelles Pires¹

¹Grupo de Pesquisa Engenharia e Sociedade, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Iguaçu - UNIG, Av. Abílio Augusto Távora, 2134 - Jardim Nova Era, 26275-580, Nova Iguaçu - RJ

danieladsilva2010@hotmail.com, briopolidfke@gmail.com, unigengenharia@gmail.com

Resumo - O conhecimento das condições meteorológicas associadas à ocorrência de eventos extremos de precipitação passados pode sinalizar a potencialidade da atmosfera para a formação de novos possíveis eventos extremos. Neste contexto, o uso de indicadores dinâmicos e termodinâmicos se apresenta como ferramenta útil na quantificação da estrutura física associada à formação de nuvens e precipitação na atmosfera, especialmente quando associada aos eventos de caráter extremo. Este trabalho utilizou as saídas do modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF) em diferentes condições de inicialização e domínios de grade para calcular e avaliar a evolução temporal de cinco indicadores termodinâmicos e dois indicadores dinâmicos durante um evento de chuva extrema ocorrido na cidade de Nova Iguaçu. Através da análise concomitante dos indicadores termodinâmicos verificou-se que a principal componente da instabilidade térmica esteve associada às variações de umidade nos baixos e médios níveis da atmosfera. Os indicadores dinâmicos representaram adequadamente a circulação proposta pela equação da continuidade. Entre os domínios utilizados, verificou-se que a grade (resolução horizontal) de 03 km apresentou as maiores amplitudes (valores significativos) para todos os indicadores analisados.

Palavras-chave: Chuva, WRF, indicadores

Abstract - The meteorological conditions knowledge related to the occurrence of past extreme rainfall can aid in the identification of the atmospheric potentiality for the formation of new possible extreme events. In this context, the use of dynamic and thermodynamic indicators is a useful tool for the quantification of the physical structure associated with the atmospheric formation of clouds and rainfall, especially when associated with extreme events. This work used the outputs of Weather Research and Forecasting (WRF) numerical model in different startup conditions and grid domains to calculate and evaluate the temporal evolution of five thermodynamic indicators and two dynamic indicators during an extreme rainfall event occurred in Nova Iguaçu city. Through the concomitant analysis of the thermodynamic indicators, we could verify the main component of the thermal instability was associated with the variations of moisture in the lower and middle atmospheric levels. The dynamic indicators adequately represented the circulation proposed by the continuity equation. Among the domains used, verified that the 03 km grid (horizontal resolution) presented the largest amplitudes (significant values) for all indicators analyzed.

Keywords: Rainfall, WRF, indicators

1 Introdução

Eventos extremos de precipitação podem ocasionar diversos danos socioeconômicos às atividades da sociedade, principalmente quando favorecem a ocorrência de desastres naturais do tipo inundação e deslizamentos de encostas. Informações precisas das condições atmosféricas conducentes à formação de chuvas intensas são, portanto, imprescindíveis para a mitigação dos possíveis danos associados em consequência dos eventos extremos de chuva. Assim, a busca por melhores informações quantitativas associadas à potencialidade da atmosfera para a formação, assim como sua previsão, de taxas significativas de chuva nas escalas diárias e horárias, tornou-se um tema de grande relevância a ser abordado pela comunidade de pesquisa dedicada ao desenvolvimento e gestão

ambiental, pois necessita de uma abordagem multidisciplinar devido à sua capacidade intrínseca de modificar as características e influenciar o comportamento do ambiente físico com o qual interage (Lemos e Calbete 1996).

Silva (2011) em uma compilação de artigos científicos mostrou que a previsão da precipitação ainda não tem atingindo bons resultados quando comparada aos dados observados pelos pluviômetros em superfície, especialmente quando se trata de eventos extremos de precipitação. Em seu trabalho, Silva (2011) relata que, na maior parte dos casos, os modelos numéricos conseguem até gerar um comportamento similar, isto é, qualitativo, da precipitação simulada em relação à precipitação observada, entretanto tendem a apresentar menores valores (subestimativa) em relação aos dados observados. Inserido nesse contexto, Teixeira e Satyamurty (2007) descrevem que variáveis presentes na estrutura termodinâmica e dinâmica da atmosfera podem detectar a sua potencialidade para a formação da precipitação. Desta maneira, por mais que os resultados obtidos através de modelagem numérica não sejam úteis para prever a quantidade e local exato dos episódios de chuvas extremas, é possível avaliar a partir do comportamento destas variáveis se um possível evento significativo de chuva poderá ocorrer ou não.

Consideram-se indicadores termodinâmicos aqueles que expressam as variações térmicas (temperatura e umidade) horizontais e verticais presentes na atmosfera. Os indicadores dinâmicos procuram caracterizar a estrutura atmosférica favorável à formação das a partir dos movimentos verticais e horizontais existentes da atmosfera, ou seja, velocidade e direção do vento (Teixeira e Satyamurti 2007). A Tabela 1 apresenta alguns dos indicadores termodinâmicos e dinâmicos existentes na literatura e utilizados neste trabalho. Nas fórmulas apresentadas na Tabela 1, T e Td, ambos medidos em graus centígrados (°C), caracterizam a temperatura do ar ambiente e a temperatura do ponto de orvalho, respectivamente, enquanto os números subscritos dessas variáveis referem-se aos níveis isobáricos (hPa) nos quais são medidos. Tvp e Tv (também em °C) referem-se respectivamente às temperaturas virtuais de uma parcela de ar e de seu ambiente circundante; LFC é o nível de convecção espontânea de uma parcela elevada; e o LNB fornece seu nível de equilíbrio. Interpretações físicas das variáveis na Tabela 1 são apresentadas em detalhe a seguir.

Tabela 1 – Indicadores dinâmicos e termodinâmicos

Variável	Fórmula
Índice K	$K = (T_{850} + Td_{850}) - (T_{700} - Td_{700}) - T_{500}$
Índice TT	$TT = (T_{850} + Td_{850}) - 2 * T_{500}$
Energia total da tempestade	$TS = c_p T + gZ + Lq + \frac{V^2}{2}$
Lapse-Rate	$LR = -\frac{\partial T}{\partial Z}$
Convective potential available energy	$CAPE = g \int_{LFC}^{LNB} \frac{T_{vp}(z) - T_v(z)}{T_v(z)} dz$
Convergência	$CONV = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) < 0$
Divergência	$DIV = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) > 0$

O índice K é definido pela soma das temperaturas do bulbo seco e do ponto de orvalho em 850 hPa, subtraído da depressão do ponto de orvalho em 700 hPa e a temperatura do bulbo seco em 500 hPa (George 1960). Ocorrências de K acima do limiar de 30°C são consideradas como favoráveis à ocorrência de chuvas intensas, enquanto valores de K acima do limiar 40°C caracterizam uma possibilidade extremamente alta de um evento extremo de chuva (Nascimento 2005). Apesar do índice Total Totals (TT) ser bastante similar ao índice K, apresenta a sua principal diferença ao não considerar a depressão do ponto de orvalho em 700 hPa (Miller 1972). Em geral, ocorrências de TT acima de 40°C indicam condições favoráveis a chuvas, e valores acima de 50°C a presença de instabilidade termodinâmica favorável à formação de tempestades severas (Nascimento 2005).

A energia total da tempestade (TS) é caracterizada pela soma da entalpia específica, da energia potencial, energia cinética e energia produzida pela liberação de calor latente associada à mudança de fase d'água. O índice TS é considerado como uma variável conservativa no que tange aos processos saturados insaturados e adiabáticos associados aos fenômenos meteorológicos que favorecem a formação da precipitação (Darkow 1986). A taxa de variação vertical da temperatura, ou do inglês *lapse-rate*, (LR) caracteriza a taxa de variação de temperatura atmosférica entre dois níveis de pressão (700 hPa e 500 hPa como os dois níveis de medição). Segundo Nascimento (2005), quanto maior for o valor de LR (geralmente acima de 6°C/km) entre essas duas camadas, mais favorável à atmosfera se encontra para a formação da precipitação convectiva.

A energia potencial disponível para convecção, do inglês *convective available potential energy* (CAPE), por sua vez, representa uma integração vertical da diferença entre a temperatura virtual da parcela $T_{vp}(z)$ e a temperatura virtual do ambiente circundante $T_v(z)$ ao longo do percurso pelo qual uma parcela é levantada livremente - nomeadamente do nível de convecção livre (LFC) para o nível atmosférico chamado flutuabilidade neutra (LNB). O LNB geralmente indica o topo das nuvens convectivas ou o nível de divergência da bigorna. Quanto maior o valor da CAPE, mais propensa a atmosfera se encontra para a formação de convecção profunda na presença de uma forçante dinâmica. A convergência dos ventos (CONV) nos níveis mais baixos de atmosfera (850 hPa), a divergência dos ventos (DIV) nos níveis atmosféricos superiores (250 hPa) representam os mecanismos dinâmicos desencadeadores necessários para promover o movimento ascendente do ar (Silva 2011).

Este trabalho tem como objetivo avaliar qualitativamente e quantitativamente o comportamento de sete indicadores dinâmicos e termodinâmicos para um evento de precipitação extrema ocorrido na cidade de Nova Iguaçu em diferentes condições de inicialização temporal e domínios simulados pelo modelo WRF. A avaliação qualitativa corresponderá a análise da evolução temporal de cada indicador durante o dia em que houve o evento de precipitação extrema. A avaliação quantitativa será realizada através de estatísticas de verificação entre os indicadores analisados e a precipitação observada em superfície na cidade de Nova Iguaçu. Espera-se através da metodologia proposta identificar preliminarmente qual seria o melhor instante de tempo e domínio de simulação para a cidade de Nova Iguaçu.

2 Materiais e Métodos

O município de Nova Iguaçu é uma cidade localizada na região administrativa da Baixada Fluminense do estado do Rio de Janeiro, possui população estimada 798 657 habitantes (ano de 2017) segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/>) e ocupa uma área de 523,888 km² (Figura 1). Utilizando os dados das estações da rede telemétrica do Sistema de Alerta de Cheias do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) localizadas na cidade de Nova Iguaçu (Figura 1), Costa *et al.* (2018) utilizando o limiar de chuvas acima de 100 mm/ dia identificaram a ocorrência de seis eventos extremos de precipitação entre 2008 e 2018 sobre a cidade. Entre todos os eventos identificados, optou-se por realizar e avaliar a simulação do evento de chuva que apresentou o maior acumulado diário observado, sendo este o evento de chuva ocorrido em 03 de janeiro de 2013.

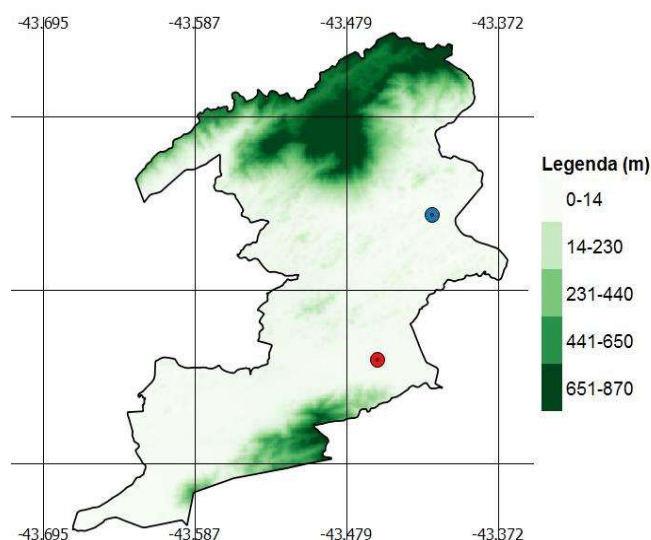


Figura 1- Perfil de elevação da cidade de Nova Iguaçu e estações Catavento (azul) e GBM Nova Iguaçu (vermelho) do Sistema de Alerta de Cheias do INEA (Fonte: Costa *et al.* (2018)).

A simulação numérica foi realizada utilizando o modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock *et al.* 2008) versão 3.8. As parametrizações físicas utilizadas foram o Modelo de Transferência Radiativa Rápida para radiação de ondas longas (Mlawer *et al.* 1997), o esquema de radiação de onda curta Dudhia (Dudhia 1989), o esquema de microfísica de 3 momentos WRF (Hong *et al.* 2004), O esquema de parametrização do cumulus de Kain-Fritsch (Kain 2004), o modelo unificado de superfície terrestre Noah (Tewari *et al.* 2004), o MM5 revisado Monin-Obukhov (Jimenez *et al.* 2012) para camada superficial e o limite planetário da Universidade Yon-Sei Esquema de parametrização de camadas (Hong *et al.* 2006).

As condições de contorno inicial e lateral utilizadas para a realização das simulações utilizando o modelo WRF foram obtidas através das análises do Global Forecast System (GSF, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GSF/doc.php>) com intervalos de seis horas e resolução horizontal de 0,50° x 0,50°. Para a avaliação da precipitação foram realizadas simulações começando 72 horas, 48 horas e 24 horas antecedentes ao dia 03/01/2013 e terminando às 22h00 do dia 04/01/2013 com a finalidade de caracterizar a performance do modelo quando submetido a diferentes condições temporais de inicialização. O modelo foi também configurado

com um total de três domínios e hierarquias de grade WRF modeladas com resoluções de domínio horizontal de 27 km (d01), 09 km (d02) e 03 km (d03), respectivamente (Figura 2).

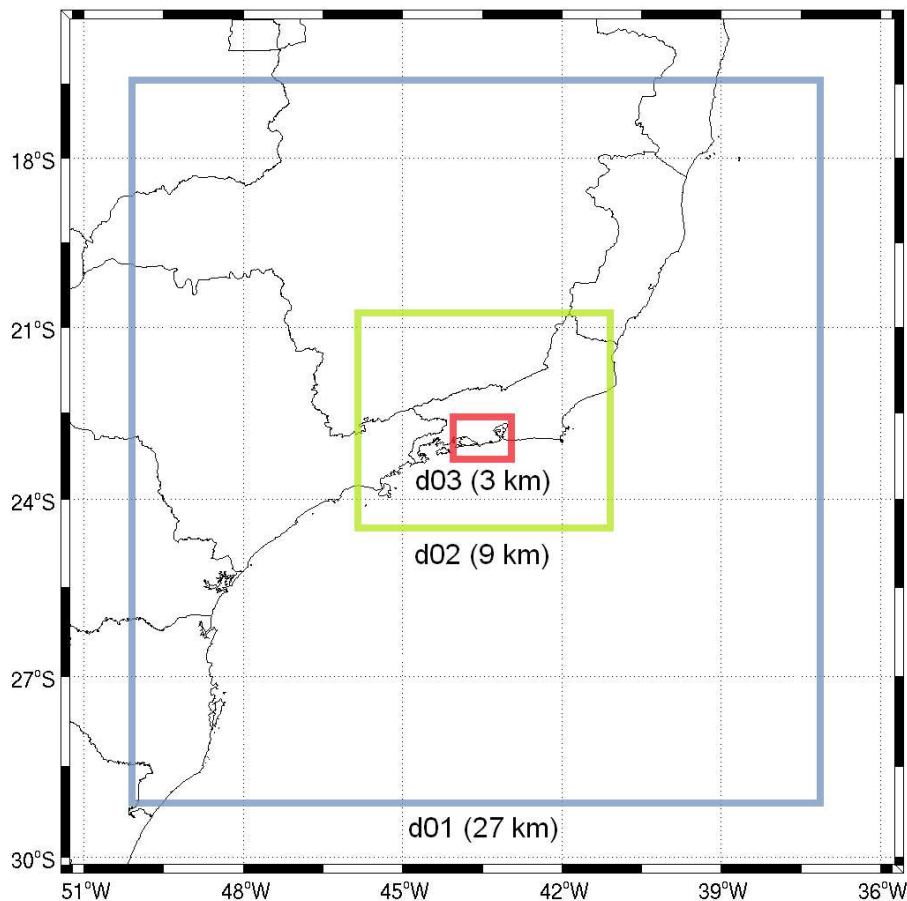


Figura 2 – Domínios da grade utilizada nas simulações com o modelo WRF.

3 Evento de chuva extrema ocorrido em 03 de janeiro de 2013 na cidade de Nova Iguaçu

Segundo informações presentes no Boletim Climanálise realizado pelo CPTEC/INPE (<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>) a formação da chuva sobre o estado do Rio de Janeiro no dia 03/01/2013 esteve associada à presença de uma frente fria sobre a região sudeste do Brasil. Devido ao alto aquecimento diurno, decorrente do verão austral, e disponibilidade sobre a região, a presença da frente fria favoreceu um suporte dinâmico para a formação de tempestades convectivas (Figura 3) sobre a cidade de Nova Iguaçu (Costa *et al.* 2018). Os dados de chuva coletados pelas estações Catavento e GBM Nova Iguaçu durante o dia 03 de janeiro de 2013 podem ser observados através da Figura 4. Verifica-se que a estação de GBM apresentou maiores acumulados diários e horários em relação à estação Catavento, caracterizando a alta variabilidade variável e o seu desafio para a mitigação dos possíveis danos associados a sua ocorrência.

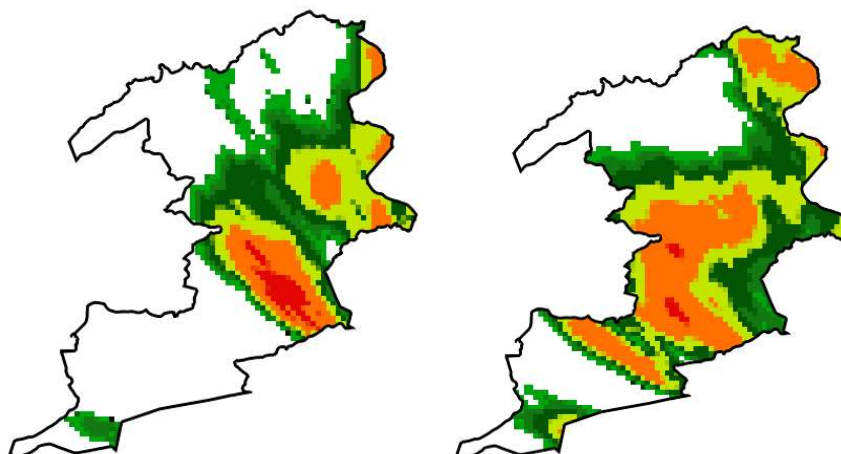


Figura 3 – Imagem georreferenciada do radar do Sumaré e recortada para a cidade de Nova Iguaçu às 09h30 (esquerda) e 15h30 (direita) do dia 03/01/2013.

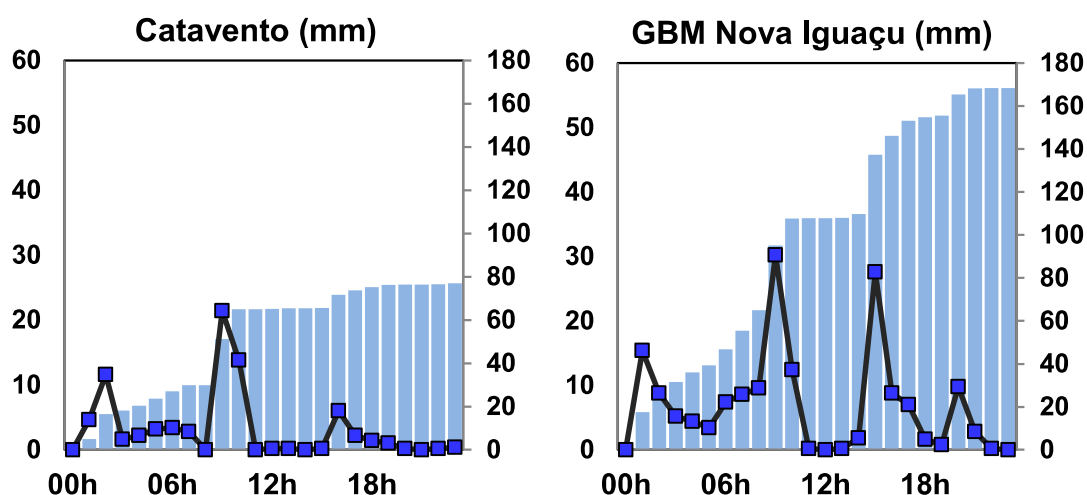


Figura 4 – Precipitação acumulada (barras) e horária (linhas) observada em 03 de janeiro de 2013 na estação Catavento (esquerda) e GBM Nova Iguaçu (direita).

4 Indicadores dinâmicos e termodinâmicos

A partir das Figuras 5 a 11 é possível avaliar a evolução temporal de cada um dos sete indicadores analisados para o evento de chuva extrema ocorrido na cidade de Nova Iguaçu para o ponto de grade localizado sobre a estação Cata-vento (linhas com quadrados) e sobre a estação GBM Nova Iguaçu (linhas com círculos). Além da análise entre os dois pontos de grade, pretende-se também avaliar o resultado destes indicadores começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa). O objetivo desta metodologia é verificar se aumentando a resolução espacial e diminuindo a antecedência de integração associada à simulação do evento extremo analisado serão obtidos melhores resultados em relação ao proposto pela literatura.

Através da evolução temporal do índice K (Figura 5) para todas as simulações e para os dois pontos de grade analisados, verificam-se valores expressivos deste índice com valores acima de 30°C durante o dia 03 de janeiro de 2013. Os maiores valores são observados somente para os domínios G3, isto é, com resolução espacial de 03 km, valores intermediários são observados no domínio G2 (09 km) e os menores valores no domínio G1 (27 km). Tal comportamento caracteriza que o modelo tendeu a caracterizar uma maior instabilidade termodinâmica na medida em que houve um aumento de resolução, caracterizando a alta dependência das condições locais associadas à formação da chuva para o evento extremo de chuva analisado.

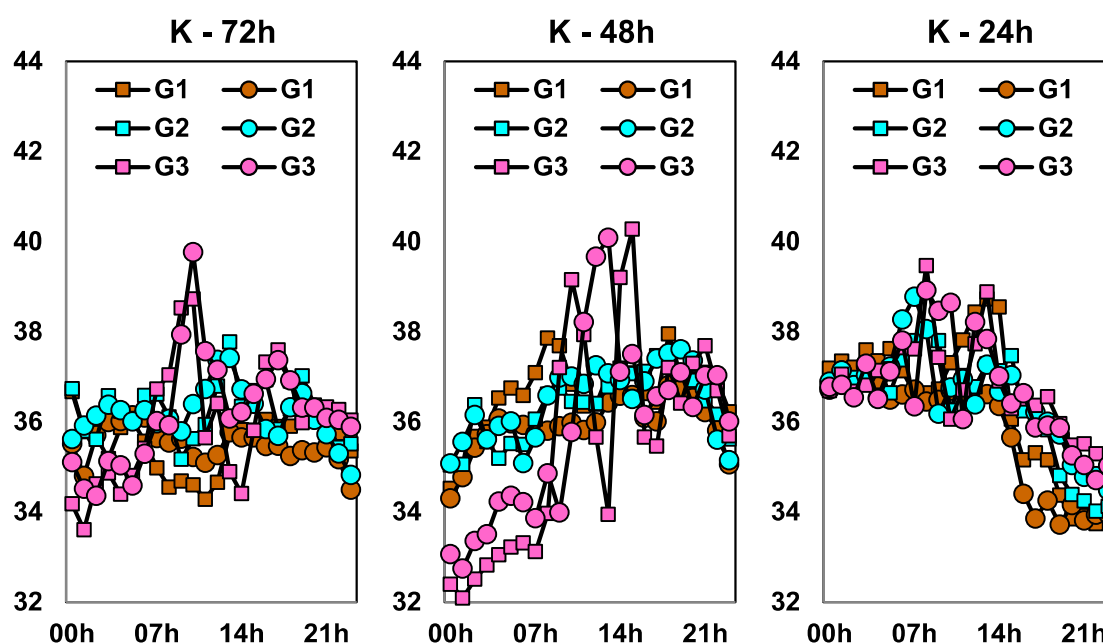


Figura 5 – Evolução temporal do índice K começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Cata-vento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

A evolução temporal do índice TT (Figura 6) apresenta um comportamento similar ao observado no índice K, isto é, os maiores valores são observados somente para os domínios G3, isto é, com resolução espacial de 03 km, valores intermediários são observados no domínio G2 (09 km) e os menores valores no domínio G1 (27 km). Com relação a sua intensidade, também são verificados valores significativos, acima de 40°C deste indicador para todas as simulações realizadas. A grande semelhança entre a evolução temporal do índice K e do índice TT indica que para este evento de chuva o modelo caracterizou uma alta disponibilidade de energia e umidade em toda a troposfera (Nascimento 2005). Através de uma análise comparativa entre os dois índices, verifica-se que os maiores valores são observados no decorrer da tarde caracterizando a reposta da atmosfera ao aquecimento diurno e o aumento de umidade relacionado aos processos de evapotranspiração.

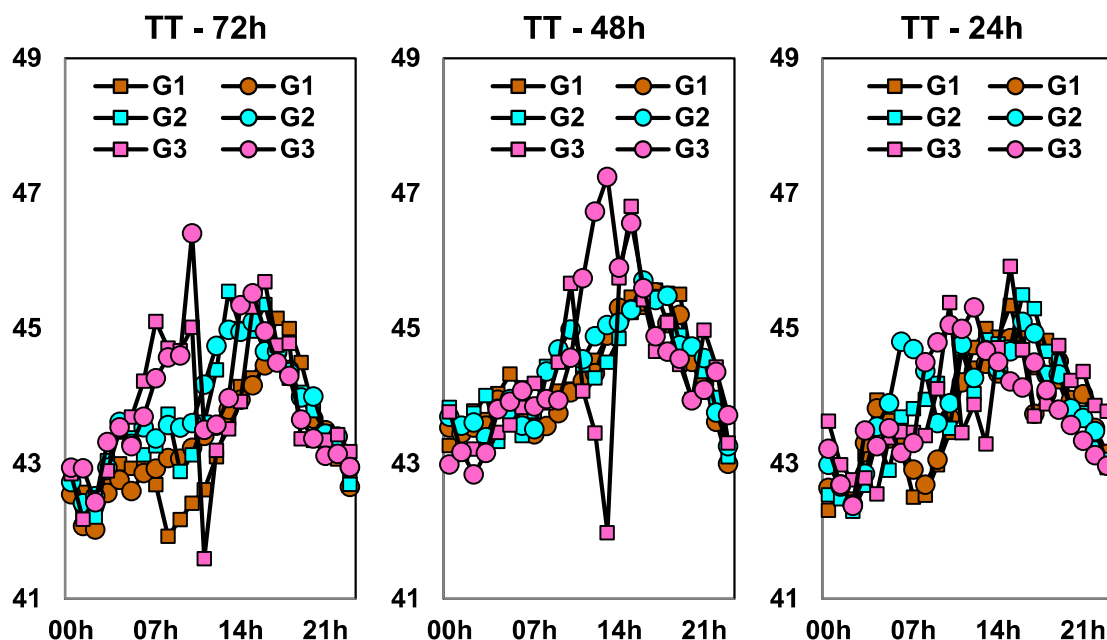


Figura 6 – Evolução temporal do índice TT começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Cata-vento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

Os resultados obtidos para as simulações da CAPE podem ser observados através da Figura 7. Para todos os domínios de integração e condições de inicialização verifica-se que o modelo tendeu a caracterizar valores não significativos deste índice (abaixo de 2500 kg/J). Sendo este índice fortemente influenciado pelas condições de superfície e através de uma comparação com os resultados obtidos pelos índices K e TT, verifica-se que a instabilidade atmosférica tendeu a se encontrar nos níveis atmosféricos entre 850 hPa e 500 hPa. Sugere-se que tal comportamento poderia estar relacionado à presença da frente fria sobre a região, favorecendo a advecção de ar frio oriundo de latitudes maiores em direção ao estado do Rio de Janeiro. Assim, com uma menor disponibilidade de aquecimento diurno, uma menor instabilidade termodinâmica em superfície poderia ser consequentemente observada. Além disso, os baixos valores associados aos resultados das simulações da CAPE poderiam também estar associados à alta disponibilidade de umidade na atmosfera favorecendo um perfil mais estreito no diagrama SkewT/log P e consequentemente menores valores desta variável.

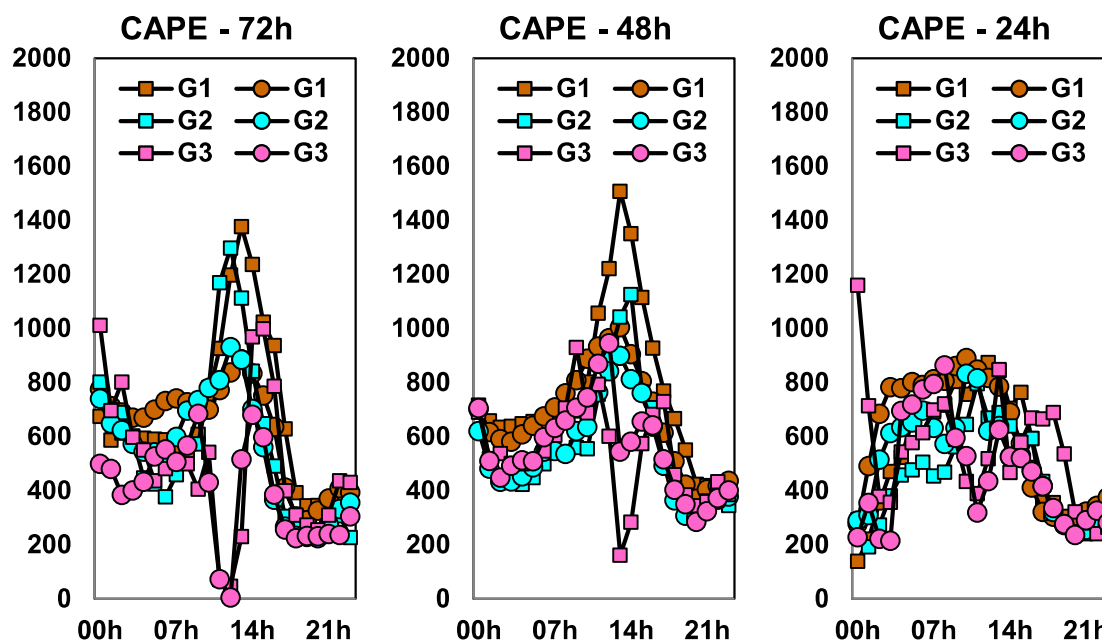


Figura 7 – Evolução temporal do índice CAPE começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Cata-vento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

A evolução temporal dos índices LR e TS pode ser observada nas Figuras 8 e 9 respectivamente. Para ambos os índices verificam-se maiores valores à tarde simulados pelo modelo WRF. Corroborando os resultados dos outros índices analisados (Figuras 5 a 7), sugere-se que tal comportamento esteja associado ao aquecimento diurno e disponibilidade de umidade pela evapotranspiração que podem apresentar resultados significativos durante a estação quente (verão) sobre a região analisada. Segundo critério proposto por Nascimento (2005), valores de LR acima de $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ geralmente caracterizam condições atmosféricas favoráveis a formação da precipitação oriundas do aquecimento diurno. Entretanto, para todas as grades de simulação e condições de inicialização valores abaixo deste limiar são observados. Tal comportamento corrobora os baixos valores observados no índice CAPE indicando que neste dia a atmosfera tendeu a apresentar um perfil mais estreito da CAPE e, consequentemente, menores valores simulados pelo modelo WRF. O índice TS (Figura 9), entretanto, mostra valores expressivos durante o dia de simulação para todas as condições de inicialização com valores mais expressivos para o domínio G3 (03 km). Tal característica está principalmente associada à liberação de calor latente nos níveis médios da atmosfera (500 hPa) associada à mudança de fase de água e formação de precipitação corroborando ao observado nos índices K (Figura 5) e TT (Figura 6).

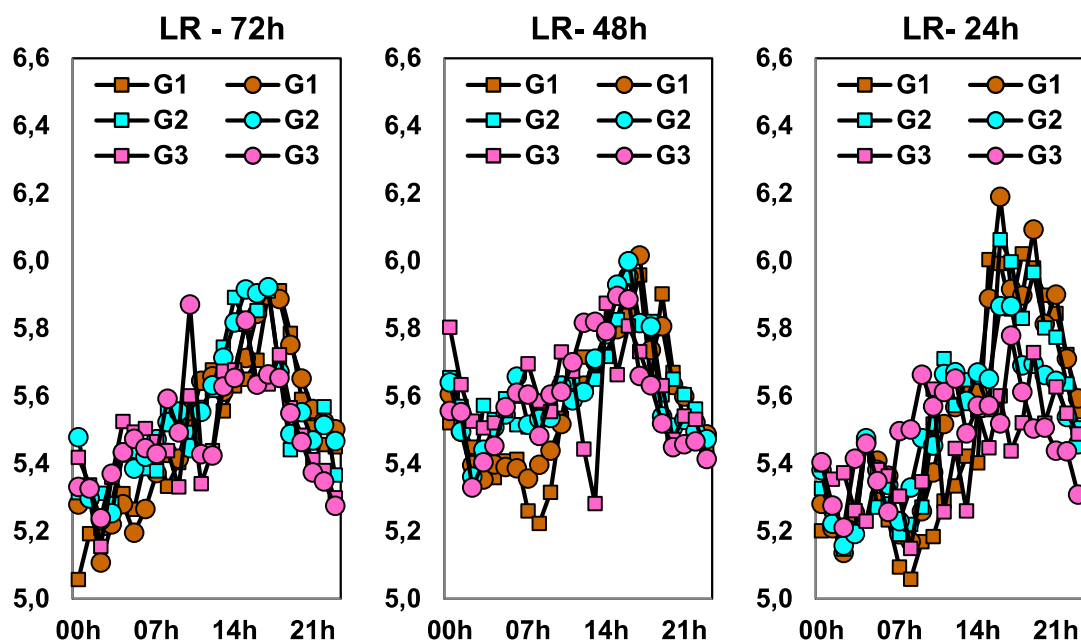


Figura 8 – Evolução temporal do índice LR começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Catavento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

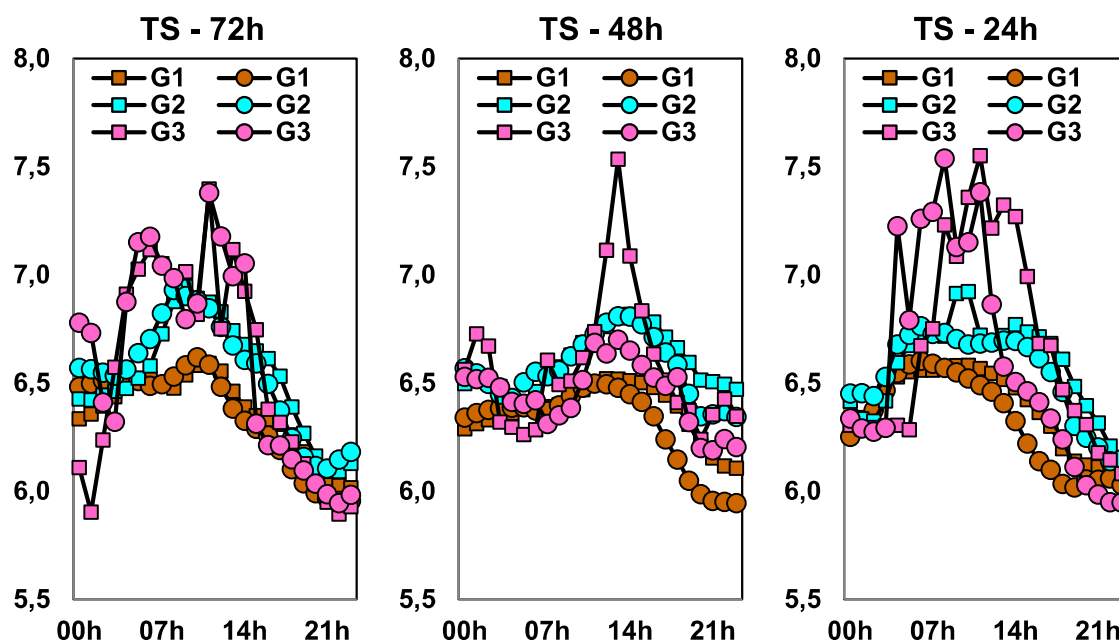


Figura 9 – Evolução temporal do índice TS começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Cata-vento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

Os indicadores dinâmicos CONV (Figura 10) e DIV (Figura 11) são mostrados a seguir. Valores negativos de CONV nos baixos níveis da atmosfera e valores positivos de DIV nos altos níveis da atmosfera são considerados como representativos da circulação atmosférica favorável à formação das nuvens e precipitação. Para todas as condições de inicialização e domínios de integração, verifica-se que a grade com a maior resolução espacial (03 km) tendeu a caracterizar condições atmosféricas favoráveis à formação da precipitação no dia 03 de janeiro de 2013 caracterizando a importância das condições locais associadas à configuração dos ventos nos baixos níveis da atmosfera sobre a região, principalmente relacionadas ao transporte de umidade dos níveis atmosféricos próximos em superfície em direção aos níveis atmosféricos superiores.

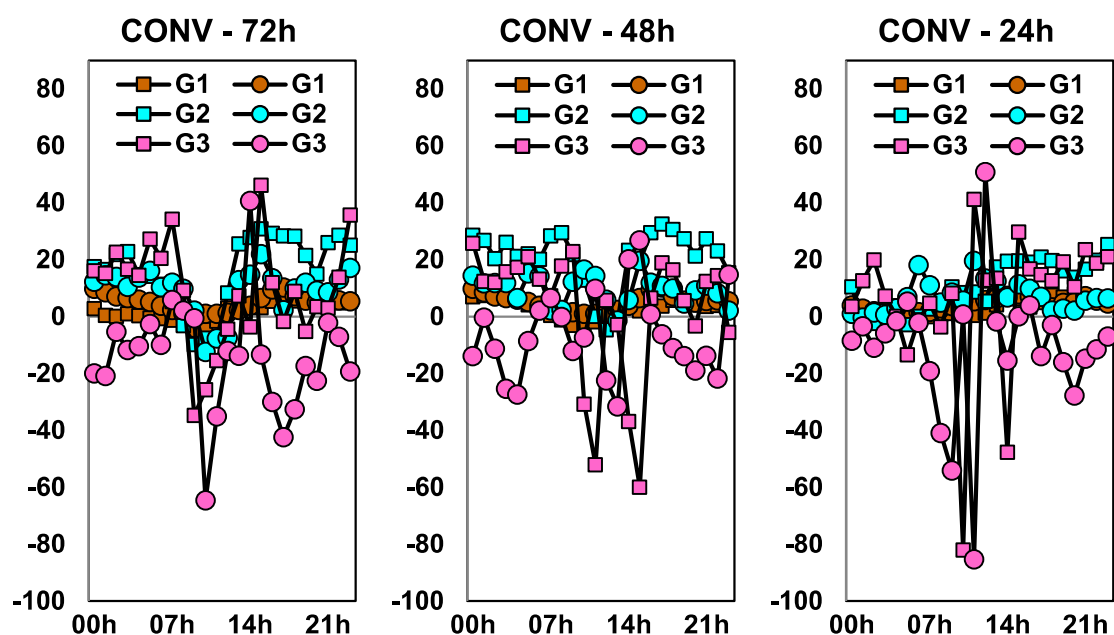


Figura 10 – Evolução temporal do índice CONV começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Catavento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

Os resultados do índice DIV (Figura 11) também caracterizam condições atmosféricas favoráveis à formação da precipitação nos altos níveis da atmosfera. Similar ao índice CONV (Figura 10), valores mais expressivos do DIV são observados para o domínio de 27 km (G3) em relação aos outros domínios de simulação corroborando a dependência das condições locais para a formação das chuvas observadas no dia 03 de janeiro de 2013 sobre a cidade de Nova Iguaçu. Através de uma análise comparativa entre estes dois indicadores dinâmicos é possível também observar uma alternância entre os valores negativos de CONV em 850 hPa e DIV em 250 hPa caracterizando a defasagem temporal associada a equação da continuidade presente no comportamento dos fluidos.

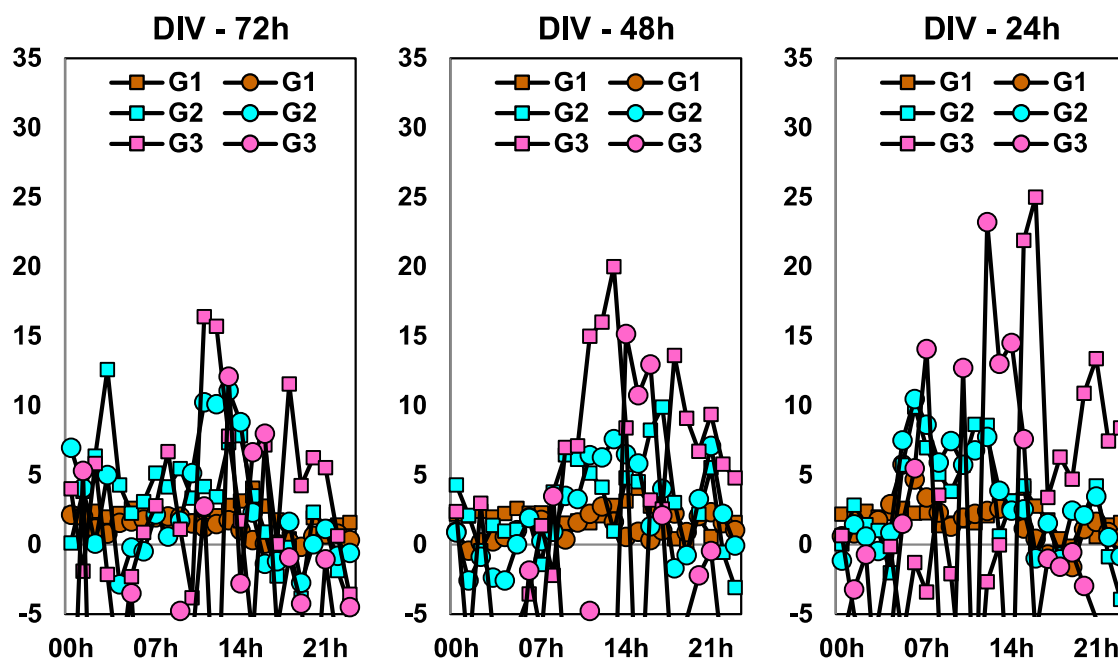


Figura 11 – Evolução temporal do índice CONV começando 72 horas (esquerda), 48 horas (central) e 24 horas (direita) para a grade (1) de 27 km (marrom), para a grade (2) de 09 km (verde) e para a grade (3) de 03 km (rosa) para o ponto de grade localizado sobre a estação Cata-vento (retângulos) e GBM Nova Iguaçu (círculos).

5 Conclusões

Através da análise concomitante dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos simulados pelo modelo WRF para o evento de chuva extrema ocorrido no dia 03 de janeiro de 2013 sobre a cidade de Nova Iguaçu foi possível verificar que os índices termodinâmicos K, TT e TS apresentaram valores significativos, enquanto que tal comportamento não foi observado para os índices CAPE e LR. Tal característica mostra que a principal componente de instabilidade termodinâmica presente neste dia esteve associada às variações de umidade entre 850hPa e 500hPa, sugerindo a atuação da frente fria localizada sobre a região como inibidor termodinâmico e favorecendo um resfriamento em superfície. Os indicadores dinâmicos CONV e DIV representaram adequadamente os valores esperados para a circulação atmosférica favorável à formação das nuvens e precipitação. Através de uma análise comparativa entre os três domínios de grade e condições de inicialização verificou-se que a grade de 03 km, tanto começando com 48 horas como em 24 horas, apresentou as maiores amplitudes (valores significativos) entre os indicadores analisados.

6 Referências Bibliográficas

Costa WP, Silva GR, Silva FP, Pires GD, Sampaio RF (2018) Eventos extremos de precipitação na cidade de Nova Iguaçu: Identificação e estimativa por radar. Rev Eng, Meio Amb e Inov 1:21-27

Darkow GL (1968) The total energy environment of severe storms. J Appl Meteorol 7:199–205

- Dudhia J (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J Atmos Sci* 46:3077–3107
- George JJ (1960) Weather forecasting for aeronautics. Academic Press, New York
- Hong S-Y, Dudhia J, Chen S-H (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Weather Rev* 132:103–120
- Hong SY, Noh Y, Dudhia J (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Weather Rev* 134:2318–2341
- Jiménez PA, Dudhia J, González-Rouco JF, Navarro J, Montávez JP, García-Bustamante E (2012) A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon Weather Rev* 140:898–918
- Lemos CF, Calbete NO (1996) Sistemas Frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. *Climanálise Especial*, edição comemorativa de 10 anos
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res* 102:16663–16682
- Miller R (1972) Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. IOP Publishing <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/744042.pdf>. Accessed 22 July 2018
- Nascimento EL (2005) Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Rev Bras Meteor* 20(1):113–122
- Silva FP (2011) Chuvas Severas no Rio de Janeiro: Indicadores dos processos físicos associados. Dissertation, Federal University of Rio de Janeiro
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda M, Huang XY, Wang W, Powers JG (2008) A description of the advanced research WRF version 3. Tech. Rep. TN-475+STR, NCAR
- Teixeira MS, Satyamurty P (2007) Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. *Mon Weather Rev* 135:598–617
- Tewari M, Chen F, Wang W, Dudhia J, LeMone M, Mitchell K, Ek M, Gayno G, Weigel J, Cuenca R (2004) Implementation and verification of the unified Noah land surface model in the WRF model. In: 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp 11–15