

TRACKING AND NOWCASTING PREDICTION OF SEVERE STORMS USING RADAR DATA

ANTÔNIO PAULO DE QUEIROZ¹
LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO²

¹Centro Nacional de Meteorologia Aeronáutica (CNMA) - Primeiro Centro Integrado de Defesa
Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA1) – Brasília – Distrito Federal

²Divisão de Satélites Ambientais (DSA) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),
Cachoeira Paulista – São Paulo

antonio.paulo@cptec.inpe.br, machado@cptec.inpe.br

ABSTRACT:

This work evaluate the technique FORTRACC (Forecast and Track of Active Cloud Cluster) for use with radar images and analyzes the parameters Vertically Integrated Liquid (VIL), VIL Density (DVIL), maximum vertical reflectivity, height of the maximum reflectivity and height of the 45 dBZ level above 0°C and create an severity index. Severe weather was defined as any meteorological event that caused some type of damage surface as hail, gust or floods, inside of the area 150 km covering radar. System FORTRACC was adapted to follow rain structures above of threshold 10 kg m⁻² in order to identify the structures most active in the fields of VIL and 20 dBZ (height of 3 km) in fields of reflectivity. The FORTRACC-VIL and FORTRACC-dBZ, have a better resolution (2X2 km²) compared to FORTRACC-satellite (4X4 km²), to track the rapid growth of initial structures precipitating showing a growth of approximately 500X10⁻⁶ s⁻¹ and 600X10⁻⁶s⁻¹ in accordance with time of initial cycle of life. 10 selected cases of severe weather had been considered as control data and 10 cases had been used to test the parameters. Using as threshold the found minimum values for the control parameters, got an index of equal or bigger 90%, as observed with the test data..

Keywords: weather radar, vertically integrated liquid, system FORTRACC, severity index.

MONITORAMENTO E PREVISÃO IMEDIATA DE TEMPESTADES SEVERAS USANDO DADOS DE RADAR

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo adaptar e avaliar o FORTRACC para uso com imagens do radar e analisar os parâmetros VIL, DVIL (Densidade de VIL), máxima refletividade vertical, altura da máxima refletividade, diferença de altura entre o nível de 45 dBZ e o nível de congelamento (0°C), como parâmetros precursores de tempestades severas, e criar um índice de severidade com os parâmetros selecionados. Para caracterizar as estruturas precipitantes foram definidos novos limiares para os campos de VIL e de refletividades. No caso do campo de VIL, utilizou-se o limiar de 10 kg m^{-2} , a fim de separar os núcleos de maior intensidade na região do radar. Para o campo de refletividades, foi escolhida a altura de 3 km e o limiar de 20 dBZ. O FORTRACC-dBZ e o FORTRACC-VIL, devido a sua melhor resolução ($2 \times 2 \text{ km}^2$) quando comparado ao FORTRACC utilizado com dados de satélite ($4 \times 4 \text{ km}^2$), consegue monitorar o rápido crescimento inicial das estruturas precipitantes no radar apresentando um crescimento de expansão inicial aproximadamente entre 500×10^{-6} e $600 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ de acordo com o tempo de duração do ciclo de vida inicial. Para o cálculo do índice de severidade foram selecionados 20 casos de ocorrência de tempo severo, 10 dos quais serviram como controle para criação do índice e os 10 restantes como valores de teste. Assim, com o estudo para os 10 casos de controle, podemos dizer que um pixel pode ser considerado com potencial para tempo severo, quando o seu índice de severidade for igual ou maior que 1,2. Esse índice foi aplicado para os 10 casos de teste e conseguiu identificar 90% dos eventos de tempo severo.

Palavras-chave: radar meteorológico, conteúdo de água líquida integrado na atmosfera, sistema FORTRACC, índice de severidade.

1. INTRODUÇÃO

Através de muitos anos de estudos, reconheceu-se que a previsão de tempo severo requer o conhecimento da estrutura vertical da atmosfera. Com esse conhecimento pode-se verificar, por exemplo, a ocorrência de granizo em uma nuvem de tempestade. Os trabalhos iniciais focaram a identificação de granizo a partir da distribuição vertical dos ecos de radar (DONALDSON, 1960). Um produto de radar que tem se mostrado uma excelente ferramenta para detecção de granizo é o *VIL* (*Vertically Integrated Liquid* - conteúdo de água líquida integrado verticalmente), proposto por Greene e Clark (1972). O rápido crescimento de valores de *VIL* é um forte indicador de “desenvolvimento explosivo” de tempestades severas.

Combinando as varreduras volumétricas de radares meteorológicos com o sistema *FORTRACC* (*Forecast and Track of Active Cloud Cluster*) pode-se seguir as estruturas precipitantes com o tempo. Esse sistema funciona operacionalmente na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) como resultado dos trabalhos de Machado et al. (1998). O sistema, que atualmente é adaptado para os dados de satélite, contribui para o monitoramento e fornecimento de informações sobre expansão e velocidade dos sistemas convectivos de mesoescala.

O CPTEC, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), e o Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) estão realizando uma integração da rede de radares meteorológicos desde 2004, com apoio da Universidade de São Paulo (USP) (ANGELIS et al., 2006). Apesar do CPTEC elaborar mosaicos de radares, alguns produtos ainda não foram desenvolvidos e disponibilizados para a consulta do público interessado. Alguns desses produtos poderiam contribuir para o monitoramento de tempestades severas tais como o *FORTRACC-VIL* (sistema *FORTRACC* acompanhando estruturas precipitantes em campos de *VIL*), *FORTRACC-dBZ* (sistema *FORTRACC* acompanhando estruturas precipitantes em campos de refletividade a uma altura constante próxima a superfície), índice de severidade (para indicar se um pixel de radar tem condições de produzir tempo severo), possibilitando assim, a obtenção de ferramentas de apoio a áreas como gerenciamento e planejamento de recursos hídricos, agricultura, defesa civil, proteção ao voo e previsão imediata de tempo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Para a realização deste estudo foram obtidos os dados dos radares meteorológicos banda S de São Roque do DECEA e de Bauru do IPMET. A área de estudo está localizada dentro do raio de 150 km, dos radares. O radar de São Roque localiza-se a 1147 m de altitude, coordenadas de 23° 36' de latitude sul e 47° 06' de longitude oeste. O radar de Bauru está situado a uma altitude

de 624 m nas coordenadas de 22° 22' de latitude sul e 49° 02' de longitude oeste.

As estratégias de varreduras volumétricas para os radares meteorológicos de São Roque (15 elevações) e Bauru (16 elevações) estão representadas na Figura 1 considerando-se uma atmosfera em condições de refração padrão.

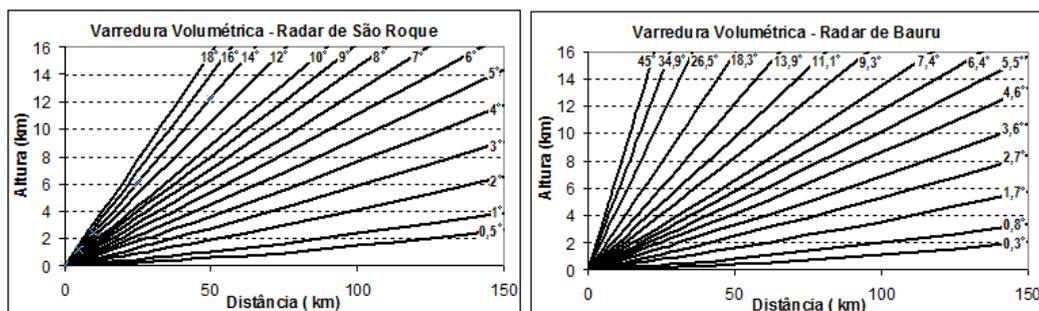


Figura 1 – Receitas de varredura para obtenção do volume tridimensional de dados.

O período utilizado para a pesquisa foi o de novembro e dezembro de 2005, janeiro de 2006, novembro e dezembro de 2006, totalizando 4171 varreduras volumétricas a cada 15 minutos para o radar de São Roque. O período dos dados do radar de Bauru foi o mês de dezembro de 2006 a partir do dia 25, e os meses de janeiro, fevereiro e março de 2007 correspondentes a 14217 varreduras volumétricas a cada 8 minutos.

O arquivo volumétrico de dados do radar apresenta informações do ângulo de azimute, elevação e distância de cada volume iluminado (bin) onde estão os hidrometeoros. Através da utilização de algoritmos, as coordenadas polares são transformadas em coordenadas cartesianas, pelo processo chamado de ‘Método de Amostragem Tridimensional’ (ANAGNOSTOU et al., 2000). Nesse método, o espaço tridimensional em coordenadas polares é preenchido com ‘cubos’ em coordenadas cartesianas. Assim, cada cubo recebe determinado peso, de acordo com a relação entre seu volume e o volume ocupado pelo bin. Se o volume de um cubo, corresponde a 50% do volume do bin, então receberá como peso o valor 0,5, se o volume englobar todo o bin, receberá como peso o valor 1,0. Portanto obtém-se uma distribuição espacial das refletividades dos ecos formando uma grade cartesiana de 2 km de resolução horizontal, com 15 níveis de altitude variando entre 2 até 16 km. Cada nível de altitude é denominado de CAPPI – *constant altitude plan position indicator*. Após a obtenção dos CAPPIs, fez-se uma filtragem dos dados de refletividades, para diminuição dos ruídos, causados provavelmente por problemas mecânicos de funcionamento do radar (QUEIROZ et al., 2008). Os valores de refletividades medidos com o radar de Bauru foram ajustados em + 6 dBZ e os de São Roque em – 7 dBZ. Estes ajustes foram determinados através dos trabalhos de comparação entre os valores de

refletividade obtidos dos radares localizados em solo e aqueles derivados do satélite TRMM (ANAGNOSTOU et al., 2000 e COSTA, 2007).

2.2. Obtenção das curvas de expansão

A fim de caracterizar as estruturas precipitantes foram definidos novos limiares para os campos de VIL e de refletividades que seriam monitoradas pelo sistema FORTRACC. No caso do campo de VIL, utilizou-se o limiar de 10 kg m^{-2} para separar os núcleos de maior intensidade na região do radar. Breidenbach et al. (1995) utilizaram o limiar de 10 kg m^{-2} como valor inicial na investigação de potencial de tempo severo. Para o campo de refletividades, foi escolhido o CAPPI de 3 km (pois fornece uma boa estimativa da precipitação que atinge o solo) e o limiar de 20 dBZ, correspondente a uma precipitação de $0,65 \text{ mm h}^{-1}$ pela relação Z-R de Marshall e Palmer (1948). Em seguida, com a definição destes limiares são gerados aglomerados de pixels (clusters) de $2 \times 2 \text{ km}^2$, para todas aquelas estruturas cujo tamanho em pixels seja igual ou superior a um valor mínimo, definido como 10. A partir dos trabalhos de Machado e Laurent (2004), para observar a tendência de crescimento e desenvolvimento das estruturas precipitantes, foi feito um estudo estatístico baseado na classificação em grupo das estruturas de VIL e de refletividade, de acordo com o tempo total de seu ciclo de vida. Para cada classificação foi calculado o valor médio de expansão inicial, o tempo em que o parâmetro $1/A * (\partial A / \partial t)$ esteve próximo a zero (mínima expansão) e o tempo de finalização da estrutura de VIL. O resultado do estudo estatístico é um conjunto de curvas com o valor de $1/A * (\partial A / \partial t)$ – expansão da área média da estrutura em um intervalo de 15 minutos, para cada grupo ou família, de acordo com o tempo total do seu ciclo de vida: menor que 0,75 horas, entre 0,75 e 1,64 horas e acima de 1,64 horas, conforme indicado na Figura 2 para os campos de VIL.

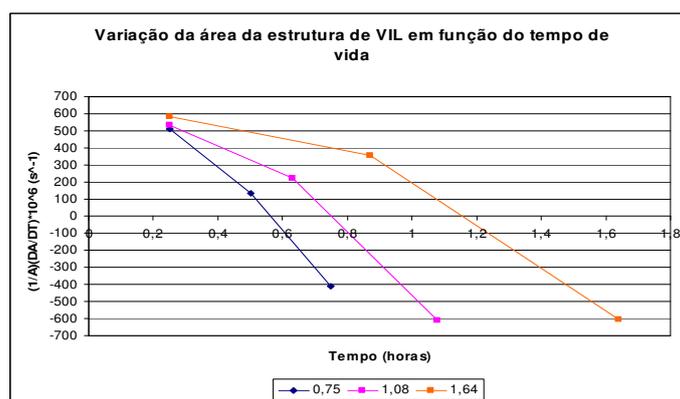


Figura 2 – Variação relativa da área com o tempo de acordo com o tempo de vida das estruturas de VIL. Valores positivos indicam crescimento, valores negativos significam decréscimo das estruturas de VIL.

Com relação aos campos de refletividades foram obtidas as seguintes curvas, de acordo de acordo com o tempo total do seu ciclo de vida: menor que 0,75 horas, entre 0,75 e 1,09 horas e acima de 1,73 horas, conforme a Figura 3.

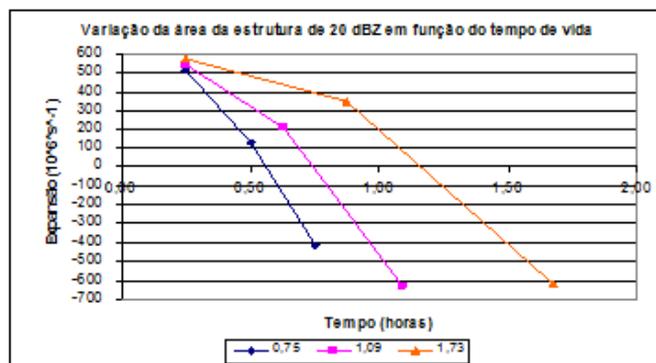


Figura 3 – Variação relativa da área com o tempo de acordo com o tempo de vida das estruturas precipitantes. Valores positivos indicam crescimento, valores negativos significam decréscimo das estruturas de 20 dBZ.

Para o levantamento das curvas, e com o objetivo de obter-se um conjunto mais homogêneo para estudar as características físicas, foram selecionadas as famílias que não sofreram o processo de divisão ou fusão. Posteriormente foram excluídas as famílias com nascimento dentro da borda de 10 km da área de cobertura do radar, pois estas famílias poderiam afetar a estatística sobre os parâmetros morfológicos do sistema, já que parte dela poderia estar fora dos limites considerados na imagem, e também, a fim de evitar que as estruturas que tiveram o nascimento fora da imagem, ao penetrar na área de cobertura, fossem caracterizadas como sistemas novos em expansão. Adicionalmente se exigiu que as famílias tivessem ao menos 4 membros, isto é, tempo de vida de pelo menos 45 minutos (0,75 horas). Para o período de estudo, e após a filtragem, foram selecionadas 114 famílias para os campos de *VIL* e 103 famílias para os campos de refletividade, para as quais foram levantadas as curvas de expansão das Figuras 2 e 3.

2.3. Índice de Severidade

Tempo severo foi definido para este trabalho, como qualquer evento meteorológico que causou algum tipo de dano à superfície como granizo (GRZ), ventos de rajada (RJD), cisalhamento do vento – *windshear* (WS), enchentes ou alagamentos (ALAG). Nos dados obtidos de granizo não havia informação do diâmetro. Uma boa discussão sobre definição de tempo severo no Brasil, com uma revisão atualizada dos parâmetros convectivos, pode ser encontrada no trabalho de Nascimento (2005). Na seleção dos 20 casos, para a análise do período de ocorrência do evento,

considerou-se 45 minutos antes do evento ter início e 45 minutos depois do evento ter terminado. Os eventos indicados não foram todos aqueles que ocorreram durante o período de estudo, mas sim aqueles para os quais havia dados disponíveis de radar.

Os parâmetros analisados para a obtenção do índice de severidade foram o *VIL*, a densidade de *VIL* (*DVIL*), máxima refletividade vertical (*MAX REF*), altura da máxima refletividade (*ALT MAX REF*) e a diferença de altura entre o nível de 45 dBZ e o nível de congelamento (0°C), daqui em diante denominada de altura de Waldvogel (1979) (*ALT WALDVOGEL*) para caracterizar células com potencial para produzir granizo. Dos 20 casos selecionados de tempo severo, 10 serviram como controle e 10 foram utilizados para testar os parâmetros de severidade. Para cada caso de tempo severo foram analisados os campos de *VIL* de 45 minutos, antes da hora de ocorrência do caso significativo até 45 minutos depois. Foi identificada com o *FORTRACC*, a família responsável pela ocorrência do evento. Baseando-se no valor de *VIL* máximo da estrutura precipitante, tomou-se a média dos pixels: de máximo valor e dos 4 pixels vizinhos com maiores valores de *VIL*. Fez-se isso para todos os outros parâmetros. Assim, obteve-se uma evolução dos parâmetros com o tempo, 45 minutos antes da ocorrência do evento severo até 45 minutos depois, conforme mostrado na Figura 4, para os 10 casos selecionados como controle. Os valores dos parâmetros indicados estão normalizados. O horário da ocorrência do evento está indicado pelo tempo 0.

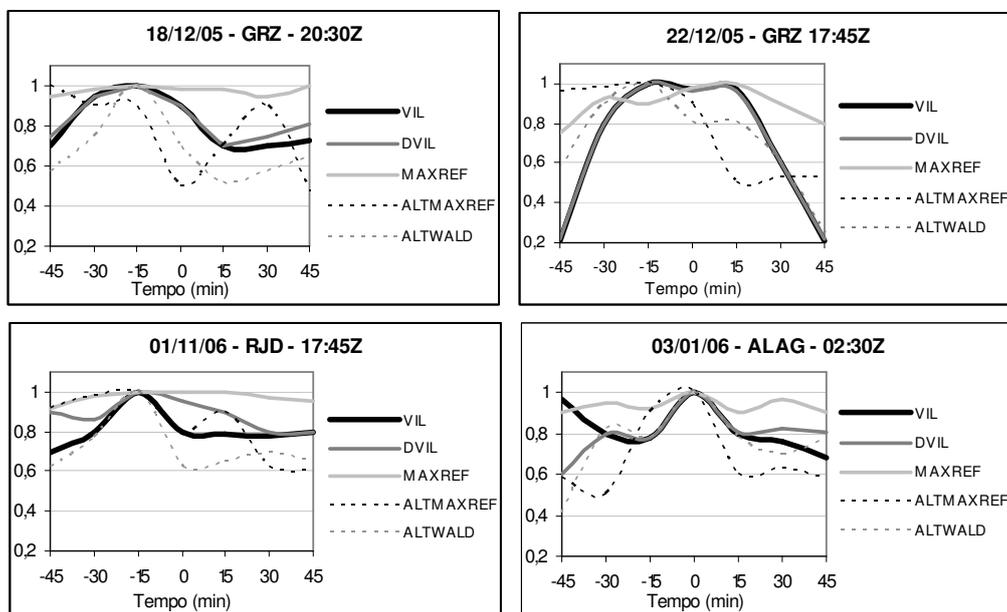


Figura 4 – Evolução temporal dos parâmetros para os 10 casos de controle.

(continua)

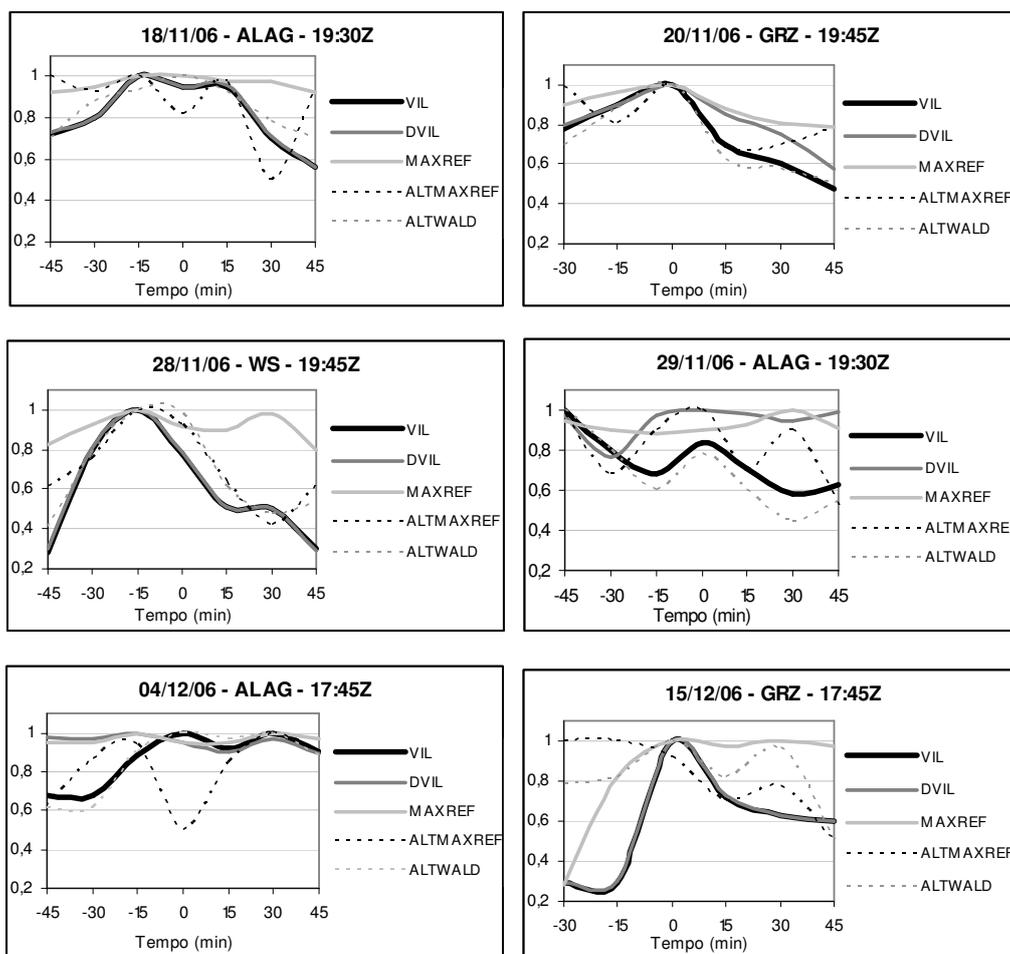


Figura 4 – Conclusão.

De maneira geral estes gráficos mostram um acréscimo dos valores dos parâmetros antes do horário do evento e um decréscimo depois da ocorrência do evento. Os máximos valores dos parâmetros de quase todos os casos, encontram-se dentro do intervalo de tempo entre 15 minutos antes do registro do evento e 15 minutos após a ocorrência.

Em seguida, foram analisados os parâmetros para o horário de ocorrência do evento severo. Com os dados dos 10 casos selecionados de controle, foram obtidos os limiares mínimos para os parâmetros de severidade, para que um pixel fosse caracterizado como de tempo severo. Utilizou-se como limiares mínimos a média menos 1,5 vezes o desvio padrão, de cada limiar, como mostrado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Parâmetros para os 10 casos considerados de controle.

| | 18/12/05 | 22/12/05 | 03/01/06 | 01/11/06 | 18/11/06 | 20/11/06 | 28/11/06 | 29/11/06 | 04/12/06 | 15/12/06 |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Parâmetro | GRZ | GRZ | ALAG | RJD | ALAG | GRZ | WS | RJD | ALAG | GRZ |
| VIL(kg/m ²) | 32,4 | 45,4 | 30,6 | 26,9 | 47,5 | 61,4 | 26,8 | 41,8 | 34,5 | 63 |
| DVIL(g/m ³) | 2 | 2,8 | 1,9 | 2,2 | 3 | 3,8 | 1,7 | 2,6 | 2,2 | 3,9 |
| MAX REF(dBZ) | 55,1 | 59,1 | 56,6 | 55,4 | 57,8 | 64 | 53,5 | 54,8 | 55,2 | 60,2 |
| ALT MAX REF(km) | 5,6 | 6,6 | 5,6 | 4,8 | 3,2 | 7,6 | 7 | 8,6 | 5 | 8,8 |
| ALT WALD(km) | 5,7 | 7,4 | 4,8 | 4 | 9,8 | 9,2 | 7,1 | 10,5 | 8,9 | 11,3 |
| ÍNDICE | 1,4 | 1,8 | 1,3 | 1,2 | 1,7 | 2,2 | 1,4 | 2 | 1,6 | 2,4 |

Tabela 2 – Limiares para o cálculo do índice de severidade

| Parâmetro | Média (M) | Desvio Padrão (DP) | M-1,5DP |
|-------------------------|-----------|--------------------|---------|
| VIL(kg/m ²) | 41 | 13,3 | 21,1 |
| DVIL(g/m ³) | 2,6 | 0,8 | 1,4 |
| MAX REF(dBZ) | 57,2 | 3,2 | 52,4 |
| ALT MAX REF(km) | 6,3 | 1,8 | 3,6 |
| ALT WALD(km) | 7,9 | 2,5 | 4,2 |

Na sequência foram atribuídos pesos iguais para cada parâmetro e foi obtida a Equação 1 com os 10 casos de controle:

$$\text{ÍNDICE} = \frac{VIL(kg / m^2)}{5 \times 21} + \frac{DVIL(g / m^3)}{5 \times 1,4} + \frac{MAXREF(dBZ)}{5 \times 52} + \frac{ALTMAXREF(km)}{5 \times 3,6} + \frac{ALTWALDVOGEL(km)}{5 \times 4,2} \quad (1)$$

Assim, com o estudo para os 10 casos de controle, podemos dizer que um *pixel* pode ser considerado com potencial para tempo severo, quando o seu índice de severidade for igual ou maior que 1,2. Esse índice foi aplicado para os 10 casos de teste e conseguiu identificar 90% dos eventos de tempo severo, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo do índice de severidade para o conjunto de teste.

| | 04/11/05 | 23/11/05 | 21/12/05 | 24/12/05 | 10/01/06 | 11/01/06 | 06/11/06 | 25/11/06 | 27/11/06 | 06/12/06 |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Parâmetro | GRZ | GRZ | ALAG | ALAG | GRZ | GRZ | RJA | RJA | RJD | GRZ |
| VIL(kg/m ²) | 39,5 | 27,0 | 38,6 | 45,4 | 22,1 | 45,1 | 38,4 | 59,9 | 56,5 | 37,4 |
| DVIL(g/m ³) | 2,6 | 1,7 | 2,4 | 2,8 | 1,4 | 2,8 | 2,6 | 3,7 | 3,5 | 2,3 |
| MAX REF(dBZ) | 58,8 | 53,4 | 42,5 | 61,5 | 51,2 | 55,5 | 55,6 | 57,6 | 60,1 | 56,8 |
| ALT MAX REF(km) | 7,0 | 7,0 | 10,0 | 8,0 | 5,0 | 7,0 | 6,0 | 7,0 | 10,0 | 5,0 |
| ALT WAL(km) | 5,3 | 6,8 | 7,2 | 9,6 | 5,1 | 8,8 | 6,1 | 11,6 | 11,6 | 6,1 |
| Índice | 1,6 | 1,4 | 1,8 | 2,0 | 1,1 | 1,9 | 1,6 | 2,3 | 2,4 | 1,5 |

2.4. Índice de Severidade Dinâmico

Browning (1977) observou que alguns estágios do ciclo de vida de tempestades ordinárias (ou simples) apresentam duração entre 15-30 minutos. Assim, 30 minutos antes da ocorrência de determinado evento severo, uma nuvem de tempestade pode estar em seus estágios iniciais, caracterizando-se pela variação do topo e expansão da área da nuvem positivas. Baseando-se nisso, mais dois parâmetros foram incluídos no cálculo do índice de severidade: a variação do topo de 20 dBZ (DH/DT) e expansão (EXP) de 30 minutos antes do horário de ocorrência do evento. Esse novo índice foi denominado de índice dinâmico ($INDICE_{din}$). O DH/DT foi calculado da mesma maneira como foram obtidos os outros parâmetros (seção anterior). A expansão foi obtida diretamente da saída do *FORTRACC*, identificando a família, na qual o sistema que produziu o evento severo estava incluído. Utilizou-se dos 10 casos considerados como controle na seção anterior. Alguns valores de DH/DT e EXP de 30 minutos antes da hora do evento severo, não foram incluídos, pois não foi possível o cálculo (DH/DT) por falta do valor inicial, ou não foi possível identificar a família a qual pertencia a estrutura precipitante. Assim, obtiveram-se os valores médios, desvios padrões para DH/DT e EXP conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios e desvio padrão dos parâmetros do índice dinâmico

| Parâmetro | Média (M) | Desvio Padrão (DP) | M - (0,5 X DP) |
|---------------------------|-----------|--------------------|----------------|
| DH/DT (m/s) | 3,51 | 4,45 | 1,29 |
| EXP (1/s).10 ⁶ | 775,98 | 300,84 | 625,55 |

Pode-se notar que o desvio padrão dessas variáveis dinâmicas são relativamente altas e portanto, após alguns testes, optou-se por utilizar como limiares de tempo severo, os valores correspondentes a média menos 0,5 vezes o desvio padrão.

Em seguida, os limiares foram normalizados e ponderados. A Equação 2 utilizada para determinação do índice dinâmico é mostrada abaixo:

$$\begin{aligned}
 \text{ÍNDICE}_{din} = & \frac{VIL(kg / m^2)}{7 \times 21} + \frac{DVIL(g / m^3)}{7 \times 1,4} + \frac{MAXREF(dBZ)}{7 \times 52} + \frac{ALTMAXREF(km)}{7 \times 3,6} + \\
 & + \frac{ALTWALDVOGEL(km)}{7 \times 4,2} + \frac{DH/DT(m/s)}{7 \times 3,5} + \frac{EXP(s^{-1} \times 10^6)}{7 \times 776}
 \end{aligned} \quad (2)$$

O índice dinâmico foi aplicado para cinco casos considerados como controle. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Índice dinâmico calculado para 5 casos de controle.

| Caso | 18/12/2005 | 22/12/2005 | 03/01/2006 | 01/11/2006 | 18/11/2006 |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Índice Dinâmico | 0,82 | 1,36 | 1,17 | 0,89 | 1,11 |

Considera-se o pixel severo quando o valor do índice dinâmico for maior que 0,82. Em seguida, o índice foi testado para 5 casos, mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Índice dinâmico testado para 5 eventos de tempo severo.

| Caso | 24/12/2005 | 10/01/2006 | 11/01/2006 | 25/12/2006 | 27/11/2006 |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Índice Dinâmico | 0,98 | 0,78 | 1,27 | 1,19 | 1,57 |

Observa-se que o índice dinâmico conseguiu determinar 4 dos cinco casos severos testados obtendo um acerto de 80%.

3. RESULTADOS

3.1. Simulação do *FORTRACC-VIL* para um caso selecionado

O radar de São Roque fornece imagens a cada 15 minutos e neste caso o *FORTRACC* foi adaptado para gerar previsões (imagens virtuais com base na evolução do ciclo de vida de cada uma das estruturas de VIL) até 45 minutos, já que acima desse tempo, a qualidade das imagens virtuais é muito baixa e assim, optou-se por limitar a previsão para esse intervalo.

Como exemplo, escolheu-se uma família do dia 25 de novembro de 2006, com duração de uma hora, início as 20:00Z e dissipação as 21:00Z. Primeiramente retirou-se a imagem das 20:30Z e depois a das 20:45Z. Foi observado como o *FORTRACC* estimou o tamanho (em pixels) para os dois casos faltantes. Os resultados estão mostrados na Figura 5, onde também estão indicados os valores reais para os números de pixels das imagens faltantes.

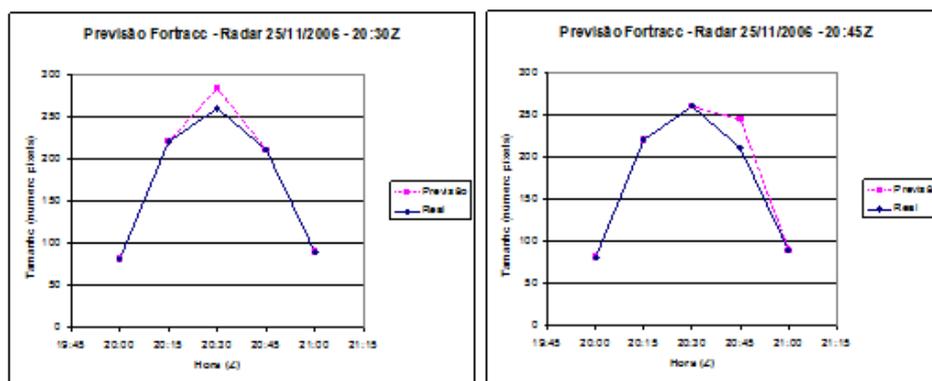


Figura 5 - Esquerda: Previsão para 20:30Z do tamanho (número de pixels) da estrutura de *VIL*, ocorrida em 25/11/2006. Direita: idem anterior para 20:45Z.

Analisando-se as imagens observa-se que o *FORTRACC* capturou a tendência de crescimento (decréscimo) para o horário das 20:30Z (20:45Z), contudo, o *FORTRACC* tende a superestimar a previsão dos tamanhos em pixels das estruturas de *VIL*, conforme indicado na Figura 5 à direita.

Um caso selecionado de tempo severo ocorreu no dia 29 de novembro de 2006, onde foi registrado 8 pontos de alagamento na cidade de São Paulo, segundo o Centro de Gerenciamento de Emergências (CGESP). A Figura 6 mostra a previsão realizada com o *FORTRACC* para os campos de *VIL*, nos horários: 19:30Z, 19:45Z e 20:00Z, correspondendo as previsões de 15, 30 e 45 minutos, respectivamente. Também estão indicados as condições reais observadas para os mesmos horários, dentro da área de cobertura de 150 km de raio do Radar de São Roque. Nota-se que a previsão para 15 minutos é a mais precisa, e conforme o tempo de previsão aumenta, a qualidade da previsão diminui. Na Figura 6 estão indicadas as direções de deslocamento das estruturas de *VIL* para a previsão e para os dados reais.

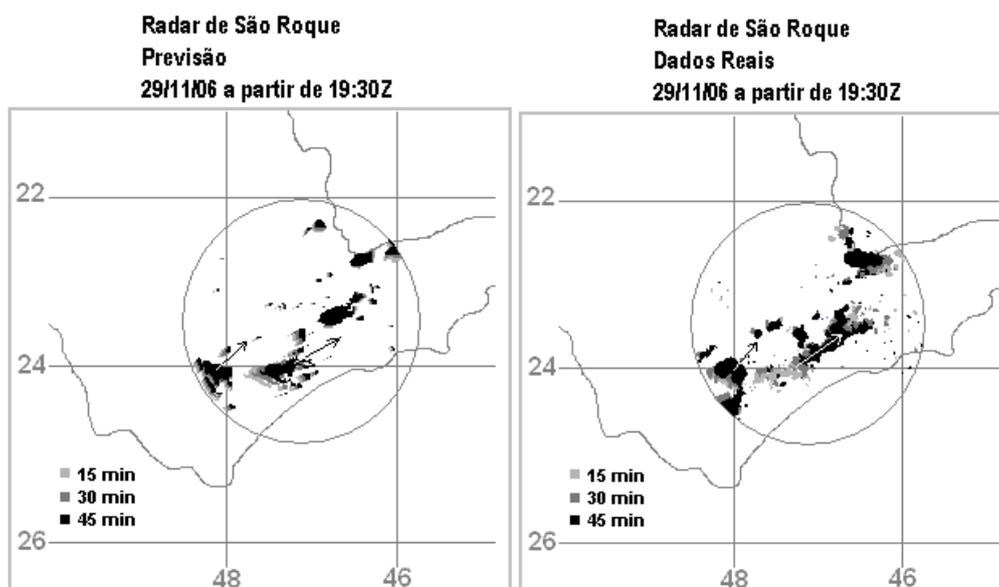


Figura 6 – Campos de *VIL* previstos com o *FORTRACC* e dados reais obtidos para o Radar de São Roque no dia 29 de novembro de 2006, entre 19:30Z e 20:00Z. O raio de 150 km está indicado.

3.2. Simulação do *FORTRACC*-dBZ para um caso selecionado

Do mesmo modo como foi feito no teste realizado com imagens faltantes para o *FORTRACC-VIL*, foi escolhida uma família do dia 03 de dezembro de 2005 com duração de duas horas e quinze minutos, que teve início as 01:30Z para o teste com o *FORTRACC*-dBZ. Retirou-se a imagem das 03:15Z para estudar a previsão de tamanho de pixels. O resultado é mostrado na Figura 7.

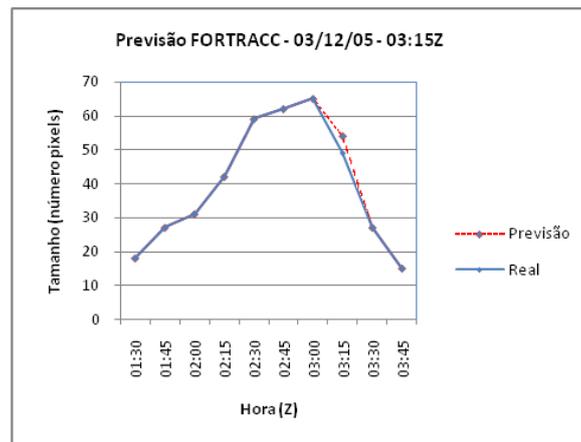


Figura 7 - Previsão para 03:15Z do tamanho (número de pixels) da estrutura de 20 dBZ, ocorrida em 03/12/2005.

Observa-se que o *FORTRACC*-dBZ tende a superestimar a quantidade de número de pixels para uma imagem faltante, assim com observado para o *FORTRACC-VIL*, embora acerte corretamente a tendência.

Para verificar como o *FORTRACC*-dBZ estava fazendo a previsão para 15, 30 e 45 minutos a partir da última imagem, fez-se uma simulação para o caso do dia 03 de dezembro de 2005 para o radar de São Roque. A previsão foi feita para os seguintes horários: 02:30Z, 02:45Z e 03:00Z. A Figura 8 indica como ficou a previsão para estruturas precipitantes de 20 dBZ. O raio de 150 km do radar também aparece indicado. Uma parte da figura aparece em destaque para melhor visualização das estruturas. A direção do movimento está indicada através de vetores. As imagens reais também foram produzidas para os mesmos horários. Observa-se que o *FORTRACC*-dBZ conseguiu indicar o sentido de deslocamento das estruturas de 20 dBZ.

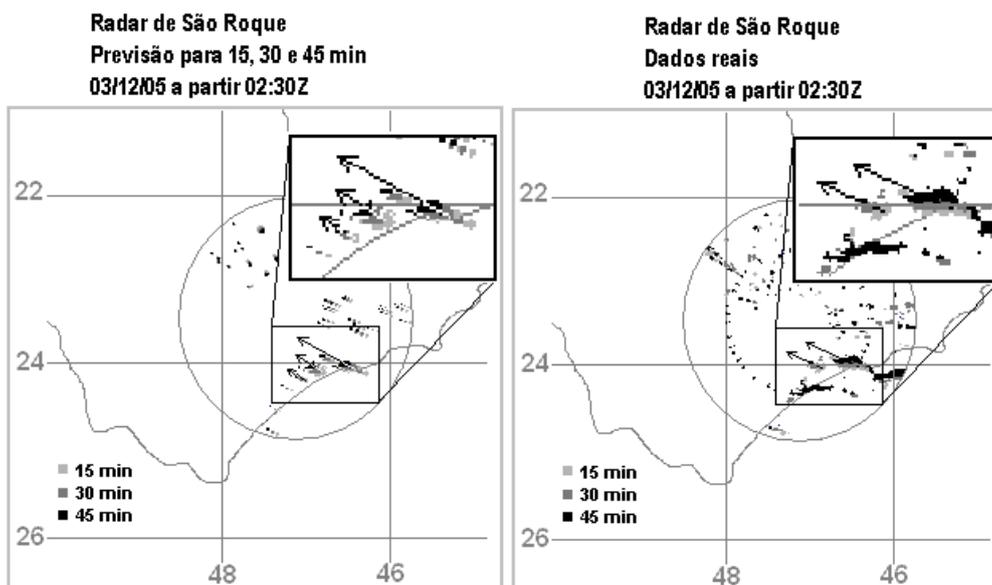


Figura 8 – Campos de dBZ previstos com o *FORTRACC* e dados reais obtidos para o Radar de São Roque no dia 03 de dezembro de 2005, entre 02:30Z e 03:00Z. O raio de 150 km está indicado.

3.3. Campos de frequências do índice de instabilidade

Os campos de frequências foram obtidos dentro da área de cobertura qualitativa do radar meteorológico, entre 46 e 150 km de raio. O raio de 46 km representa o limite do “cone cego” do radar na *CAPPI* de 16 km de altura. O raio de 150 km representa um limite a partir do qual o feixe do radar fica acima de 3,7 km, quando apresenta um ângulo de elevação de 0,5 graus, considerando-se a atmosfera com índice de refletividade padrão. Portanto, começa a haver perdas significativas na integração do conteúdo de água líquida utilizada no cálculo do *VIL*, para distâncias maiores que 150 km do radar. Também foi estudado como cada parâmetro sofria influência da distância ao radar. Assim, foram calculadas curvas para ajustar e diminuir a influência da distância para cada parâmetro.

Uma vez ajustados todos os parâmetros que compõem o índice de severidade aplicado ao radar de São Roque, fez-se um campo de frequências de ocorrência do índice. Nesse campo foi plotado o número de vezes que cada pixel teve o valor do índice considerado como severo (acima de 1,2), durante o período equivalente ao tempo de estudo. Alguns pixels não foram considerados severos durante todo o período do estudo, portanto aparecem em branco no campo de frequências, como mostrado na Figura 9.

Frequência do Índice de Severidade – Radar de São Roque

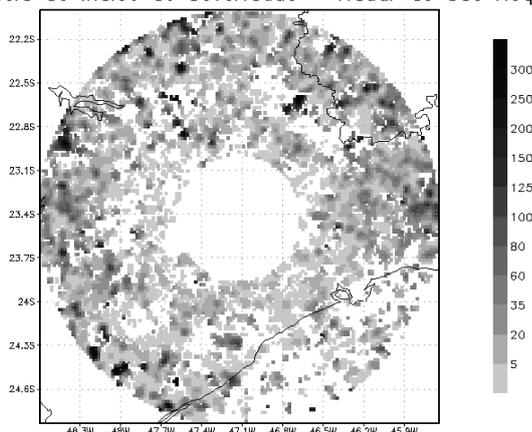


Figura 9 – Campo de frequência do índice de severidade para o radar de São Roque.

Na Figura 9 nota-se que sobre o oceano, ocorre uma diminuição da frequência de ocorrência do índice de severidade, que pode ser explicado pela ausência de rugosidade do relevo em relação às áreas continentais. Alguns poucos pixels aparecem com uma grande frequência de ocorrência de tempo severo, indicados por pontos mais escuros no campo, todos sobre a região continental, e em algumas regiões como a sudoeste do radar, caracterizado pela ausência de grandes áreas urbanas.

Da mesma forma que foi feito para os dados do radar de São Roque fez-se um campo de frequências de ocorrência do índice de severidade para o radar de Bauru. Nesse campo foi plotado o número de vezes que cada pixel teve o valor do índice considerado como severo, durante o período equivalente ao tempo de estudo. Alguns pixels não foram considerados severos durante todo o período do estudo, portanto aparecem em branco no campo de frequências, como mostrado na Figura 10.

Frequência do Índice de Severidade – Radar de Bauru

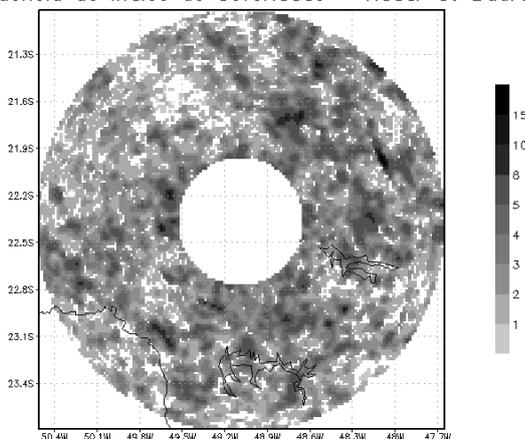


Figura 10 – Campo de frequência do índice de severidade para o radar de Bauru.

A Figura 10 mostra aqueles pixels que tiveram uma maior frequência de ocorrência de tempo severo. Nota-se que os pixels mais frequentes estão bem distribuídos no campo. Não fica nítida a influência do relevo, grandes corpos de água, ou presença de mancha urbana, na distribuição do índice de severidade para o radar de Bauru. Outro fator que certamente influi na comparação dos campos dos dois radares é a diferença de tempo entre a geração das imagens de radar. Enquanto cada imagem do radar de São Roque é gerada a cada 15 minutos, esse intervalo é de apenas 8 minutos para o radar de Bauru. Assim, o efeito do deslocamento de sistemas convectivos individuais, que cria no campo de frequência do índice de severidade, estruturas alongadas de frequências mais altas, é mais observado no campo do radar de Bauru, conforme pode ser observado a nordeste do radar, na Figura 10.

3.4. Aplicação do Índice de Severidade para o Radar de São Roque

O índice de severidade foi aplicado num caso de tempo severo ocorrido no dia 10 de abril de 2008, as 19:15Z, onde a região de São José dos Campos foi atingida por uma forte tempestade de granizo. Na Figura 11 estão destacados onde os valores do índice de severidade ultrapassaram 1,2 indicando aquelas regiões com potencialidade para desenvolver tempo severo.

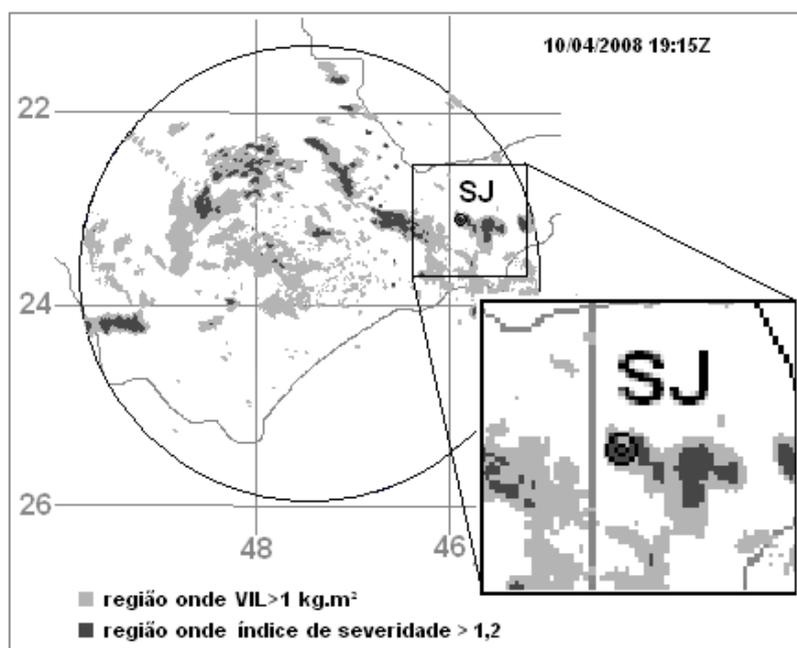


Figura 11 – Radar de São Roque (250 km de raio). Em destaque observa-se que a região de São José dos Campos apresenta valores com índice de severidade > 1,2.

Portanto observa-se através da Figura 11, que o índice de severidade conseguiu identificar os pixels considerados severos na cidade de São José dos Campos, onde ocorreu a tempestade de granizo.

3.6. Aplicação do Índice de Severidade para o Radar de Bauru

O índice de severidade foi aplicado num caso de tempo severo ocorrido no dia 27 de fevereiro de 2007, onde foi registrado no código METAR das 22:00Z no aeródromo de Araraquara, o tempo presente de trovoada com chuva forte restringindo a visibilidade para apenas 1000 m. A Figura 12 mostra em destaque, onde os valores do índice de severidade ultrapassaram 1,2 indicando aquelas regiões com potencialidade para tempo severo.

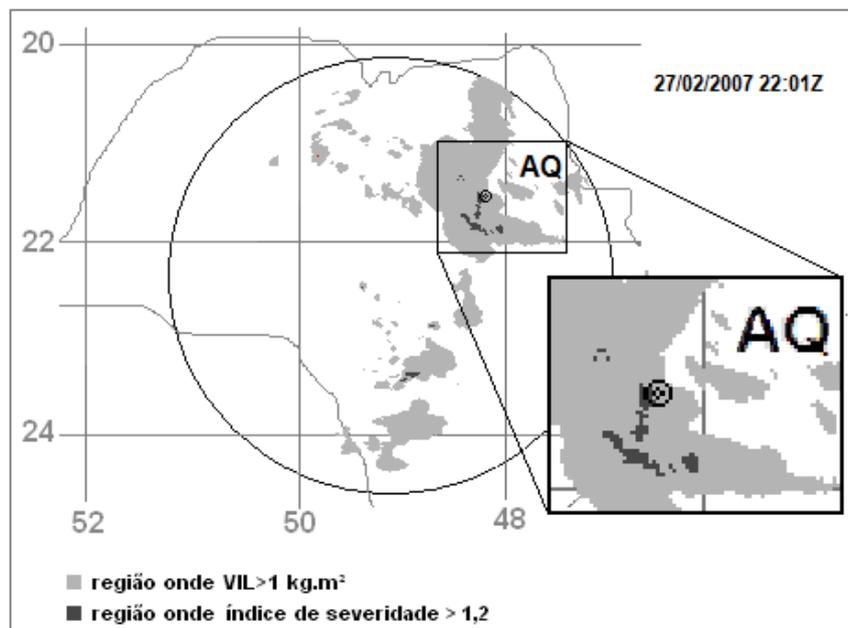


Figura 12 – Radar de Bauru (240 km de raio). Em destaque observa-se que a região de Araraquara apresenta valores com índice de severidade > 1,2.

Portanto observa-se através da Figura 12, que o índice de severidade conseguiu identificar os pixels considerados severos na cidade de Araraquara, onde ocorreu a trovoada com chuva forte no aeródromo.

4. CONCLUSÃO

Novas ferramentas podem ser utilizadas para ajudar a sociedade no monitoramento de estruturas de tempo severo, que são responsáveis pelos desastres naturais como furacões, enchentes, deslizamentos de terra, tempestades de granizo, etc. Essas ferramentas são o *FORTRACC-dBZ*, *FORTRACC-VIL* e o índice de severidade.

O *FORTRACC-dBZ* e o *FORTRACC-VIL*, devido a sua melhor resolução (2X2 km²) quando comparado ao *FORTRACC* utilizado com dados de satélite (4X4 km²), consegue monitorar o rápido crescimento inicial das estruturas precipitantes no radar apresentando um crescimento de

expansão inicial aproximadamente entre 500×10^{-6} e $600 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ de acordo com o tempo de duração do ciclo de vida inicial.

As curvas de expansão do *FORTRACC*-radar, capturaram a tendência de crescimento ou decréscimo do tamanho das estruturas precipitantes para os casos estudados, contudo, o *FORTRACC*-radar tende a superestimar a previsão do tamanho dos pixels das estruturas de *VIL* e *dBZ*. Esse efeito tende a diminuir à medida que tenhamos um aumento do número de dados, e com isso, uma maior quantidade de famílias com ciclos de vida característicos, resultando na melhoria das curvas de expansão.

Nota-se que a evolução da direção de propagação foi bem descrita pelo *FORTRACC* adaptado para imagens de radar nos exemplos estudados, indicando que o *FORTRACC* continua sendo uma ótima ferramenta de monitoramento de estruturas precipitantes que podem causar tempo severo, podendo ser utilizado como auxílio aos meteorologistas, em diversas áreas, desde a prevenção de danos para a agricultura, ou no gerenciamento de desvios de tráfego aéreo para evitar áreas com instabilidade.

O uso dos modelos de previsão imediata, *FORTRACC-VIL* e *FORTRACC-dBZ* precisa ser validado para um número maior de situações e avaliado por previsores quando em operação em tempo real.

Observando-se a evolução dos parâmetros com o tempo que compõem o índice de severidade, verifica-se que os parâmetros *VIL* e *DVIL* apresentaram valores máximos 15 minutos antes do evento (5 casos dos 10 de controle) ou na hora do registro (3 casos dos 10 de controle), indicando claramente relação desses parâmetros com a fase da tempestade. A diminuição do *VIL/DVIL* pode estar relacionada ao aumento das correntes descendentes no início da fase de dissipação das tempestades. Os outros parâmetros evoluíram com o tempo apresentando valores máximos dentro do intervalo de tempo entre 15 minutos antes e 15 minutos depois do registro de ocorrência do tempo severo, com valores normalizados acima de 0,8 dos respectivos valores máximos.

O índice de severidade proposto nesse trabalho apresentou resultados bastante satisfatórios. Certamente esses índices devem ser validados e ajustados através de uma base maior de eventos extremos, levando em conta a sazonalidade e os tipos de eventos sinóticos.

Como sugestão para trabalhos futuros poderiam ser incluídos pesos no cálculo do índice de severidade. O parâmetro altura de Waldvogel, que determina a espessura entre o nível de congelamento e o nível de 45 *dBZ* poderia ser testado com um peso superior aos demais parâmetros, pois a altura da camada de gelo está intimamente relacionada ao tamanho do granizo. O parâmetro *MAX REF* apresentou a menor variação com o tempo nos casos

estudados, assim, para esse parâmetro, poderia ser atribuído um peso menor no cálculo do índice de severidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) pela disponibilização dos dados dos radares meteorológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAGNOSTOU, E. N.; MORALES, C. A.; DINKU, T. The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 18, p. 616-628, 2000.

ANGELIS, C. F.; MACHADO, L. A. T.; MORALES, C. A.; SILVA, S. A. A.; HENRIQUES, C. R.; NOGUEIRA, J. Rede de radares meteorológicos: ação conjunta DECEA - INPE/CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIV - (CBMET), Florianópolis, SC. Proceedings... 2006. CD-ROM; Papel. (INPE-14534-PRE/9565). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtcm17@80/2006/12.21.21.02>>. Acesso em: 29 jan. 2009.

BREIDENBACH, J. P.; KITZMILLER, D. H.; MCGOVERN, W. E.; SAFFLE, R. E. The use of volumetric radar reflectivity predictors in the development of a second-generation severe weather potential algorithm. *Weather Forecasting*, v. 10, p. 269-379, 1995.

BROWNING, K. A. The structure and mechanisms of hailstorms. *Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression*, Meteor. Monogr., n. 38. Bulletin of the American Meteorological Society, p. 1-43, 1977.

COSTA, I. C. Avaliação dos dados produzidos pela rede de radares meteorológicos de banda "S" localizados no centro sul do Brasil. 2007. 139 p. (INPE-14986-TDI/1273). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.11.09>>. Acesso em: 02 fev. 2009.

DONALDSON, R. J. Radar Reflectivity Profiles in Thunderstorms, *Journal of Meteorology*, Vol.18, p. 292, 1960.

GREENE, D. R.; CLARK, R. A. Vertically integrated liquid water - a new analysis tool. *Monthly Weather Review*, n.100, p. 548-552, 1972.

MACHADO, L. A. T., ROSSOW, W. B., GUEDES, R. L. and WALKER, A. Life cycle variations of convective systems over the Américas, *Monthly Weather Review*, Vol. 126, 1630-1654, 1998.

MACHADO, L. A. T., LAURENT, H. The convective system area expansion over Amazonia and its relationships with convective system life duration and high-level wind divergence. *Monthly Weather Review*, v. 132, p. 714-725, 2004.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se de parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.1, p. 121-140, 2005.

QUEIROZ, A. P., MACHADO, L. A. T. Comparação de dados produzidos por radares meteorológicos banda S localizados na Região Sudeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XV - (CBMET), São Paulo, SP. Proceedings... 2008. CD-ROM, 2008.

WALDVOGEL, A.; FEDERER, B.; GRIMM, P., Criteria for the detection of hails cells. *Journal of Applied Meteorology*, v. 18, n. 12, p. 1521-1525, 1979.