



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14986-TDI/1273

**AVALIAÇÃO DOS DADOS PRODUZIDOS PELA REDE DE
RADARES METEOROLÓGICOS DE BANDA “S” LOCALIZADOS
NO CENTRO SUL DO BRASIL**

Izabelly Carvalho da Costa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo
Dr. Carlos Frederico de Angelis, aprovada em 13 de agosto de 2007.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14986-TDI/1273

**AVALIAÇÃO DOS DADOS PRODUZIDOS PELA REDE DE
RADARES METEOROLÓGICOS DE BANDA “S” LOCALIZADOS
NO CENTRO SUL DO BRASIL**

Izabelly Carvalho da Costa

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelo
Dr. Carlos Frederico de Angelis, aprovada em 13 de agosto de 2007.

INPE
São José dos Campos
2007

551.5 (816)

Costa, I. C. da

Avaliação dos dados produzidos pela rede de radares meteorológicos de Banda "S" localizados no Centro Sul do Brasil / Izabelly Carvalho da Costa. - São José dos Campos: INPE, 2007.

136 p. ; (INPE-14986-TDI/1273)

1. Missão de Medição da Chuva Tropical (TRMM).
2. Radar meteorológico. 3. Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). 4. Meteorologia. 5. Radar de precipitação (PR). I. Título.

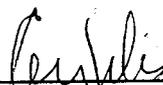
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dr. Luiz Augusto Toledo Machado



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Carlos Frederico de Angelis



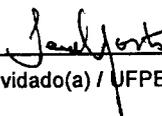
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Nelson Jesus Ferreira



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Paulo Roberto Pelufo Foster



Convidado(a) / UFPEL / Pelotas - RS

Aluno (a): Izabelly Carvalho da Costa

São José dos Campos, 13 de Agosto de 2007

À minha Família e

Ao André.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Carlos Frederico de Angelis, pela dedicação, paciência e amizade ao longo deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e a Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DSA, pela oportunidade de estudos e utilização de dados e instalações.

Ao Dr. Carlos Augusto Morales da USP, que não mediu esforços em apoiar este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo suporte financeiro recebido durante dois anos de mestrado.

Ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, pelo fornecimento dos dados de radares.

À secretaria da Pós-Graduação em Meteorologia, em especial a Lílian Escobar, pela eficiência e dedicação.

À minha família, mesmo distante, pelo apoio e incentivo constante.

Aos amigos, mesmo os mais distantes, pelo companheirismo e momentos de descontração.

Agradecimento especial ao André, que além de marido é um grande amigo, pelo apoio, amor, paciência e carinho.

Enfim a todos que colaboraram de forma direta ou indireta para elaboração deste trabalho.

RESUMO

Os dados de radares meteorológicos localizados na porção central, sudeste e sul do Brasil vêm sendo usados de forma sistemática pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), após a implantação do Convênio de Cooperação Técnico - Científico assinado por essas instituições em 2004. Antes desse convênio os dados eram aplicados na área de proteção ao voo, e eram aproveitados somente para o uso temporário. Após a implantação os produtos obtidos a partir da varredura volumétrica de cada radar são enviados a centros regionais pertencentes ao DECEA e a um centro nacional pertencente ao CPTEC/INPE. Atualmente três dos seis radares pertencentes ao DECEA já possuem um sistema de transmissão de dados via internet, o que permite que os seus dados brutos sejam enviados diretamente para o CPTEC/INPE. Porém, o uso em outras aplicações como estimativa de chuva e assimilação de dados em modelos de previsão de tempo e previsão imediata, exige que se tenha boa qualidade nos dados para que os resultados obtidos por essas aplicações tenham as menores incertezas possíveis. Desta forma, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a qualidade dos dados obtidos pelos radares do DECEA a partir da comparação com dados obtidos pelo radar a bordo da missão TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission). Os resultados mostraram que para a maioria dos radares estudados o GR (Ground Radar) tende a superestimar os valores de refletividade quando comparado com os dados obtidos pelo PR (Precipitation Radar). Para um caso particular, verificou-se que a diferença foi superior a 6 dBZ, valor considerado muito acima de 2 dBZ definido como limite aceitável. Foi possível concluir também que as principais diferenças observadas entre o PR e o GR são devido ao tempo na obtenção dos dados e que quanto mais próximo estiver o sistema precipitante do radar, melhor será a correlação e menor será a dispersão entre os dados por não haver grandes distorções na altura do sistema precipitante observado pelo GR.

EVALUATION OF THE DATA PRODUCED BY THE S BAND WEATHER RADARS NETWORK LOCATED IN CENTRAL SOUTHERN BRAZIL

ABSTRACT

Data from the weather radars located in central, southeastern and southern Brazil has been used by the CPTEC and DECEA since the agreement between both institutions was signed in 2004. Before this date the radar data was used by flight protection purposes only, and was not stored. Nowadays, the radar products derived from the scanning strategy of all radars are recorded and then sent to the CPTEC and DECEA. The quality of the data was not evaluated yet, and for applications like nowcasting, data assimilation and rainfall estimation it is necessary to guarantee that the data are good enough to be used. Therefore, the main goal of this assignment was to evaluate the quality of the data produced by the radar network using the information acquired by the TRMM-PR (Tropical Rainfall Measurement Mission – Precipitation Radar) as reference. The results showed that in most cases (excepting Gama) the ground radars tend to overestimate reflectivity values when compared with PR. It was also showed that São Roque requires attention due to its large offset and noises present in its products. The differences found in the remaining radars were related to the time difference between the data acquisition of the two types of sensors (ground and orbital radars).

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|--------------------|
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABELAS | |
| LISTA DE SÍMBOLOS | |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS | |
| 1 INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 Objetivos | 24 |
| 1.2 Justificativa | 25 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 3 DADOS | 35 |
| 3.1 Dados do TRMM-PR | 35 |
| 3.2 Dados de Radares de Superfície | 35 |
| 4 METODOLOGIA | 37 |
| 4.1 Seleção de Dados PR e GR | 38 |
| 4.2 Identificação de Coincidências de Amostragem | 38 |
| 4.3 Verificação do Apontamento do Radar de Superfície | 40 |
| 4.4 Recuperação da Estrutura Tridimensional (3D) da Área de cobertura dos radares PR e GR | 41 |
| 4.4.1 Amostragem do PR | 41 |
| 4.4.2 Amostragem do GR | 42 |
| 4.5 Elaboração de CAPPI's | 43 |
| 4.6 Delimitação de Chuva Estratiforme e Convectiva | 43 |
| 4.7 Comparação entre os CAPPI's obtidos pelo FROG2 e os obtidos pelo Método de Amostragem Tridimensional | 44 |
| 4.8 Obtenção de Z a partir de 5 km de Altura | 44 |
| 5 RESULTADOS | 47 |
| 5.1 Verificação do Apontamento do Radar de Superfície | 47 |
| 5.2 Comparação entre os CAPPI's obtidos pela DECEA e os obtidos pelo Método de Amostragem Tridimensional | 56 |
| 5.3 Comparação PR x GR | 65 |
| 5.3.1 Radar de Canguçu | 65 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3.1.1 | CAPPI e Secções Transversais | 65 |
| 5.3.1.2 | Perfis Verticais | 73 |
| 5.3.1.3 | Histogramas de Frequência | 75 |
| 5.3.2 | Radar de Morro da Igreja | 77 |
| 5.3.2.1 | CAPPI e Secções Transversais | 77 |
| 5.3.2.2 | Perfis Verticais | 81 |
| 5.3.2.3 | Histogramas de Frequência | 82 |
| 5.3.3 | Radar de São Roque | 84 |
| 5.3.3.1 | CAPPI e Secções Transversais | 84 |
| 5.3.3.2 | Perfis Verticais | 88 |
| 5.3.3.3 | Histogramas de Frequência | 89 |
| 5.3.4 | Radar de Gama | 91 |
| 5.3.4.1 | CAPPI e Secções Transversais | 91 |
| 5.3.4.2 | Perfis Verticais | 93 |
| 5.3.4.3 | Histogramas de Frequência | 93 |
| 6 | DISCUSSÕES | 97 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 101 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |
| | APÊNDICE A – ELEMENTOS TEÓRICOS | 111 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 – Padrão horizontal da refletividade do radar (atenuação corrigida) para o PR (a) e para o radar de superfície de Okinawa (b) em 2.5 km de altura... | 28 |
| 2.2 – Padrão horizontal da refletividade do radar (atenuação corrigida) para o PR (a) e para o radar de superfície de Ishigakijima (b) em 2.5 km de altura | 29 |
| 2.3 – Diagrama de dispersão entre os valores de refletividade PR x Okinawa (direita) e PR x Ishigakijima (esquerda) | 29 |
| 2.4 – Perfis horizontal e vertical do PR e do GR. (a) Imagem horizontal do GR; (b) Imagem horizontal do PR; (c) Secção vertical do GR; (d) Secção vertical do PR | 31 |
| 2.5 – a) Distribuição do fator de refletividade do radar observado pelo TRMM (preto) e TECSAT (cinza); b) Diferença entre os histogramas do TRMM-PR e TECSAT | 32 |
| 2.6 – Distribuição horizontal e vertical de valores de refletividade obtidos pelos radares PR (acima) e Bauru (abaixo) para o dia 13 de Janeiro de 1999 | 33 |
| 2.7 – a) Histograma da diferença GR-PR; b) Gráfico de dispersão da diferença GR-PR versus o valor da refletividade do PR | 34 |
| | |
| 3.1 – Rede de radares e área de cobertura de 250 km para cada sensor | 36 |
| | |
| 4.1 – Fluxograma da metodologia adotada nessa pesquisa..... | 37 |
| 4.2 – Ilustração do imageamento do radar PR sobre a área de cobertura do radar de São Roque | 39 |
| 4.3 – CAPPI a 3km de altura para os radares PR e GR (Canguçu) | 40 |
| 4.4 – Projeção dos dados do PR em uma caixa 3D | 41 |
| 4.5 – Esquema de iluminação do feixe de microondas do radar GR | 43 |
| 4.6 – Secção transversal de retroespalhamento σ_b para esferas de água líquida.. | 45 |
| 4.7 – Gráfico de dispersão da refletividade (dBZ) do Banda-X versus a refletividade do Banda-S para várias distribuições de tamanho de gota.... | 46 |
| | |
| 5.1 – Comparação entre o canal 4 da imagem do satélite GOES 12 e os CAPPI's de 3, 5, 7 e 10 km de altura para os radares de Canguçu, Morro da Igreja, São Roque e Gama | 49 |
| 5.2 – Gráfico de dispersão entre os dados de temperatura de brilho da imagem do satélite GOES 12 e os dados de refletividade do GR | 55 |
| 5.3 – Efeitos da perda de informação em relação à altura produzida pelo algoritmo de elaboração dos produtos CAPPI's | 57 |
| 5.4 – Comparação entre os CAPPI's obtidos pela REDEMET e o método de amostragem tridimensional para o radar de Canguçu, Morro da Igreja, São Roque e Gama | 59 |

| | |
|--|-----|
| 5.5 – Gráficos de dispersão entre os dados obtidos pelo DECEA e o método de amostragem tridimensional | 63 |
| 5.6 – Distribuição horizontal, secções transversais e gráficos de dispersão para o PR e o GR | 66 |
| 5.7 – Efeito da distância na reprodução do perfil vertical de refletividade obtido pelo radar GR | 73 |
| 5.8 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados | 74 |
| 5.9 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR | 76 |
| 5.10 – Distribuição horizontal, secções transversais e gráficos de dispersão para o PR e o GR | 78 |
| 5.11 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados | 82 |
| 5.12 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR | 83 |
| 5.13 – Distribuições espaciais, secções transversais e gráficos de dispersão para o PR e o GR | 85 |
| 5.14 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados | 88 |
| 5.15 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR | 90 |
| 5.16 – Distribuições espaciais, secções transversais e gráficos de dispersão para o PR e o GR | 92 |
| 5.17 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados | 93 |
| 5.18 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR | 94 |
| | |
| A.1 – Componentes básicas de um sistema de radar Doppler | 113 |
| A.2 – Conceitos básicos envolvidos na transmissão e recepção de sinais de radar | 114 |
| A.3 – Esquema conceitual do feixe de microondas e região de meia potência ... | 116 |
| A.4 – Esquema conceitual do padrão de irradiação de uma antena de radar | 117 |
| A.5 – Efeitos no preenchimento do feixe de microondas | 119 |
| A.6 – Ilustração da interceptação do pulso do radar por alvos do relevo | 120 |
| A.7 – Ilustração dos ecos de terreno devido à interceptação dos lóbulos secundários pelos alvos de terreno | 121 |
| A.8 – Refletividade e taxa de chuva calculada a partir da distribuição de tamanho de gotas coletadas em Darwin, Austrália | 127 |
| A.9 – Refletividade do radar e precipitação acumulada em 5 minutos para locais situados em Darwin, Austrália | 128 |
| A.10 – Processo de varredura de aquisição de dados do radar para uma dada elevação θ | 129 |
| A.11 – Passos da varredura para a obtenção do volume tridimensional de dados.. | 129 |
| A.12 – CAPPI a 3 km de altura obtido pelo radar de Canguçu em 11/06/2007..... | 130 |
| A.13 – Geometria da varredura para instrumentos relacionados à precipitação ... | 134 |
| A.14 – Padrão de amostragem do TRMM-PR sobre a América do Sul | 135 |
| A.15 – CAPPI de 3 km de altura obtido durante a órbita 46108 do dia 18/12/2005 sobre o Brasil | 136 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|--------------------|
| 3.1 – Parâmetros para cada ângulo de elevação da varredura | 36 |
| 5.1 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de Canguçu e do PR | 77 |
| 5.2 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de Morro da Igreja e do PR | 84 |
| 5.3 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de São Roque e do PR | 90 |
| 5.4 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de Gama e do PR | 95 |
| A.1 – Valores de $ K ^2$ para água a diversas temperaturas | 118 |
| A.2 – Relações típicas empíricas entre o fator de refletividade Z (mm^6m^{-3}) e a intensidade da precipitação, R (mm h^{-1}) | 125 |
| A.3 – Principais parâmetros do TRMM-PR | 131 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

| | |
|----------|---|
| A | Área de amostragem |
| A_e | Área efetiva |
| a | Coefficiente empírico |
| b | Coefficiente empírico |
| C | Constante do radar |
| c | Velocidade da luz |
| C_i | Número de gotas do i -ésimo canal do disdrômetro |
| cm | Centímetros |
| d | Distância |
| D_a | Diâmetro da antena |
| dB | Decibel |
| D_i | Diâmetro da gota |
| G | Ganho da antena |
| Hz | Hertz |
| i | Unidade imaginária |
| k | Coefficiente de absorção |
| km | Quilômetros |
| l | Fator de atenuação do sinal do radar |
| m | Componente complexa das ondas eletromagnéticas |
| mm | Milímetros |
| n | Índice de refração |
| $N(D)$ | Concentração de gotas com diâmetro D |
| $N(D_i)$ | Concentração de gotas com diâmetro médio D_i |
| P_t | Potência transmitida por um radar |
| P_r | Potência recebida |
| R | Taxa de precipitação |
| r | Alcance |
| S_i | Densidade de potência |
| S_r | Densidade Potência refletida |
| t | Tempo |
| Z | Fator de refletividade do radar |
| dBZ | Fator de refletividade do radar na escala logarítmica |
| w_t | Velocidade terminal |

Gregos

| | |
|-----------|--|
| λ | Comprimento de onda |
| θ' | Ângulo de abertura do feixe |
| θ | Ângulo de abertura do feixe para a região de meia potência |
| τ | Largura do pulso |
| θ | Ângulo de elevação |

σ Área da secção transversal de retroespalhamento
 π Letra Grega utilizada como símbolo do Pi, seu valor aproximado é de 3,1416.
 Δt Intervalo de tempo

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|--|
| <i>ARC</i> | Active Radar Calibrator |
| <i>CAPPI</i> | Constant Altitude Plan Position Indicator |
| <i>CERES</i> | Cloud and Earth Radiant Energy System |
| <i>CINDACTA</i> | Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo |
| <i>CPTEC</i> | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos |
| <i>DECEA</i> | Departamento de Controle do Espaço Aéreo |
| <i>DSA</i> | Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais |
| <i>GOES</i> | Geostationary Operational Environmental Satellite |
| <i>GPS</i> | Global Positioning System |
| <i>GR</i> | Ground Radar |
| <i>IAG</i> | Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas |
| <i>IFOV</i> | Instantaneous Field of View |
| <i>INPE</i> | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| <i>IPMET</i> | Instituto de Pesquisas Meteorológicas |
| <i>JAXA</i> | Japan Aerospace Exploration Agency |
| <i>LIS</i> | Lightning Imaging Sensor |
| <i>NASA</i> | National Aeronautics and Space Administration |
| <i>NCAR</i> | National Center for Atmospheric Research |
| <i>NEXRAD</i> | Next-Generation Radar |
| <i>NICT</i> | National Institute of Information and Communication Technology |
| <i>PR</i> | Precipitation Radar |
| <i>PRF</i> | Pulse Repetition Frequency |
| <i>REM</i> | Radiação Eletromagnética |
| <i>TECSAT</i> | Tectelcom Aeroespacial Ltda |
| <i>TMI</i> | TRMM Microwave Imager |
| <i>TRMM</i> | Tropical Rainfall Measurement Mission |
| <i>UPC</i> | Universidade Politécnica da Catalunya |
| <i>USP</i> | Universidade do Estado de São Paulo |
| <i>VIRS</i> | Visible Infrared Scanner |

1 INTRODUÇÃO

A integração da rede de radares pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), está sendo realizada em convênio com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC-INPE) desde 2004. Esta é a primeira tentativa concreta no Brasil de se integrar de forma operacional uma rede de seis radares situados nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do país. O resultado dessa integração está sendo a operação dos seis radares de forma sincronizada, durante vinte e quatro horas por dia, produzindo dados que são enviados ao CPTEC. Esses dados são processados e disponibilizados em forma de mosaicos que englobam toda a área de cobertura de cada radar.

Apesar do CPTEC elaborar mosaicos de imagens de radares juntamente com cartas de precipitação em tempo real, nada ainda foi feito para assegurar a qualidade e a validação dos dados reproduzidos nesses mosaicos. Nem todos os radares do DECEA possuem um procedimento regular de calibração eletrônica, que visa eliminar ou minimizar possíveis erros causados pelo uso contínuo do equipamento, devido aos erros causados pelo desgaste natural dos componentes eletrônicos do sensor. Desta forma, os dados produzidos por esses radares podem comprometer qualquer estudo que faça uso dessas informações.

Atualmente, os dados dos radares do DECEA estão sendo usados por várias instituições e também para várias finalidades. Para o uso em estimativa de precipitação, eventuais erros nas medidas de refletividade do radar serão compensados após o levantamento de uma relação Z-R obtida através de pluviômetros ou disdrômetros. Porém, para outras aplicações como o estudo de microfísica de nuvens, para uso em previsão imediata, ou o cálculo de conteúdo de água no perfil vertical e seu posterior uso em assimilação de dados de radar em modelos numéricos de previsão de tempo, pequenos desvios nos valores de refletividade podem resultar em grandes erros nos resultados derivados desse parâmetro.

Desta forma, antes de se usar os dados produzidos pelos radares do DECEA, é necessário avaliar a qualidade dos mesmos. Com isso, caso seja constatada alguma anormalidade, pode-se antecipar alguma correção e apontar a solução para o problema.

Radares meteorológicos são uma excelente alternativa para a falta de uma densa rede de pluviômetros porque apresentam a capacidade de capturar e estimar a precipitação em locais bem distantes de onde se encontram localizados, além de fornecerem a estrutura tridimensional dos sistemas precipitantes. Porém, devido à natureza atenuante da atmosfera e algumas características dos sistemas precipitantes, as medidas obtidas por radares precisam ser comparadas com dados de pluviômetros, ou outra fonte de informação que seja conhecida e possa ser usada como referência, como por exemplo, o radar de precipitação (PR) a bordo do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), que foi utilizado nesta pesquisa, como referência, por ser calibrado periodicamente utilizando um ARC (Active Radar Calibrator) localizado no Japão. Isso pode ser feito para avaliar os erros associados ao processo de aquisição de dados.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a qualidade dos dados obtidos pelos radares de superfície (GR) pertencentes ao DECEA e localizados em Canguçu (RS), Gama (DF), Morro da Igreja (SC) e São Roque (SP).

Para atingir a meta principal os seguintes objetivos específicos foram buscados:

- Verificar o apontamento dos radares de superfície;
- Analisar a qualidade dos produtos CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) elaborados pelo software de controle e processamento de dados dos radares para os níveis de 3, 5, 7 e 10 km de altura;
- Comparar informações coletadas pelo radar meteorológico a bordo do satélite TRMM (PR) com dados coletados por cada radar de superfície pertencente ao DECEA;

- Analisar as diferenças encontradas após a comparação dos dois tipos de radares para verificar possíveis problemas na calibração dos radares GR.

1.2 Justificativa

Os dados dos radares meteorológicos por serem aplicados em diversas áreas, como por exemplo, proteção ao voo, agricultura, geração de energia, defesa civil, transporte e na sociedade em geral, e por estarem sendo utilizados pela primeira, precisam ser avaliados.

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. Após esta introdução, tem-se uma revisão bibliográfica para embasar a metodologia a ser utilizada no Capítulo 2. O Capítulo 3 apresenta o período e o formato dos dados que foram utilizados e de que forma foram obtidos.

Em seguida, no Capítulo 4, é apresentada a metodologia empregada, como também os tratamentos realizados nos dados para a comparação de dados com geometrias diferentes de obtenção. O Capítulo 5 compreende a análise dos resultados obtidos a partir de comparações realizadas entre os dados dos GR's com as imagens do canal 4 do satélite GOES, com os CAPPI's do DECEA e também com os dados do PR. Algumas discussões necessárias são apresentadas no Capítulo 6. No Capítulo 7, são apresentadas algumas considerações finais necessárias, devido às aproximações que foram feitas, e as conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se obter estimativas de precipitação a partir de dados de radares de superfície é necessário eliminar, sempre que possível, as fontes de incertezas que podem causar variações nos valores de refletividade do radar. Dentre várias fontes de incerteza destacam-se aquelas causadas por distorções impostas pelos componentes eletrônicos do sensor, ganho da antena e alterações causadas por “radomes”. Nessa pesquisa trabalhou-se com quatro radares pertencentes ao DECEA. Teoricamente cada radar, por pertencer a mesma agência, apresenta o mesmo critério para assegurar a qualidade de seus dados, porém, ocorrem desgastes diferentes em seus componentes eletrônicos e alguns não tem o radome e, por isso, para que todos os resultados apresentados no final por todos os radares sejam coerentes, é necessário estabelecer um procedimento de calibração dos sensores tendo uma referência em comum.

A referência adotada nessa pesquisa é o PR que se tornou uma das mais importantes fontes de dados para estudos e análise da estimativa de precipitação desde o lançamento do satélite TRMM. Estudos anteriores mostraram a capacidade do PR em produzir medidas de refletividade estáveis com exatidão inferior a 1 dBZ, sendo portanto, uma ferramenta útil para a calibração de radares de superfície (Furukawa, 1998; Anagnostou et al., 2001; Morales et al., 2004; Lawrence, 2006).

Kummerow et al. (1998) mostram que uma calibração precisa do PR é importante para estabelecer uma relação clara entre os algoritmos do nível 1 e dos níveis mais altos. Para desenvolver o algoritmo de calibração do PR, variação e tendência dos parâmetros do sistema PR são modelados para ter componentes de “termo intermediário” e de “termo longo”. O primeiro é causado pela mudança da temperatura dentro do PR e pode ser corrigido fazendo-se o monitoramento dela. O segundo ocorre devido à degradação gradual do sistema (ganho, perda, etc) e/ou falhas em alguns elementos ativos. Este termo pode envolver mudanças nas características da antena e nos sensores de telemetria, assim, é necessária uma calibração usando um alvo de referência externo.

O algoritmo de calibração interna foi desenvolvido usando um sistema de modelo detalhado do PR que descreve a dependência entre a temperatura e os parâmetros do

sistema, relacionados ao processo de conversão do valor do *count* para a potência recebida no radar e finalmente para o fator de refletividade do radar. A calibração externa do PR é feita utilizando um ARC (Active Radar Calibrator) localizado no Japão. O ARC tem três funções: radar transmissor, radar receptor e guia transmissor. A calibração externa era feita todos os meses para estimar a mudança no “termo longo” do ganho do sistema PR. Atualmente, esta calibração é feita quatro vezes por ano e a calibração interna, para medir a função de transferência do receptor PR, é feita uma vez por dia (NASA, 2005).

Furukawa (1998) comparou dados do PR com dados de dois radares de superfície localizados sobre o Japão. A partir de observações simultâneas entre o PR e cada radar de superfície, foi observado que existem algumas diferenças no valor absoluto do fator Z, apesar da distribuição horizontal apresentar-se praticamente similar, conforme mostrado nas Figuras 2.1 e 2.2.

De acordo com as Figuras 2.1 e 2.2 percebe-se uma boa concordância na distribuição horizontal da refletividade, porém diferenças nos valores de refletividade entre os dois tipos de radares são observadas. Nota-se que os valores dos radares de superfície tendem a ser maiores do que aqueles do PR. A dispersão desses valores mostrada na Figura 2.3 revela com maior detalhes a variação de valores entre os dois tipos de radares.

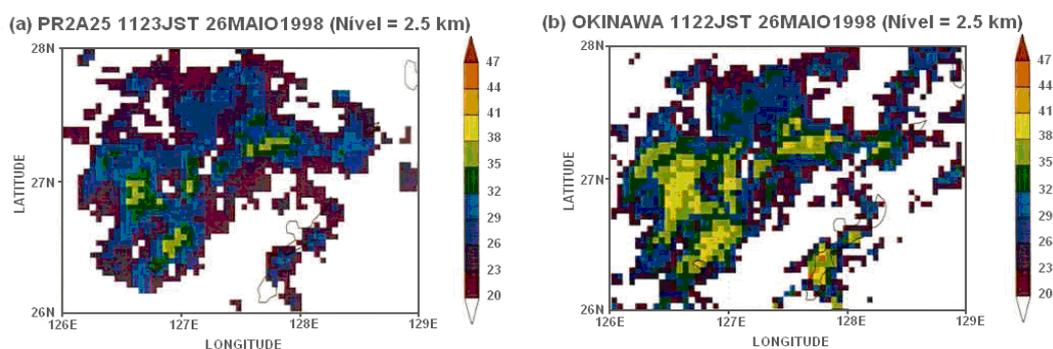


Figura 2.1 – Padrão horizontal da refletividade do radar (atenuação corrigida) para o PR (a) e para o radar de superfície de Okinawa (b) em 2,5 km de altura.

Fonte: Adaptado de Furukawa, (1998).

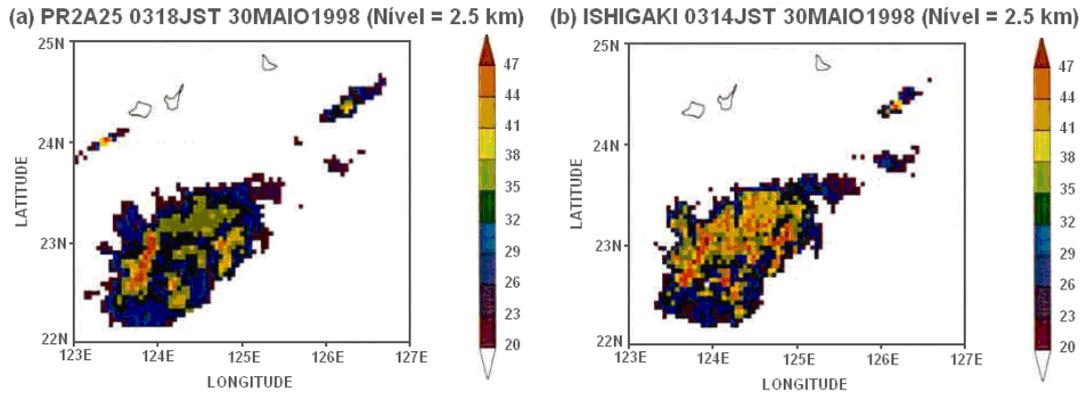


Figura 2.2 – Padrão horizontal da refletividade do radar (atenuação corrigida) para o PR (a) e para o radar de superfície de Ishigakijima (b) em 2,5 km de altura.

Fonte: Adaptado de Furukawa, (1998).

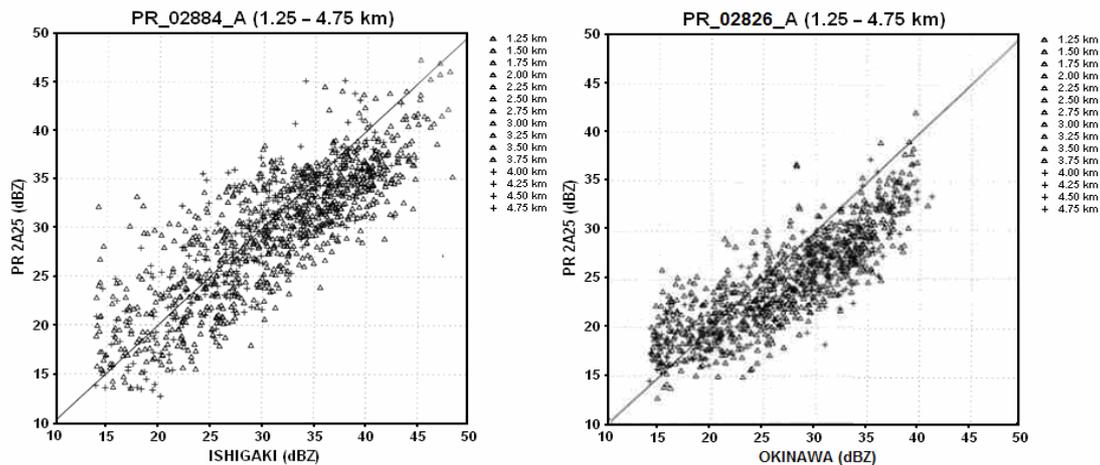


Figura 2.3 – Diagrama de dispersão entre os valores de refletividade PR x Okinawa (direita) e PR x Ishigakijima (esquerda).

Fonte: Adaptado de Furukawa, (1998).

Um dos fatores que podem ter causado discrepâncias no fator Z é o fato dos radares de superfície amostrar a atmosfera a partir de diferentes elevações. No estudo de Furukawa (1998) o tempo gasto para executar toda a varredura volumétrica foi de aproximadamente 7,5 minutos, enquanto que o PR, para a mesma área, gastou poucos segundos. Comparando os valores médios entre os dois tipos de radares observou-se que

o radar de Ishigakijima detectou valores 0,13 dBZ maiores que os do PR, enquanto que o radar de Okinawa detectou valores 2,67 dBZ maiores que os do PR. Assumindo que o PR está calibrado para aproximadamente 1 dBZ e tem um desempenho estável, concluiu-se que o radar de Okinawa detectou valores 2,54 dBZ maiores que os do radar de Ishigakijima.

Bolen e Chandrasekar (2000) fizeram comparações simultâneas de dados coletados do PR e do radar polarimétrico de banda S (Spol) operado pelo NCAR (National Center for Atmospheric Research). Foi observado que variações na altitude do satélite TRMM podem causar mudanças na resolução, como também variações na velocidade orbital contribuem para mudanças na direção ao longo do caminho. Estas mudanças podem contribuir para efeitos no preenchimento do feixe que podem levar a comparações erradas com dados do radar de superfície.

A Figura 2.4 mostra os perfis horizontal e vertical do PR e do radar de superfície para o dia 15 de Agosto de 1998. Como era de se esperar observa-se que o GR apresenta uma melhor resolução horizontal, enquanto que o PR apresenta uma melhor resolução vertical.

Bolen e Chandrasekar (2000) chegaram à conclusão de que na ausência de atenuação significativa, o valor médio das observações do TRMM e do radar de superfície concordaram em 1 dBZ, e que a refletividade PR estimada com atenuação corrigida concordou razoavelmente bem em altitudes menores que 2 km com observações do radar de superfície.

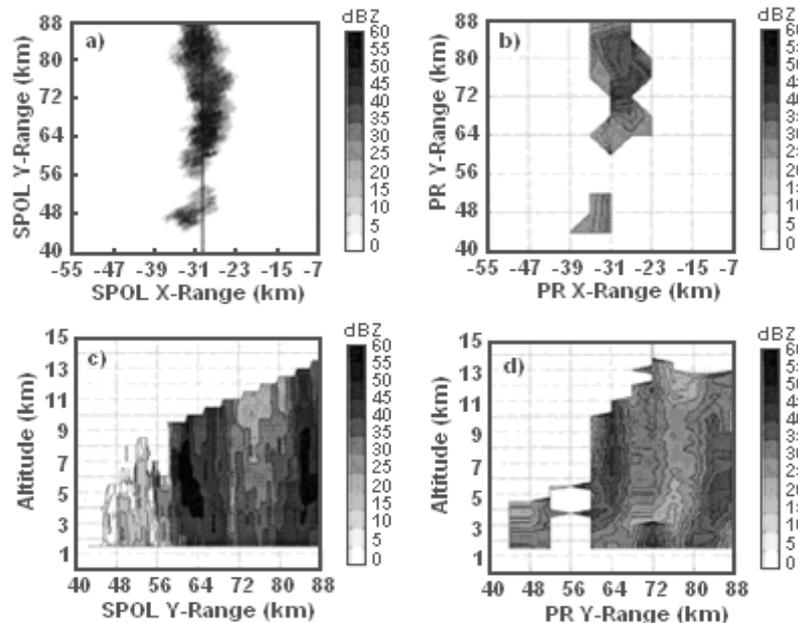


Figura 2.4 – Perfis horizontal e vertical do PR e do GR. (a) Imagem horizontal do GR; (b) Imagem horizontal do PR; (c) Secção vertical do GR; (d) Secção vertical do PR.

Fonte: Bolen e Chandrasekar, (2000).

Morales et al. (2004), com o objetivo de descrever as principais características da precipitação na região Amazônica, utilizaram dados do radar meteorológico da TECSAT (Tectelcom Aeroespacial Ltda) e a metodologia desenvolvida por Anagnostou et al. (2001), que fizeram uma inter-comparação entre radares meteorológicos de superfície nos Estados Unidos e o TRMM-PR. Esta metodologia consiste, basicamente, em obter a diferença entre os histogramas da refletividade do radar de superfície e o PR ($Z(\text{GR}) - Z(\text{PR})$), considerando um volume com resolução horizontal de 5 km x 5 km e vertical de 1 (2) km, obtido entre 7 e 12 km de altura, cuja precipitação foi classificada como chuva estratiforme. Avaliou-se somente valores de refletividade acima de 15 dBZ a uma distância de 100 km do radar. Seguindo esta metodologia, foi encontrado um viés de +6,47 dBZ, mostrado na Figura 2.5, que, de acordo com os autores, possivelmente foi causado pelo ganho da antena.

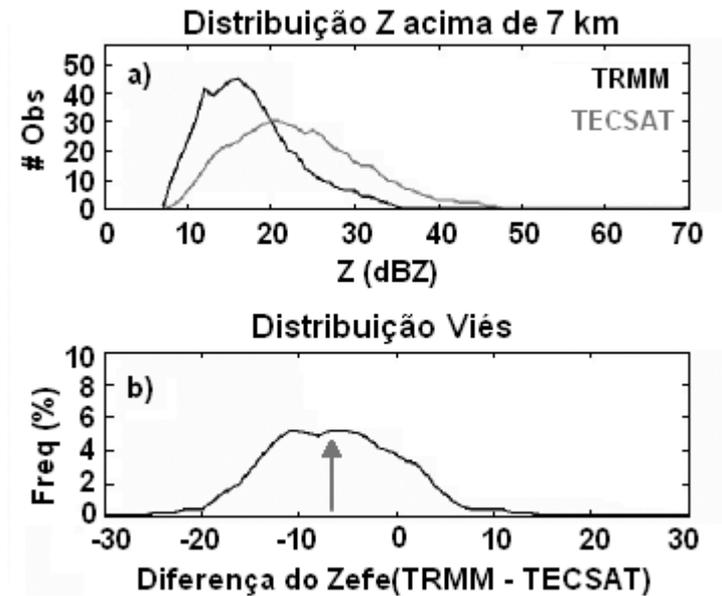


Figura 2.5 – a) Distribuição do fator de refletividade do radar observado pelo TRMM (preto) e TECSAT (cinza); b) Diferença entre os histogramas do TRMM-PR e TECSAT.

Fonte: Adaptado de Morales et al. (2004).

A Figura 2.5a mostra uma comparação da distribuição do fator de refletividade do radar para os dois radares na mesma hora em 5 órbitas do TRMM. Pode-se perceber claramente que o radar de superfície apresenta uma mudança no máximo valor da refletividade. Na Figura 2.5b, observa-se a diferença na refletividade do radar para os casos da Figura 2.5a.

Anagnostou et al. (2000) utilizaram dados do PR para a validação das informações adquiridas pelo radar de superfície de Bauru, operado pelo IPMET. A Figura 2.6 mostra a distribuição da refletividade horizontal (CAPPI no nível de 2 km) e perfis verticais extraídos dos dados volumétricos de ambos os radares, com precipitação significativa cobrindo uma área sobreposta por dois radares. Os painéis superiores referem-se aos dados obtidos do PR com a atenuação corrigida e os inferiores aos dados coincidentes obtidos do GR. Observa-se que o GR é mais sensível que o PR a pixels com valores menores que 17 dBZ, isto ocorre pelo fato do PR ter um limiar de sensibilidade de aproximadamente 17 dBZ.

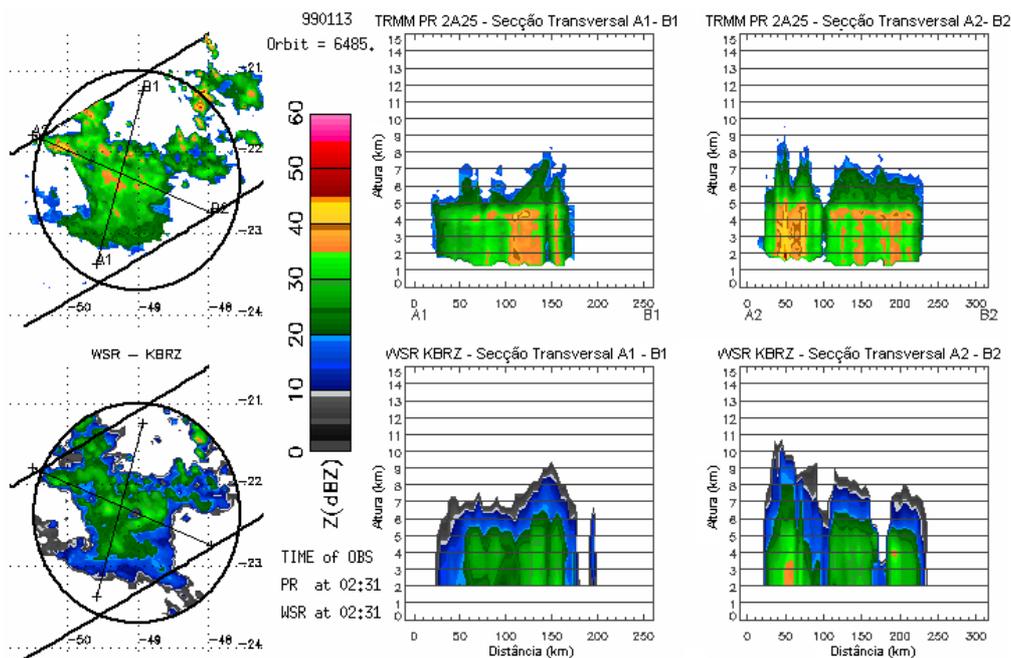


Figura 2.6 – Distribuição horizontal e vertical de valores de refletividade obtidos pelos radares PR (acima) e Bauru (abaixo) para o dia 13 de Janeiro de 1999. Os círculos correspondem a uma distância de 150 km do radar.

Fonte: Adaptado de Anagnostou et al. (2000).

Na Figura 2.7a, os autores observaram que o histograma tem uma forma Gaussiana e o desvio padrão é de 2,5 dBZ. A Figura 2.7b, gráfico de dispersão da diferença GR-PR versus a refletividade do PR, mostra uma tendência negativa, o que pode ser observado também no histograma. Os resultados mostraram que apesar do padrão e posicionamento dos sistemas serem similares, o GR tende a subestimar os valores de refletividade (- 6 dBZ) quando comparados com o PR. A correlação entre os padrões de refletividade do GR e do PR, em níveis acima da banda brilhante, variou entre 0,8 e 0,95 e a flutuação temporal do viés do radar não foi significativa (< 1 dBZ).

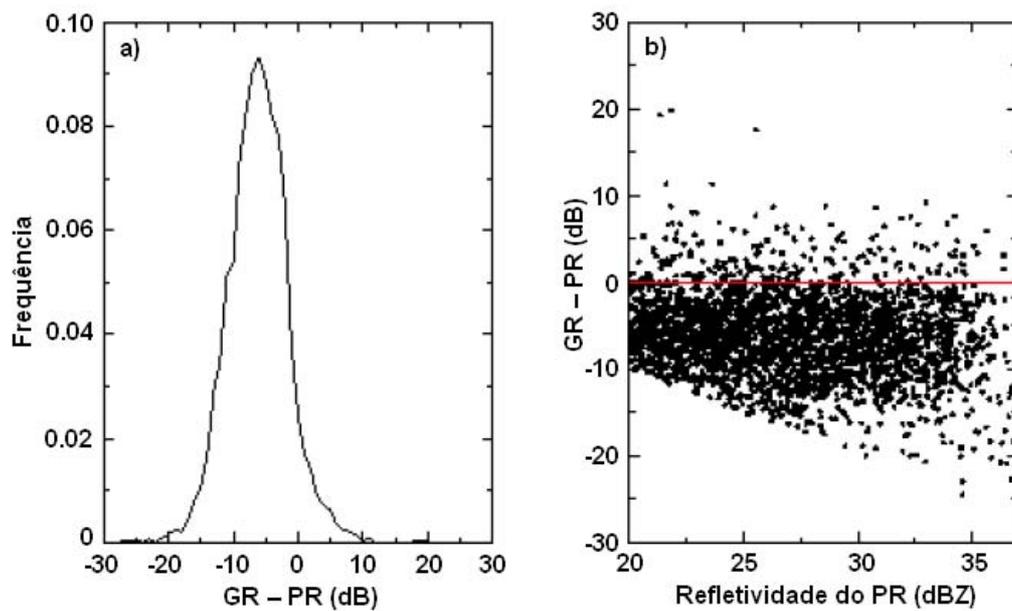


Figura 2.7 – a) Histograma da diferença GR-PR; b) Gráfico de dispersão da diferença GR-PR versus o valor da refletividade do PR.

Fonte: Adaptado de Anagnostou et al. (2000).

3 DADOS

3.1 Dados do TRMM-PR

O PR é um radar que opera na banda Ku (13,796 – 13,802 GHz), com comprimento de onda de 2,17 cm. Os dados PR foram obtidos diretamente da NASA, no formato HDF, para o período de novembro de 2005 a junho de 2006. Nesta pesquisa, utilizou-se apenas os valores de refletividade com atenuação corrigida, ou seja, o valor “*Z factor*” dado no manual do TRMM (NASA, 2005) para as data coincidentes com os dados dos radares de superfície.

3.2 Dados de Radares de Superfície

Os quatro radares utilizados são sensores Doppler operando na banda S (2,7 – 3 GHz), comprimentos de onda de 10 cm e com uma abertura do feixe de microondas de aproximadamente 2°. Os radares são controlados pelo DECEA e estão situados em São Roque (SP), Gama (DF), Morro da Igreja (SC) e Canguçu (RS). As varreduras volumétricas obtidas por cada radar utilizam os parâmetros descritos na Tabela 3.1, têm um intervalo de 15 minutos e são executadas 24 horas por dia.

A Figura 3.1 mostra os radares utilizados nessa pesquisa e a área de cobertura de cada radar para um raio de 250 km. Observa-se na Tabela 3.1 que o alcance máximo do radar é limitado à medida que o ângulo de elevação aumenta, isso acontece para que o tempo gasto na varredura seja menor.

Tabela 3.1 – Parâmetros para cada ângulo de elevação da varredura.

| Az. Inicial | Vel. Azimutal | Az. Final | Elevação | Alcance Máximo | Res. Alcance | Inc. Azimute | PRF | Unfolding | Largura do Pulso | Filtro de Clutter |
|-------------|---------------|-----------|----------|----------------|--------------|--------------|--------|-----------|------------------|-------------------|
| 0° | 18,0°/s | 360° | 0,50 | 250 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 1,00 | 250 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 2,00 | 250 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 3,00 | 250 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 4,00 | 250 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 5,00 | 250 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 6,00 | 214 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 7,00 | 189 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 8,00 | 162 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 9,00 | 141 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 10,00 | 125 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 12,00 | 103 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 14,00 | 89 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 16,00 | 78 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |
| 0° | 18,0°/s | 360° | 18,00 | 69 km | 0,75 km | 1,0° | 600 hz | 3/4 | 1µs | IQ4 |

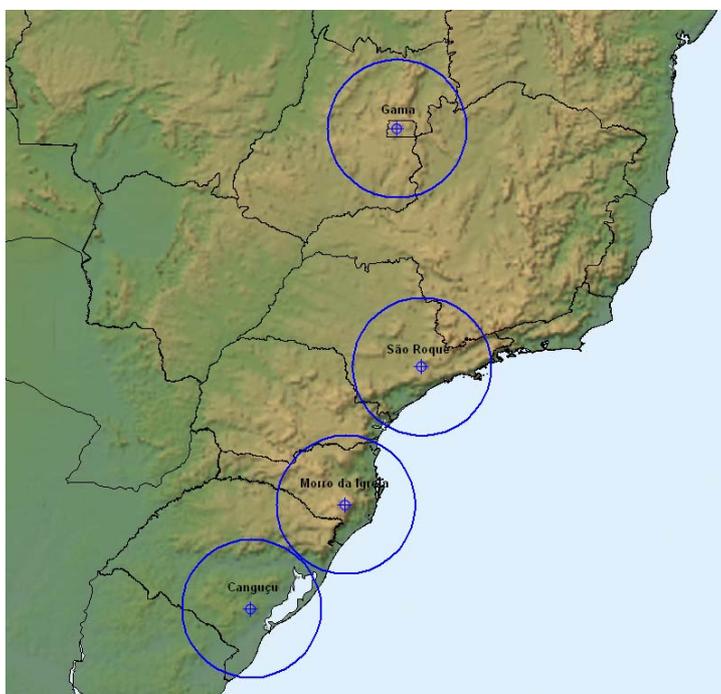


Figura 3.1 – Rede de radares e área de cobertura de 250 km para cada sensor.

4 METODOLOGIA

Os valores da refletividade obtidos por cada radar de superfície usado nessa pesquisa foram comparados com os valores obtidos pelo radar orbital a bordo do satélite TRMM. Os resultados foram comparados qualitativamente e quantitativamente, a partir de estatísticas descritivas. Como cada radar apresenta uma geometria diferente de aquisição de dados, foi necessário formatar os dados de cada tipo de radar, de forma que os alvos monitorados pudessem ser representados da forma mais fiel possível. Desta forma, adotou-se a metodologia esquematizada no fluxograma da Figura 4.1.

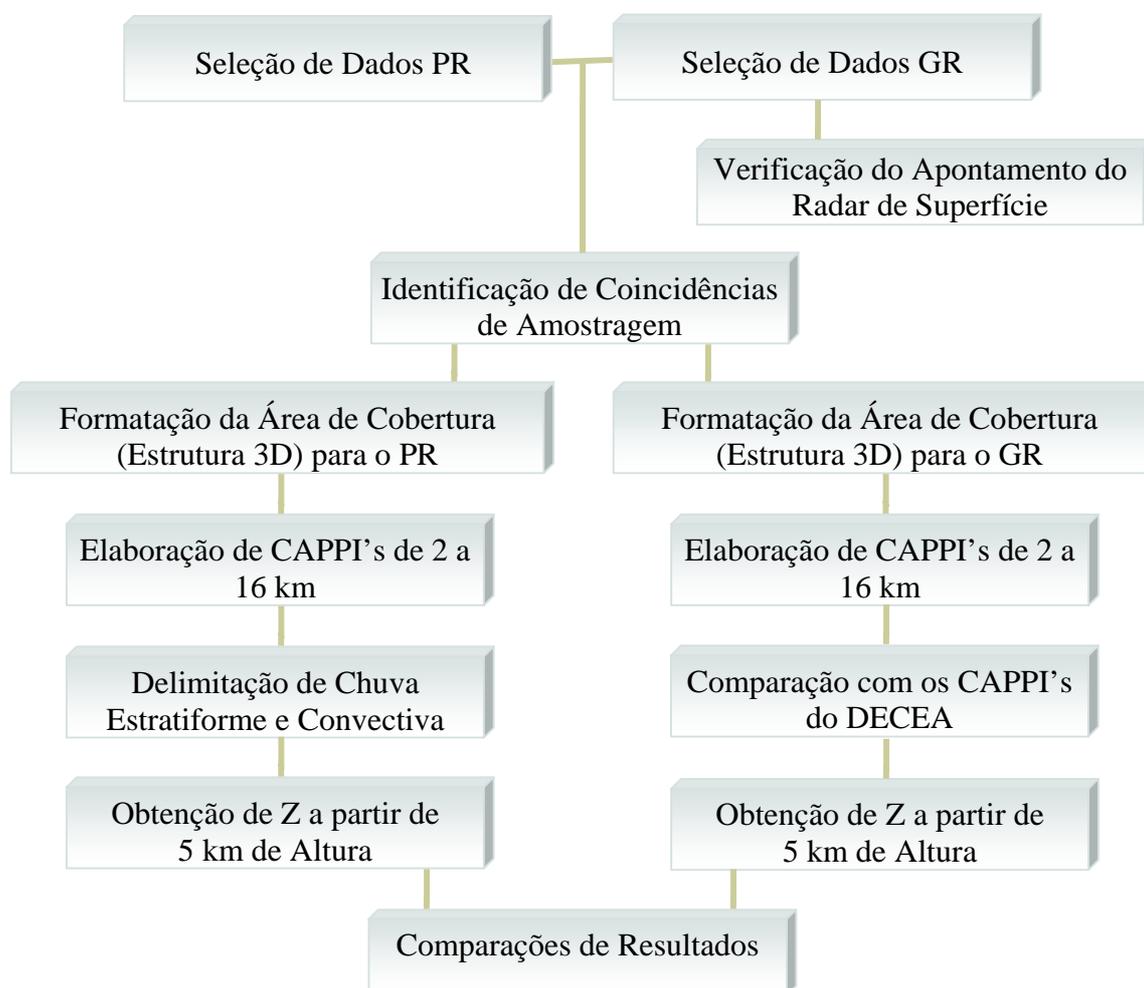


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia adotada nessa pesquisa.

Cada item da metodologia mostrado no fluxograma está descrito nos parágrafos seguintes. Em alguns casos foi preciso descrever a teoria que embasa a ação adotada.

4.1 Seleção de Dados PR e GR

A base de dados dos radares de superfície (GR's) apresenta uma série histórica curta, apresentando no máximo um ano de informações coletadas entre 2005 e 2006, enquanto os dados do PR podem ser obtidos a partir de 1998. O período de dados utilizado nessa pesquisa foi de novembro de 2005 a junho de 2006. Devido a problemas de operação dos radares GR, como interrupção de funcionamento por longos períodos, os arquivos selecionados para cada radar possuem datas diferentes. Desta forma, cada localidade apresentou casos diferentes, compreendidos no período de estudo, o que não interfere na metodologia para comparação dos resultados.

4.2 Identificação de Coincidências de Amostragem

A identificação de coincidências de amostragens foi feita em duas etapas distintas. Na primeira etapa foi feita uma análise de todos os dados do PR que houvesse sobreposição com cada radar. Uma vez identificado áreas em que houve cobertura, tanto do PR como do GR, fez-se o recorte dos dados do PR para a mesma área de cobertura do GR. A Figura 4.2 mostra um exemplo de uma passagem do satélite TRMM que sobrepõe a área de cobertura do radar de São Roque.

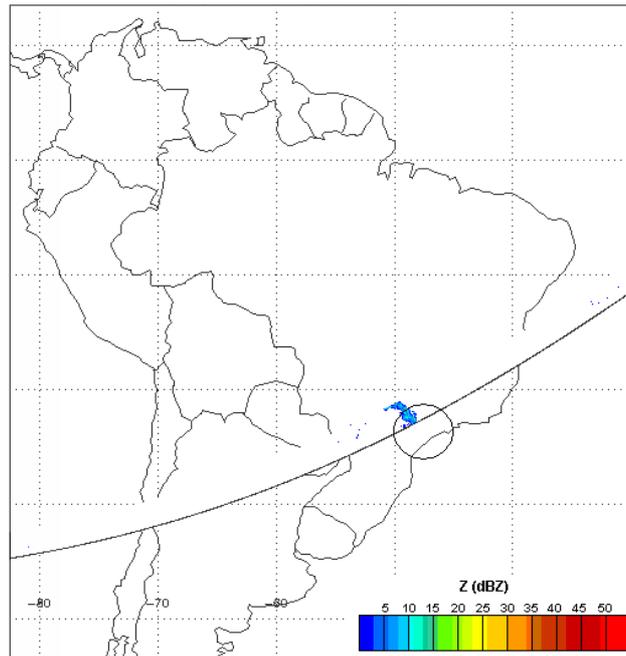


Figura 4.2 – Ilustração do imageamento do radar PR sobre a área de cobertura do radar de São Roque durante a órbita 46108 do dia 18/12/2005 sobre o Brasil.

Na segunda etapa desse procedimento foi feita uma primeira triagem no conjunto de dados PR recortados anteriormente, de forma que aproveitou-se somente aqueles cuja hora de amostragem apresentou diferença de, no máximo, 10 minutos em relação aos arquivos GR.

Uma vez garantido que cada arquivo PR possuía um arquivo GR de mesma data e hora aproximada, fez-se uma segunda triagem, porém, agora, separando-se somente os casos em que tanto PR como GR apresentassem valores de refletividade relacionados a sistemas precipitantes em geral. Para isso utilizou-se os produtos CAPPI's a 3 km de altura obtidos a partir dos dados PR e GR.

Essa segunda triagem foi feita apenas através da interpretação visual de cada CAPPI, nos quais foi possível identificar os sistemas precipitantes atuantes na área de cobertura do radar GR. A Figura 4.3 exemplifica o procedimento descrito anteriormente através de um par de CAPPI's que representam os valores de refletividade a 3 km de altura, obtidos pelos radares PR e GR, para o dia 21 de janeiro de 2006.

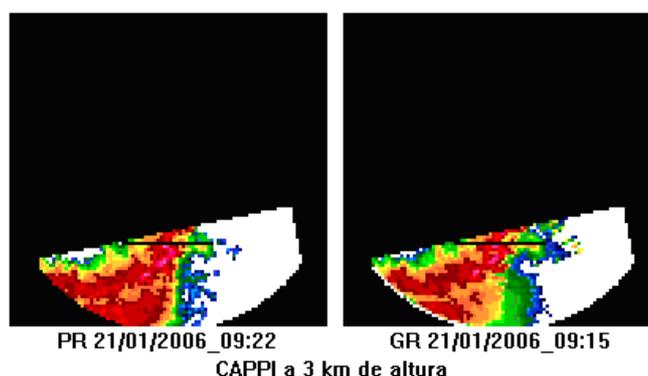


Figura 4.3 – CAPPI a 3km de altura para os radares PR e GR (Canguçu). A hora de aquisição da imagem PR foi 0922 GMT e da imagem GR foi 0915 GMT.

A Figura 4.3 mostra somente a área de cobertura do GR coincidente com a passagem do PR. Como ilustrado na Figura 4.2, a órbita inclinada do satélite TRMM não permite que se obtenha um padrão regular de amostragem do PR. Isso faz com que as regiões dentro da área de cobertura do GR sejam observadas pelo PR de forma irregular. Além disso, a máxima distância horizontal imageada pelo PR corresponde a aproximadamente 245 km de largura, enquanto que o diâmetro da área imageada pelo GR é igual a 500 km. Desta forma, somente partes da área de cobertura dos GR's serão amostradas pelo PR, o que nunca resultará em um casamento perfeito de áreas de amostragem.

A linha em preto, observada na Figura 4.3, indica, um exemplo, onde foi feito o corte transversal, o mais próximo possível do centro do radar, para analisar a estrutura vertical dos valores de refletividade de ambos os tipos de radares, esse procedimento foi feito nos casos selecionados para todos os radares. A origem do eixo x de cada secção transversal foi definida como sendo o primeiro ponto da esquerda para a direita, quando a linha preta é horizontal, e de baixo para cima, quando a linha preta é vertical.

4.3 Verificação do Apontamento do Radar de Superfície

Com o objetivo de verificar o apontamento de cada radar de superfície em relação aos sistemas precipitantes observados, foram selecionados três casos de cada radar e feitas comparações utilizando imagens do canal 4 do satélite GOES 12. Essas imagens foram recortadas de acordo com a área de cobertura de cada radar. Para esta comparação

foram utilizados CAPPI's para os níveis de 3, 5, 7 e 10 km de altura elaborados a partir do Método de Amostragem Tridimensional, cuja hora de obtenção fossem coincidentes ou mais próximas possíveis da hora da imagem de satélite.

Na imagem de satélite, as temperaturas de brilho entre 240 K e 190 K foram realçadas através de cores que variam de tonalidades, para assim, mostrar a localização de nuvens que variam de quentes para frias. Nos CAPPI's do radar, as mesmas tonalidades representam os valores de refletividade em dBZ, porém, variando de baixos para altos.

4.4 Recuperação da Estrutura Tridimensional (3D) da Área de Cobertura dos Radares PR e GR

4.4.1 Amostragem do PR

Para recuperar a estrutura 3D da área amostrada por cada radar, utilizou-se o método descrito por Anagnostou et al. (2000), que baseia-se num esquema que interpola volumes das varreduras dos dois tipos de radares, dentro de uma grade fixa.

O volume de varredura da refletividade instantânea do PR é projetado dentro de uma grade cartesiana tridimensional paralela a terra (chamada de caixa 3D) com resolução horizontal de 5 km x 5 km e vertical de 1 km (Figura 4.4).

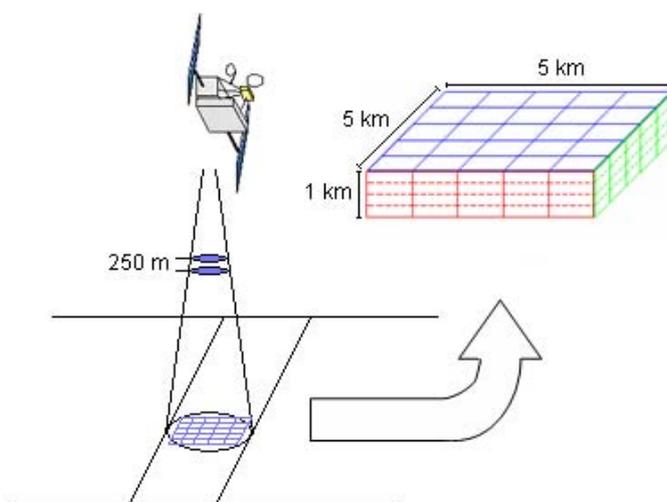


Figura 4.4 – Projeção dos dados do PR em uma caixa 3D.

Cada raio de um feixe do PR é projetado em uma caixa 3D, usando informação sobre a localização no espaço, a altitude (extraída dos arquivos de navegação do satélite) e a inclinação do feixe. Para produzir os valores da refletividade do PR na vertical da caixa 3D, são feitas médias de 4 níveis, pelo fato da resolução vertical do PR ser de 250m. Desta forma, para cada nível de altitude localizado entre 2 e 16 km, calcula-se a refletividade média, utilizando a média aritmética dos valores localizados a ± 500 metros do nível desejado.

4.4.2 Amostragem do GR

O volume de dados de refletividade do GR amostrados pela varredura do radar é transformado de coordenadas polar para coordenada cartesiana. Um cubo conceitual envolvendo toda a área de cobertura do GR é elaborado com o radar localizado em seu centro. Esse cubo é então dividido em células com resolução de 1 km x 1 km na horizontal e 1 km na vertical. O feixe eletromagnético do radar ilumina todo o cubo através dos movimentos de azimute e elevação da antena, e com isso, todas as células de 1 km³ contidas nesse cubo são também iluminadas. A distância de cada célula em relação ao radar determina qual a parte da célula que será iluminada pelo feixe. Desta forma, para se iluminar totalmente uma célula em áreas próximas ao radar, onde o feixe eletromagnético possui uma abertura pequena, serão necessários vários *bins*¹ pertencentes a elevações e azimutes diferentes. Para áreas distantes do radar, o contrário acontece e, várias células podem ser iluminadas por um *bin*. Para garantir uma uniformidade na recuperação da estrutura tridimensional da área mostrada pelo radar, adota-se uma metodologia que atribui pesos para cada *bin* que ilumina as células dentro do cubo. Os pesos são calculados através da porcentagem que cada *bin* ilumina cada célula. Assim, para exemplificar esse esquema, define-se que a parte das células totalmente iluminadas por um *bin*, recebe peso 1.0, enquanto partes das células que são iluminadas por 50% de um *bin* recebem peso 0,5 (Figura 4.5). A refletividade de cada célula é então calculada através da média ponderada pelos pesos dos *bins*.

¹ *Bin* - Distância que o software de controle do radar considera como sendo iluminada pelo cone de microondas gerado durante a propagação de um pulso transmitido.

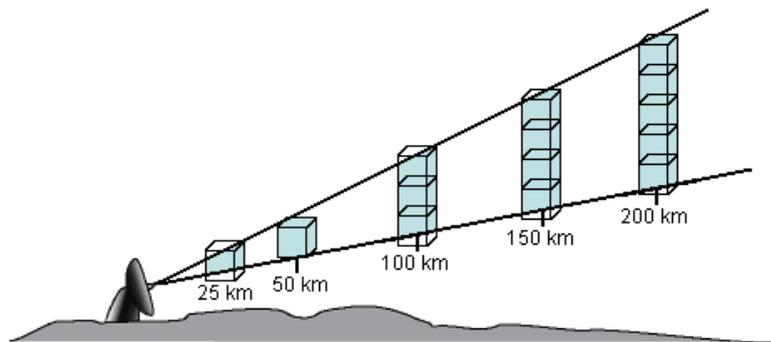


Figura 4.5 – Esquema de iluminação do feixe de microondas do radar GR

Esse método garante as mesmas condições de amostragem daquela feita pelo PR e isso permite que os valores de refletividade obtidos pelos dois tipos de radares, apesar de suas geometrias de aquisição de dados serem completamente diferentes, possam ser comparados. Esse processo é chamado daqui em diante de Método de Amostragem Tridimensional.

4.5 Elaboração de CAPPI's

Os CAPPI's são obtidos a partir da extração de valores de refletividade do radar presentes em cada nível de altura e calculados segundo o Método de Amostragem Tridimensional, descrito no item anterior. Como toda a área de cobertura do radar é estratificada em 15 níveis de altura, com intervalo de 1 km entre eles, é possível assim levantar todo o perfil vertical de refletividade do radar, dentro da área de cobertura do sensor. Desta forma, cada CAPPI é um mapa de valores de refletividade sobre a área de cobertura do radar, para um determinado nível de altura constante.

4.6 Delimitação de Chuva Estratiforme e Convectiva

Para se comparar os valores de refletividade avaliada por cada tipo de radar é necessário eliminar o máximo de incertezas possíveis e, assim, garantir uma maior confiança nos resultados. A alta variabilidade da precipitação associada com sistemas convectivos e efeitos aleatórios devido à mudança do tipo de precipitação precisam ser eliminados, uma vez que esses podem interferir nos valores medidos principalmente pelo PR, cujo comprimento de onda é bem inferior ao GR. Um dos passos da comparação do

desempenho dos dois tipos de radares usados nessa pesquisa verificou somente valores de refletividade amostrados acima de 5 km de altura e pertencentes a sistemas estratiformes. Isso foi feito para garantir que possíveis efeitos causados pela atenuação do feixe do PR fossem eliminados.

A classificação da precipitação e a determinação do nível da banda brilhante são duas informações fornecidas pelo algoritmo 2A23, que é baseado no algoritmo descrito em Iguchi et al. (2000), e que também estão inseridos nos dados de refletividade do 2A25. Essa informação foi usada como máscara, facilitando a identificação e amostragem dos locais onde ocorrem somente sistemas estratiformes.

4.7 Comparação entre os CAPPI's obtidos pelo FROG 2 e os obtidos pelo Método de Amostragem Tridimensional

Para esta comparação foram utilizados CAPPI's dos níveis de 3, 5, 7 e 10 km de altura obtidos pelos dois métodos. Os CAPPI's obtidos pelo software de processamento original do radar foram reamostrados, para a mesma resolução dos CAPPI's do Método de Amostragem Tridimensional, para que pudessem ser comparados. Para avaliar as diferenças observadas entre os métodos foram elaborados gráficos de dispersão e analisada a correlação obtida.

4.8 Obtenção de Z a partir de 5 km de Altura

Steiner e Houze (1998) mostraram que, sem correção da atenuação, os dados do PR são mais confiáveis para alturas a partir de aproximadamente 5 – 7 km acima do nível médio do mar. Schumacher e Houze (2000) comparando dados do radar de Kwajalein (KR) e do PR, para o período de agosto de 1998 a agosto de 1999, também verificaram que as distribuições concordam melhor entre 5 e 6 km de altura e que diferentes comprimentos de onda, sensibilidades, estratégias de varredura, e volumes de espalhamento têm um papel importante em modificar a quantidade de eco observado por cada radar.

Além dos dados serem mais confiáveis a partir do nível de 5 km de altura, como mostrado em trabalhos anteriores, é importante ressaltar que para considerar-se o espalhamento do tipo Rayleigh, principalmente para o PR, é necessário que tenha-se gotas pequenas de hidrometeoros, o que é mais facilmente encontrado nos níveis mais altos e em sistemas estratiformes, principalmente nos estágios iniciais e de dissipação.

De acordo com a Figura 4.6, para ter-se apenas o espalhamento do tipo Rayleigh, os tamanhos das gotas devem ter diâmetro que variam em função do comprimento de onda. As curvas observadas na Figura 4.6 foram determinadas por Atlas e Ludlum (1961), que foram capazes de estimar a secção transversal de retroespalhamento da esfera da água para vários comprimentos de onda a partir dos cálculos de Aden (1951) para um único comprimento de onda de 16,23 cm. Herman e Battan (1961) fizeram cálculos para 3,21cm usando, portanto valores eficazes para a constante dielétrica do gelo e da água. Na Figura 4.6 as distribuições foram obtidas usando valores atualizados da constante dielétrica (Ray, 1972).

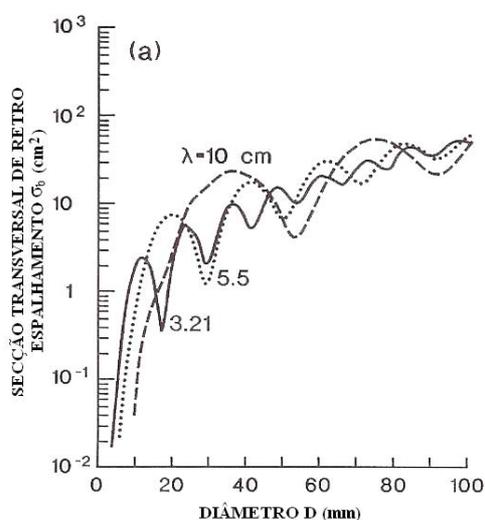


Figura 4.6 – Secção transversal de retroespalhamento σ_b para esferas de água líquida.

Fonte: Adaptado de Doviak and Zrnica, (1993).

Chandrasekar et al. (2006) fizeram uma simulação teórica para determinar a relação entre a refletividade de um radar Banda S e um radar Banda X (comprimento de onda de 3 cm, o qual se aproxima do comprimento de onda do PR). Foi observado que para

valores inferiores a 25 dBZ, a refletividade não varia com a frequência, porém, os efeitos do espalhamento do tipo Mie podem ser percebidos acima desse valor (Figura 4.7).

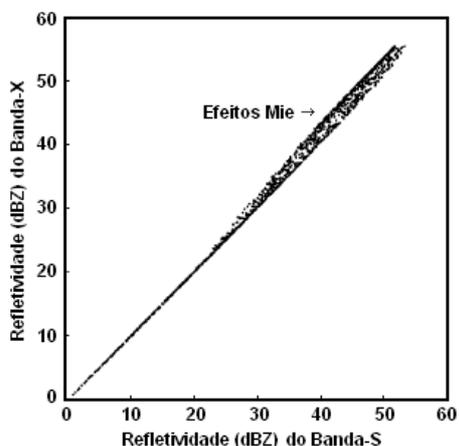


Figura 4.7 – Gráfico de dispersão da refletividade (dBZ) do Banda X versus a refletividade do Banda S para várias distribuições de tamanho de gota.

Fonte: Adaptado de Chandrasekar et al., (2006).

Os passos descritos nos itens anteriores definem a metodologia utilizada nessa pesquisa. Após a execução dessas tarefas, pôde-se levantar os resultados que são discutidos e comentados nos próximos capítulos e, com isso, chegar-se a algumas conclusões sobre a comparação dos dois tipos de radares.

5 RESULTADOS

Os resultados mostrados nesta secção avaliam a qualidade dos dados produzidos pelos radares pertencentes ao DECEA. Como afirmado anteriormente, os dados produzidos por esses radares estão sendo usados de forma sistemática somente a partir de 2004, após o estabelecimento do convênio técnico-científico entre DECEA e CPTEC-INPE. Desta forma, é preciso verificar a qualidade dos mesmos e, em caso de incertezas e deficiências, propor soluções para as mesmas.

A avaliação da qualidade dos dados seguiu os critérios descritos no capítulo da metodologia. Nos itens a seguir encontram-se a avaliação do apontamento da antena do radar de superfície, e a comparação entre os produtos CAPPI's, gerados pelo software de processamento original do radar, e os correspondentes CAPPIS's gerados pelo Método de Amostragem Tridimensional, usado nessa pesquisa.

Também serão mostrados os resultados obtidos pela comparação entre os dados produzidos pelos radares do DECEA (chamados aqui de GR) com os dados produzidos pelo radar a bordo do satélite TRMM (chamados aqui de PR). Essa comparação foi dividida em três etapas:

- 1) avaliação das estruturas verticais captadas por cada tipo de radar;
- 2) análise de perfis verticais de sistemas convectivos e estratiformes detectado por cada tipo de radar;
- 3) levantamento da diferença média entre valores de refletividade produzidos por cada radar com o objetivo de averiguar a qualidade da calibração dos radares GR.

5.1 Verificação do Apontamento do Radar de Superfície

O apontamento do radar é importante para verificar se o sensor está identificando os sistemas precipitantes em suas posições corretas, ou seja, se a antena encontra-se posicionada corretamente. No momento da instalação dos radares do DECEA em um

determinado local, essa verificação do apontamento é feita utilizando o apoio de aeronaves. Desta forma, observa-se um sistema precipitante através da imagem obtida pelo radar e extrai-se a latitude e longitude desse sistema. Assim, o piloto da aeronave desloca-se até o local informado e verifica se realmente há um sistema naquela localização. Essa verificação é feita apenas na primeira vez, durante a instalação dos radares. No decorrer do tempo há um desgaste natural dos componentes do radar, principalmente nas partes mecânicas envolvidas no sistema de varredura da antena. Isso exige, em certos momentos, algumas intervenções para manutenção e até mesmo acarreta a troca de peças e componentes.

Além disso, existe o problema da projeção cartográfica que o produto final é gerado. Os produtos são originalmente gerados em projeção azimutal eqüidistante e após processados são convertidos em uma projeção geográfica reproduzida em uma grade regular. Isso permite o uso integrado das imagens de radar com imagens de satélites e outras informações.

A razão de se usar imagens de satélites GOES se justifica porque, além de ser um excelente dado para ser comparado com radar, as imagens já vêm sendo recebidas e trabalhadas pelo CPTEC há muitos anos. A experiência adquirida pelo CPTEC, juntamente com os sistemas de recepção e refinamento da qualidade das imagens GOES, permite usar essa informação como uma fonte confiável de navegação.

Comparando a imagem do satélite com os CAPPI's de 3, 5, 7 e 10 km de altura, observa-se que há uma coincidência na localização dos pontos de alta refletividade com os pontos de baixa temperatura de brilho do satélite. Esses locais foram tomados como referência e os resultados indicam que o apontamento das antenas dos radares GR usados nessa pesquisa parecem estar coerente.

A Figura 5.1 mostra os resultados obtidos para os radares de Canguçu, Morro da Igreja, São Roque e Gama.

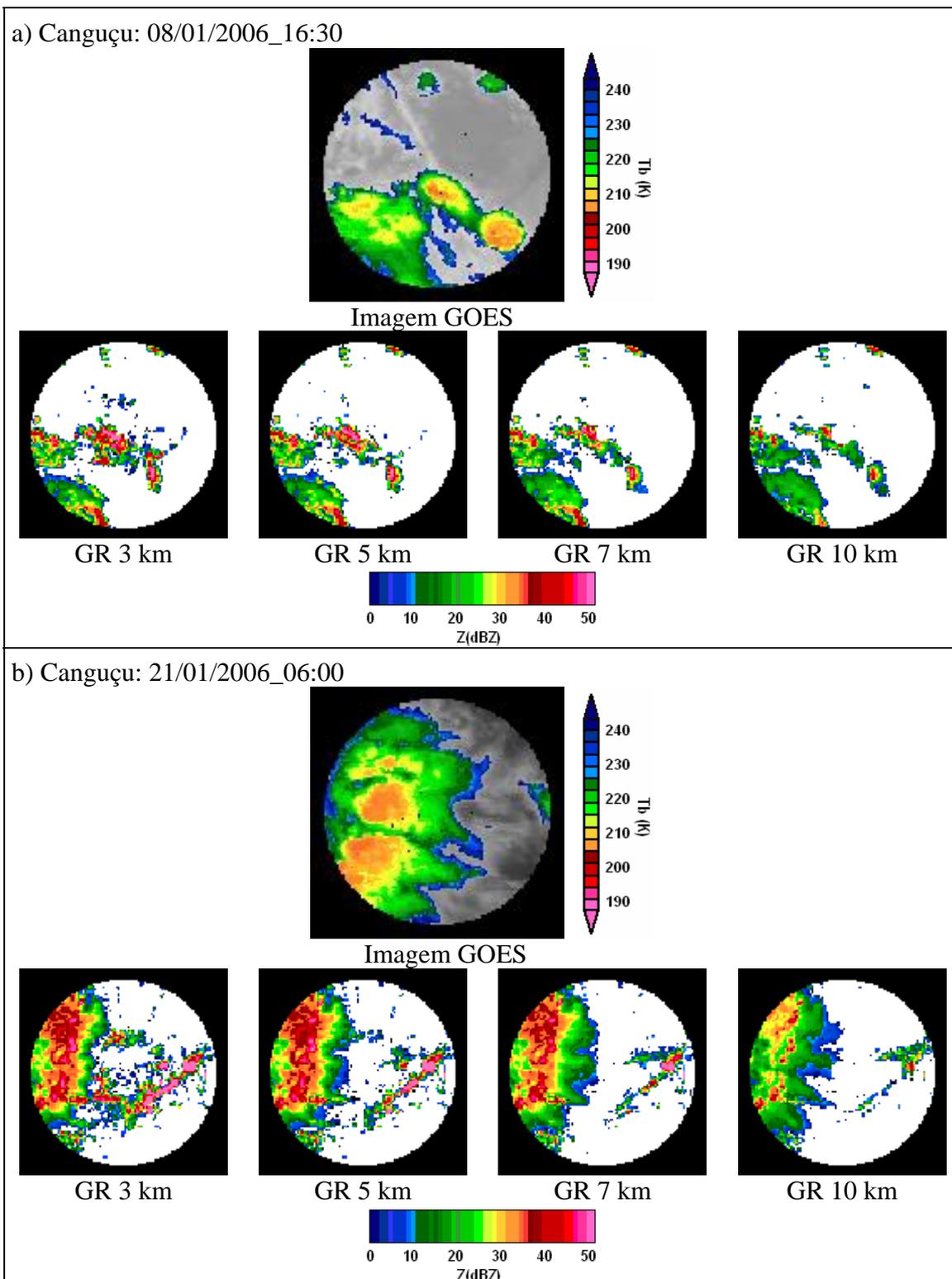
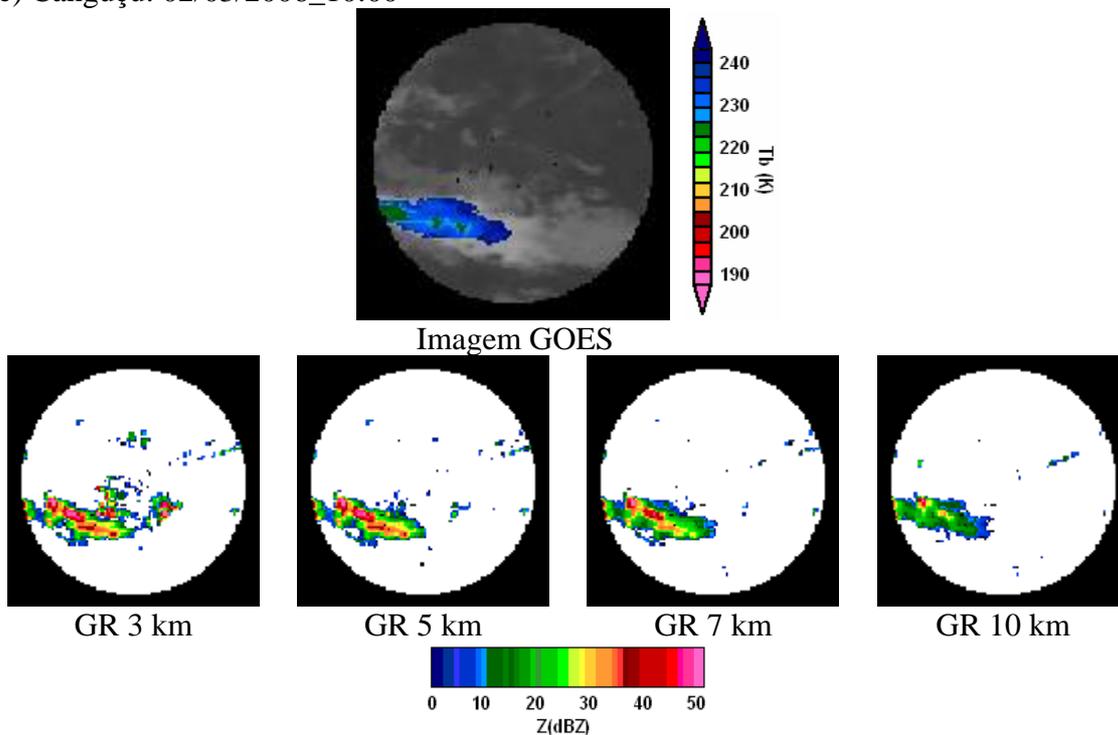


Figura 5.1 – Comparação entre o canal 4 da imagem do satélite GOES 12 e os CAPPI's de 3, 5, 7 e 10 km de altura para os radares de Canguçu, Morro da Igreja, São Roque e Gama. (continua)

c) Canguçu: 02/03/2006_10:00



d) Morro da Igreja: 21/02/2006_13:30

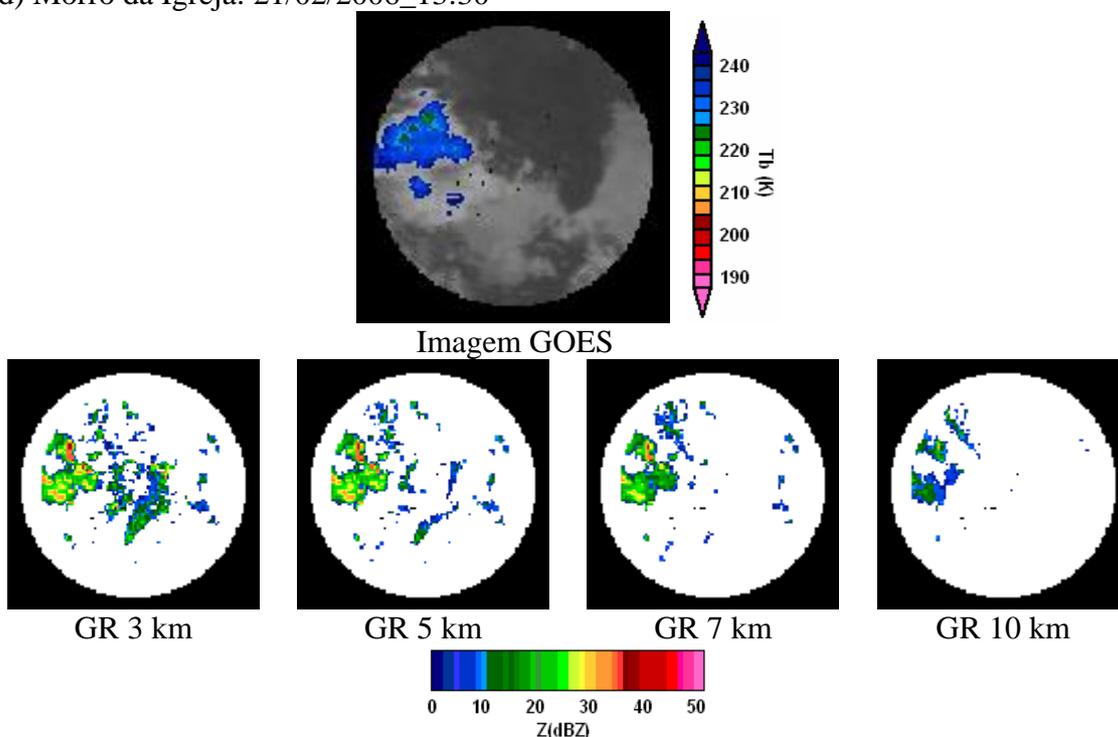
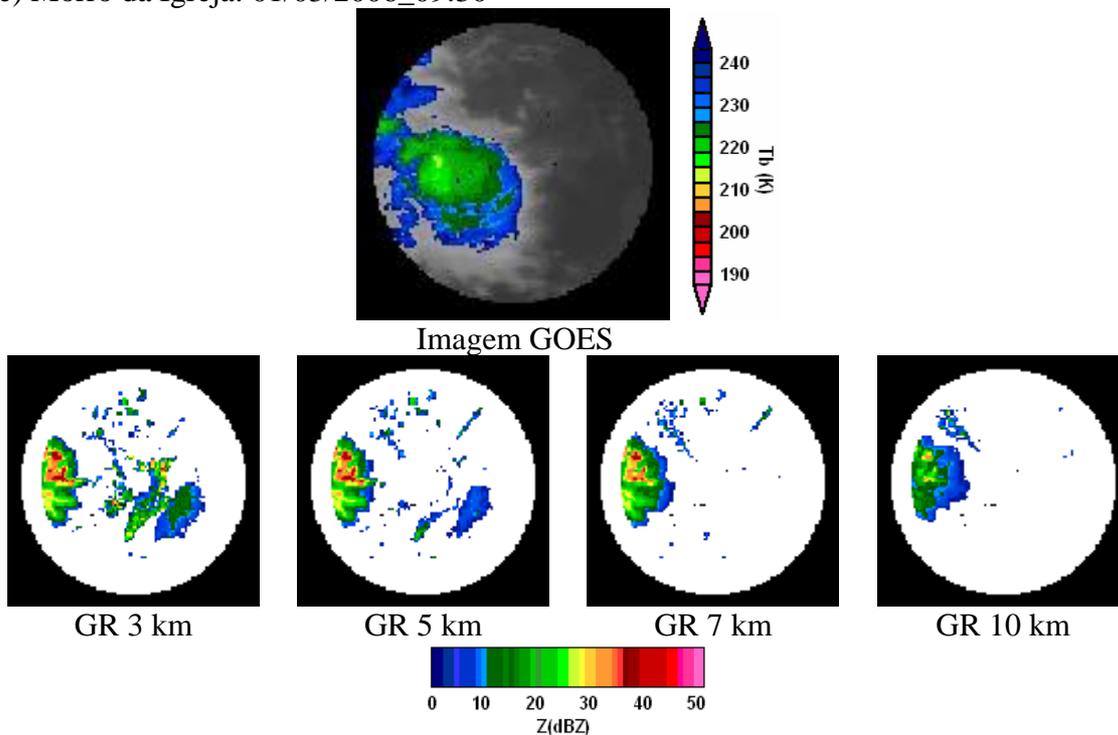


Figura 5.1 – Continuação.

(continua)

e) Morro da Igreja: 01/03/2006_09:30



f) Morro da Igreja: 04/06/2006_15:00

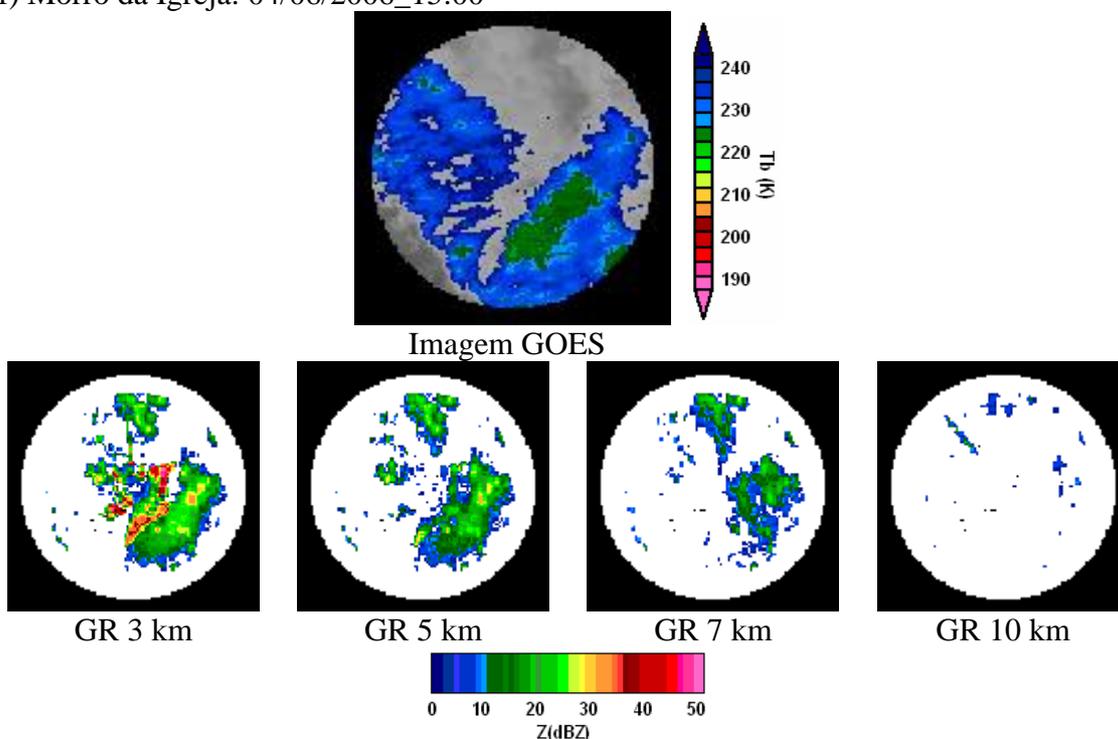
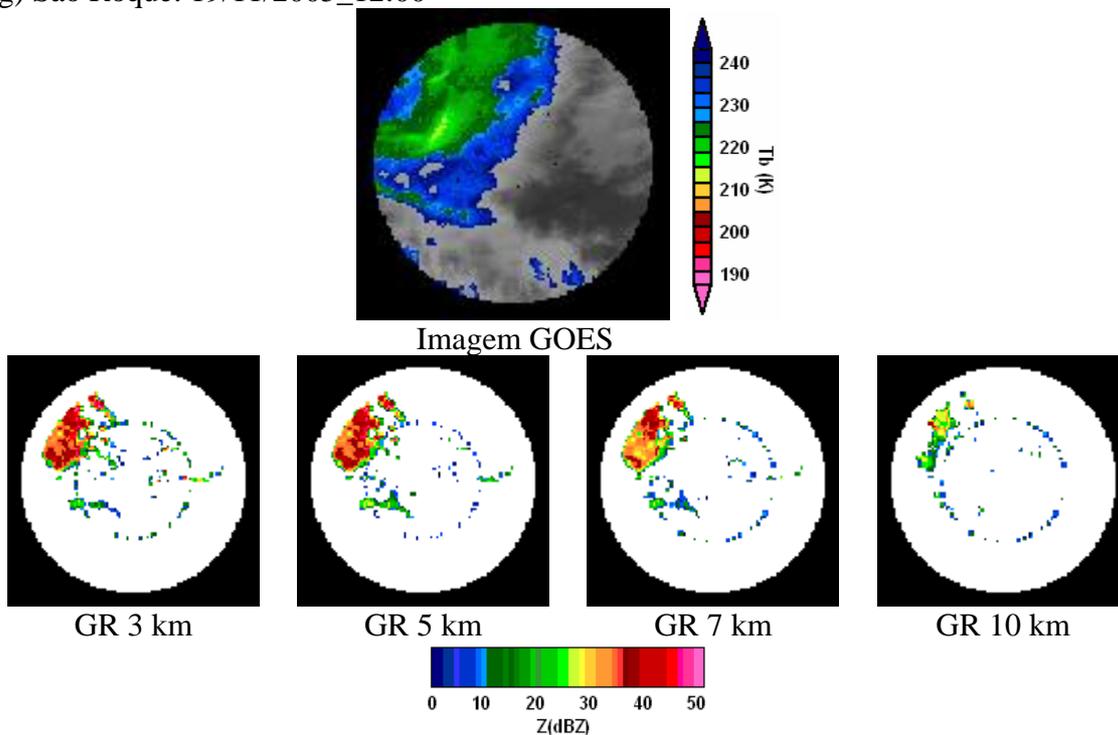


Figura 5.1 – Continuação.

(continua)

g) São Roque: 19/11/2005_12:00



h) São Roque: 30/11/2005_07:00

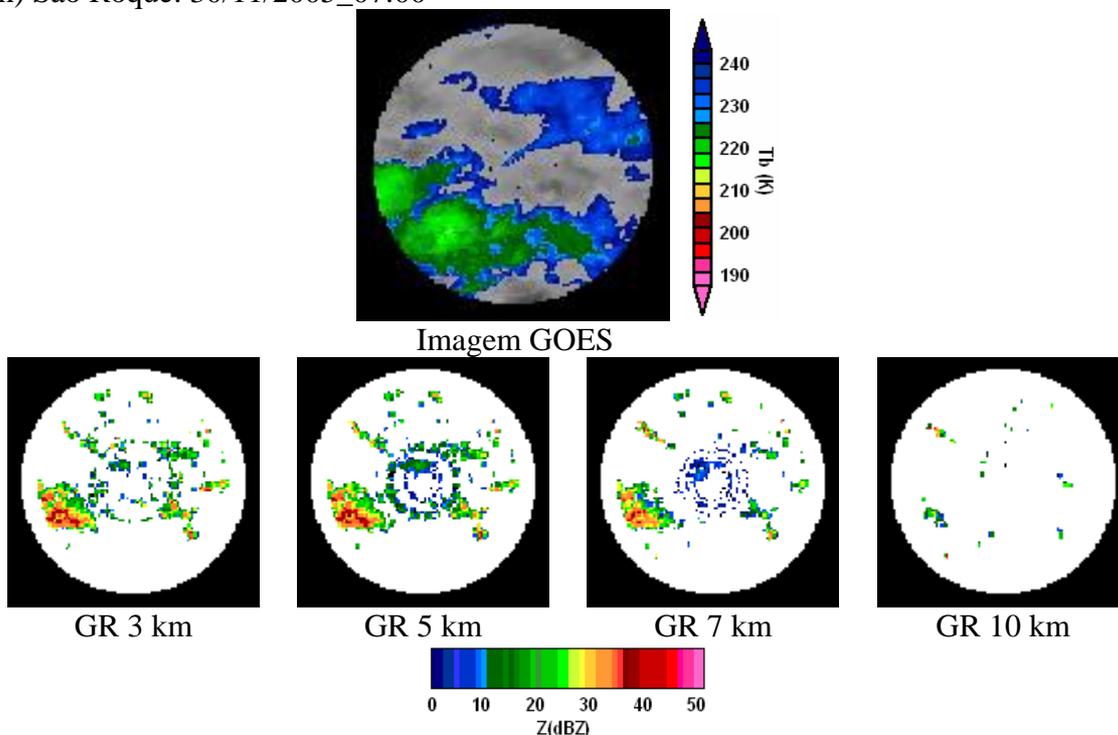
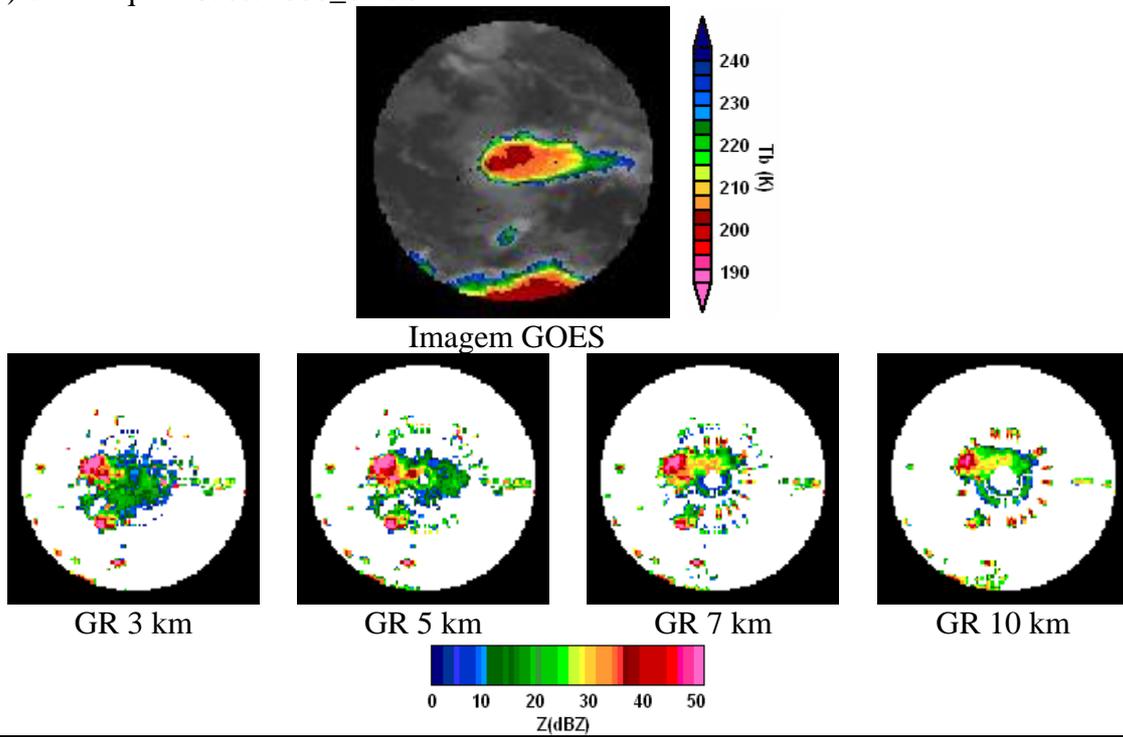


Figura 5.1 – Continuação.

(continua)

i) São Roque: 29/03/2006_01:30



j) Gama: 23/11/2005_18:00

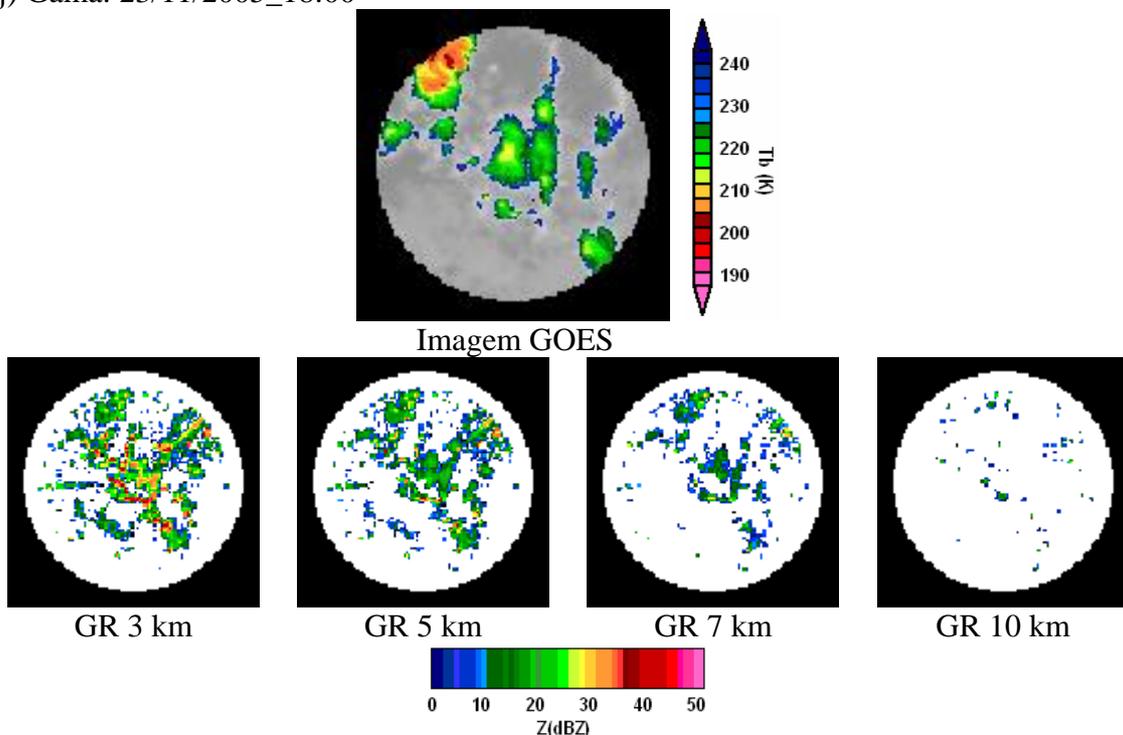
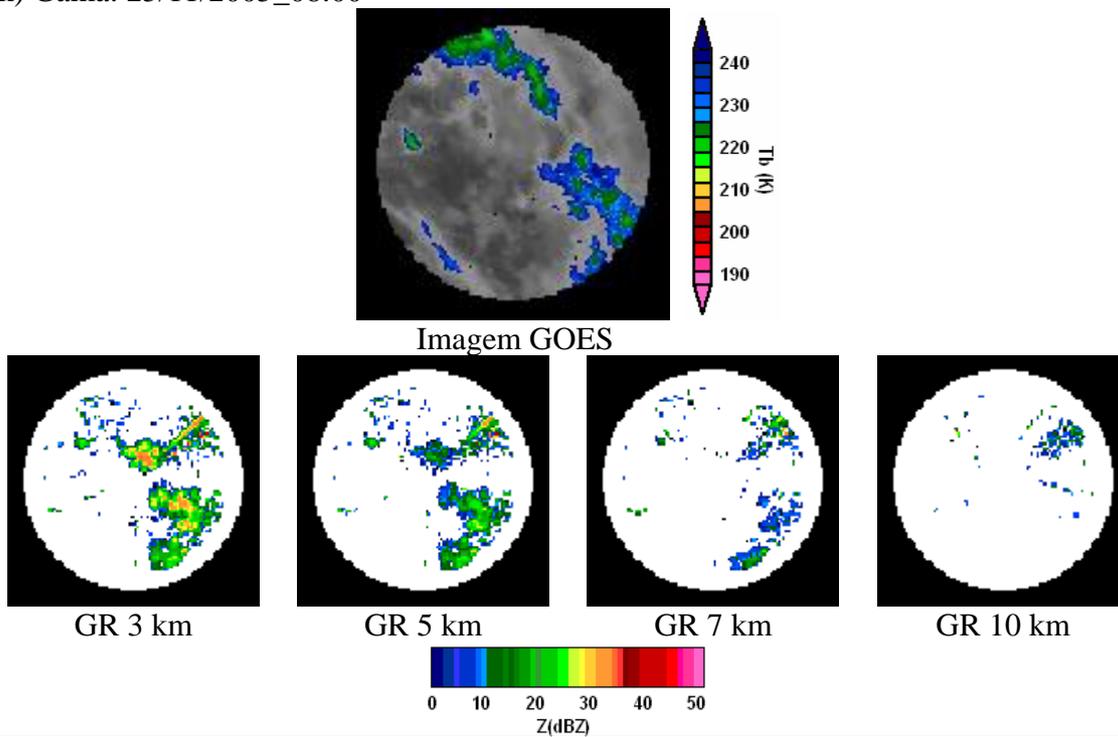


Figura 5.1 – Continuação.

(continua)

k) Gama: 25/11/2005_08:00



l) Gama: 31/03/2006_16:00

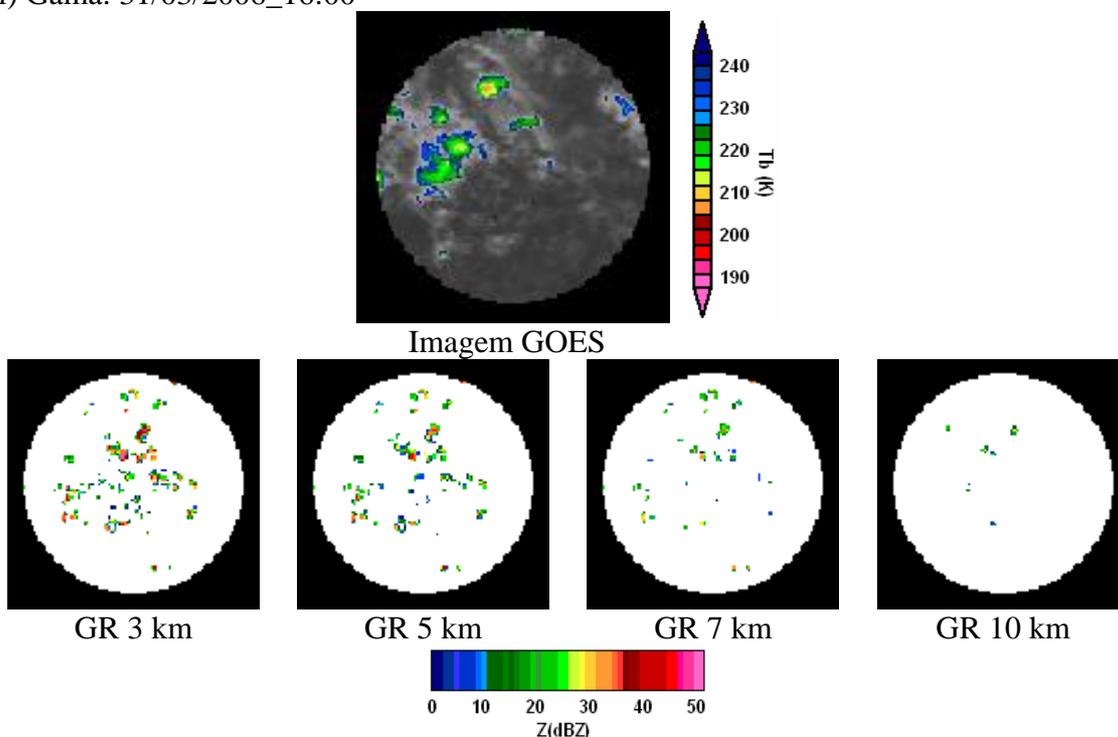
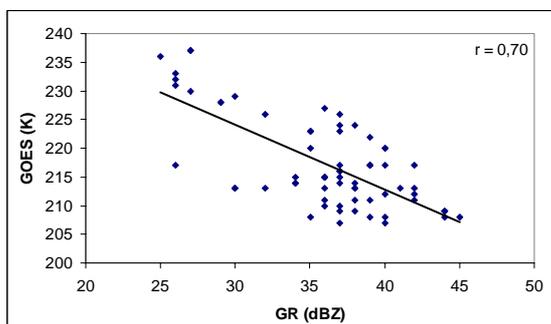


Figura 5.1 – Conclusão.

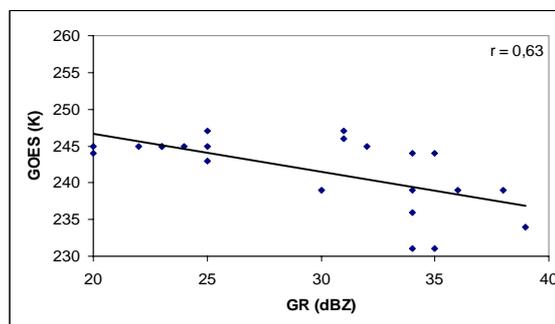
Todas as figuras mostradas anteriormente apresentam boa concordância na localização entre os sistemas precipitantes identificados pelos dois tipos de sensores (radar e infravermelho). Como afirmado anteriormente, isso indica um adequado apontamento da antena dos radares GR.

Os gráficos de correlação (Figura 5.2), elaborados para um caso de cada radar e para apenas uma reta, indicam também uma aparente concordância entre valores de temperatura de brilho das imagens GOES 12 com os valores de refletividade do radar dos sensores GR. Observa-se que, no caso selecionado para cada radar de superfície, há uma significativa correlação negativa ao nível de 5%. Essa relação era esperada e poderia ser usada para avaliar a qualidade dos dados dos radares. Porém, dadas as grandes implicações físicas envolvidas nos processos de aquisição de dados de cada tipo de sensor (infravermelho e radar), essa atividade merece uma pesquisa dedicada a isso e poderá ser feita após a conclusão deste presente trabalho.

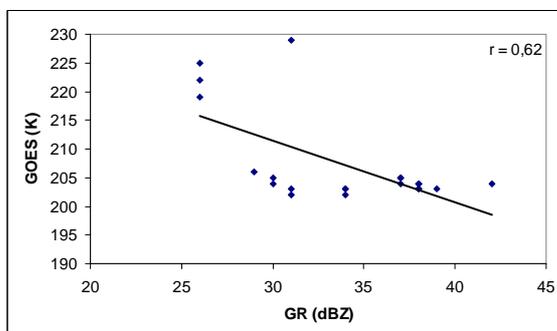
a) Canguçu: 21/01/2006_06:00



b) Morro da Igreja: 04/06/2006_15:00



c) São Roque: 29/03/2006_01:30



d) Gama: 25/11/2005_08:00

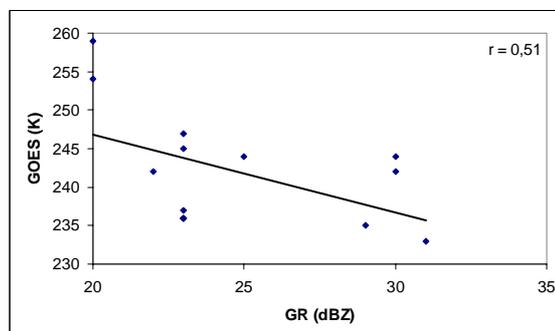


Figura 5.2 – Gráfico de dispersão entre os dados de temperatura de brilho da imagem do satélite GOES 12 e os dados de refletividade do GR.

5.2 Comparação entre os CAPPI's obtidos pelo DECEA e os obtidos pelo Método de Amostragem Tridimensional

O programa de controle e processamento de dados instalado em cada um dos radares do DECEA (FROG 2) está programado para produzir CAPPI's a cada 15 minutos para os níveis de 3, 5, 7 e 10 km de altura. Esses produtos são utilizados tanto pelo próprio DECEA quanto pelo CPTEC, onde os CAPPI's a 3 km de altura são aproveitados para a elaboração de mapas de precipitação.

Por se tratar de um software que reside na estação de recepção do radar, o FROG 2 precisa gerenciar o fluxo de dados que é recebido pelo radar e ainda gerar os produtos programados em sua receita de aquisição de dados. Dada essas complicações, é necessário que o desempenho desse programa seja muito alto para que todos os processos programados sejam feitos dentro do tempo máximo de aquisição e processamento de dados (no caso dos radares GR esse tempo se repete a cada 15 minutos). Desta forma, é necessário muita velocidade de processamento, o que implicará na qualidade do dado produzido, principalmente os produtos CAPPI's.

O algoritmo usado pelo FROG 2 para a elaboração dos CAPPI's trabalha de forma que somente os produtos para baixos níveis apresente uma boa qualidade nos dados. Para alturas mais elevadas (7 e 10 km), o algoritmo deixa lacunas de valores em vários locais (em forma de círculo), o que acarreta uma perda de informação dos sistemas precipitantes. As deficiências geradas pelo algoritmo usado pelo FROG 2 podem ser vistas na Figura 5.3.

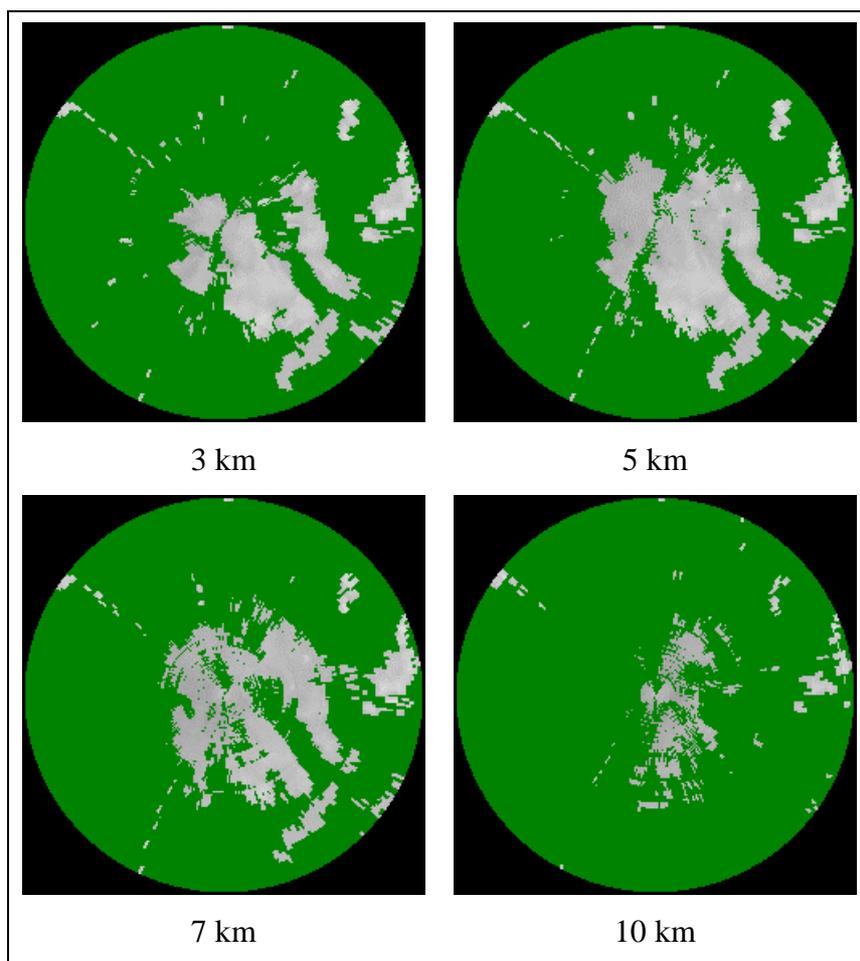


Figura 5.3 – Efeitos da perda de informação em relação à altura produzida pelo algoritmo de elaboração dos produtos CAPPI's do software FROG 2 para o radar de São Roque no dia 23 de janeiro de 2006 às 19:50 GMT.

A Figura 5.3 mostra o dado bruto em níveis de cinza. Esses valores são transformados em refletividades radar através da seguinte expressão:

$$dBZ = 0,5 * X - 31 \quad (5.1)$$

em que, X é o valor do nível de cinza e varia entre 2 e 255. Assim, os valores possíveis de refletividades estão entre -30 dBZ e 96,5 dBZ.

Os resultados mostrados anteriormente, evidenciam que para certas aplicações os produtos CAPPI's, gerados pelo software FROG 2, podem acarretar incertezas significativas. Um exemplo disso é o levantamento da estrutura vertical de um dado

sistema precipitante. Na Figura 5.3 percebe-se que, para os níveis de 7 e 10 km de altura, a perda de informações é visível, principalmente em locais próximos ao radar. O aparecimento dessas lacunas é decorrente da pouca eficiência do algoritmo do software FROG 2 que elabora os produtos CAPPI's. Para solucionar esse problema é necessário a criação ou utilização de outro algoritmo, que seja mais eficaz em reproduzir a estrutura vertical do volume de dados amostrado. Por esta razão, essa pesquisa adotou o Método de Amostragem Tridimensional para a elaboração de produtos CAPPI's (Anagnostou et al. 2000).

Os resultados mostrados a seguir exibem a comparação entre os CAPPIS's gerados pelo Método de Amostragem Tridimensional e os CAPPI's gerados pelo software FROG 2.

Na Figura 5.4 têm-se as distribuições horizontais (CAPPI's de 3, 5, 7 e 10 km de altura) elaboradas pelo Método de Amostragem Tridimensional (linha superior) e pelo software FROG 2 (linha inferior). Fazendo-se uma comparação entre os produtos, observa-se que há semelhanças na localização dos sistemas, como era de se esperar, mas há diferença na intensidade e também, algumas descontinuidades nos campos de refletividade, que podem ser observadas na Figura 5.4, principalmente nos CAPPI's de 7 e 10 km de altura do DECEA.

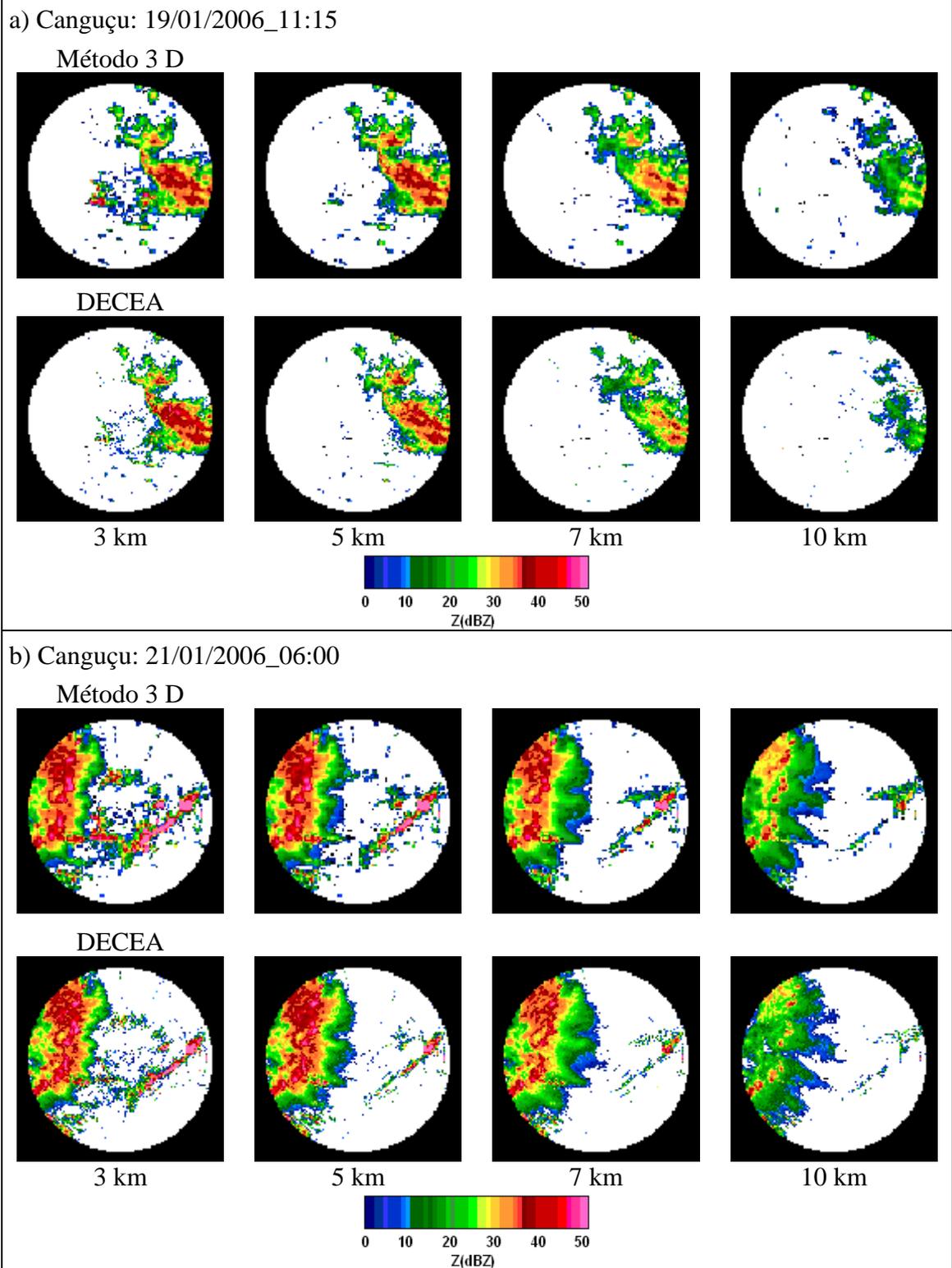
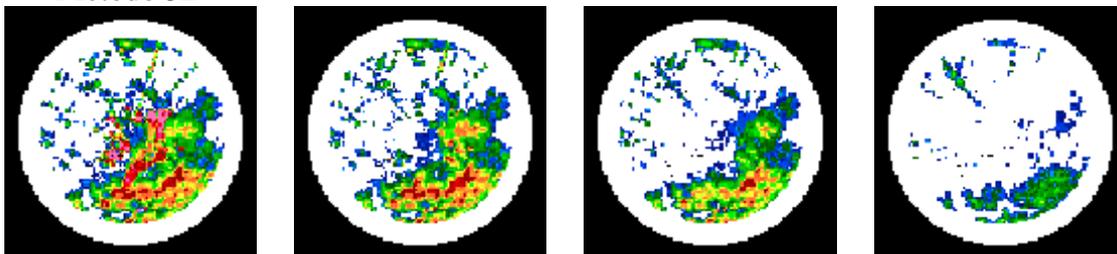


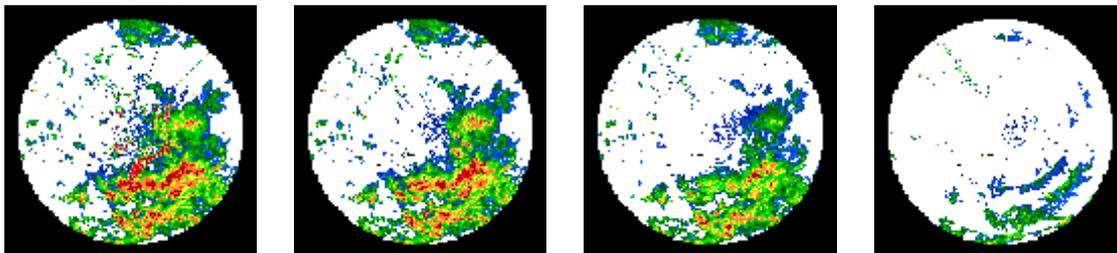
Figura 5.4 – Comparação entre os CAPPI's obtidos pelo DECEA e o Método de Amostragem Tridimensional para o radar de Canguçu, Morro da Igreja, São Roque e Gama. (continua)

c) Morro da Igreja: 23/01/2006_09:00

Método 3D



DECEA

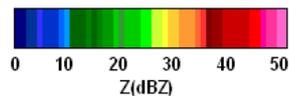


3 km

5 km

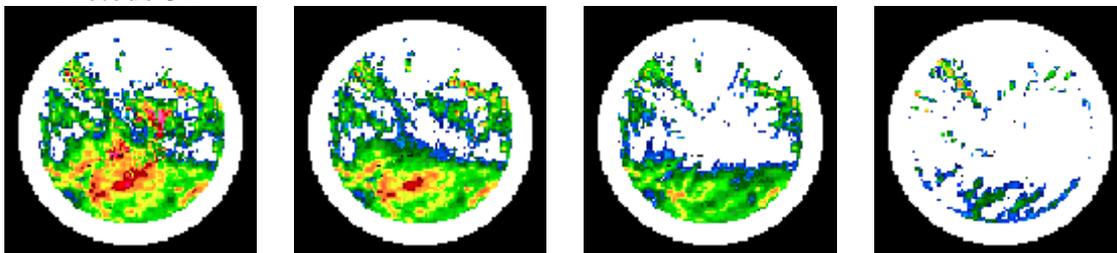
7 km

10 km

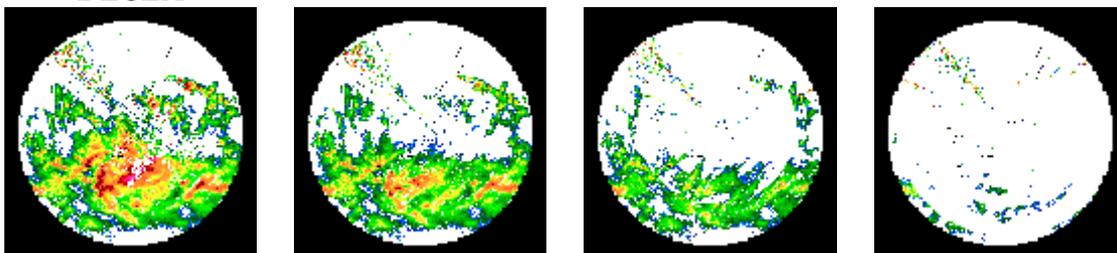


d) Morro da Igreja: 16/06/2006_03:45

Método 3D



DECEA



3 km

5 km

7 km

10 km

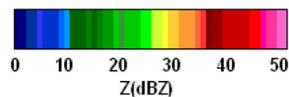
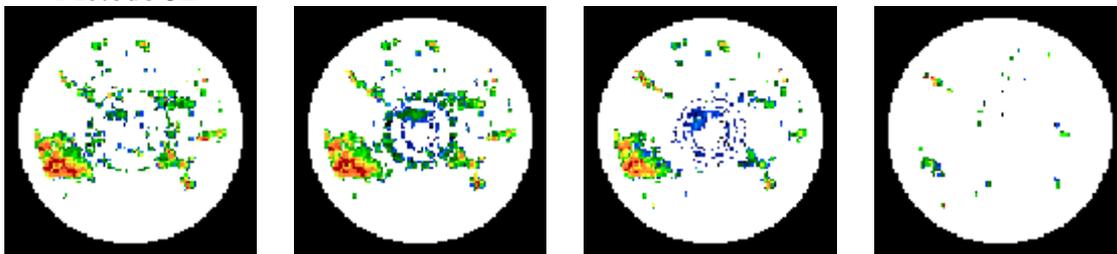


Figura 5.4 – Continuação.

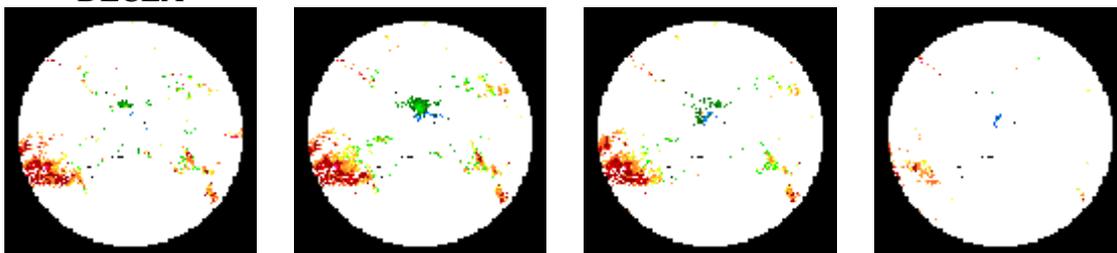
(continua)

e) São Roque: 30/11/2005_06:45

Método 3D



DECEA

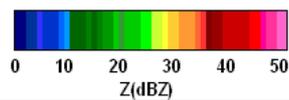


3 km

5 km

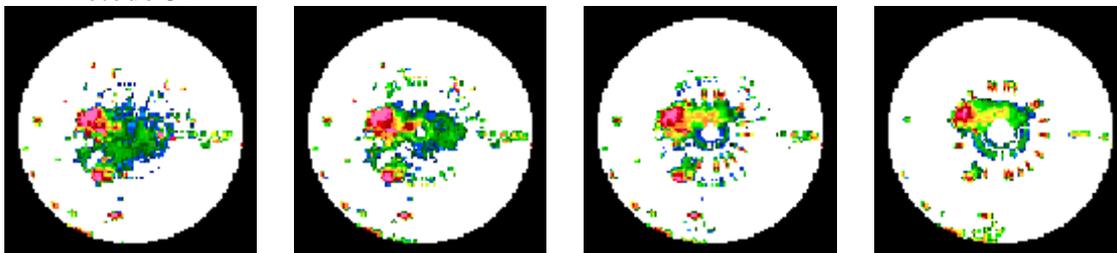
7 km

10 km

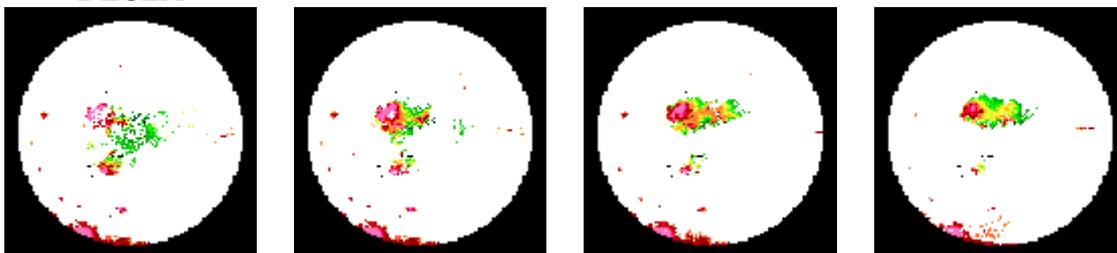


f) São Roque: 29/03/2006_01:15

Método 3D



DECEA



3 km

5 km

7 km

10 km

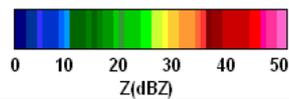
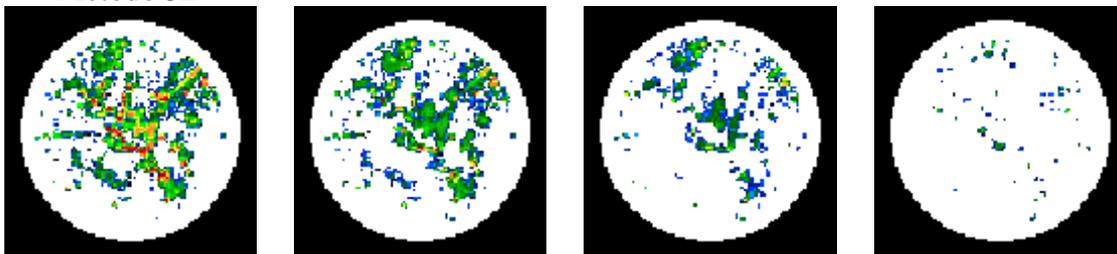


Figura 5.4 – Continuação.

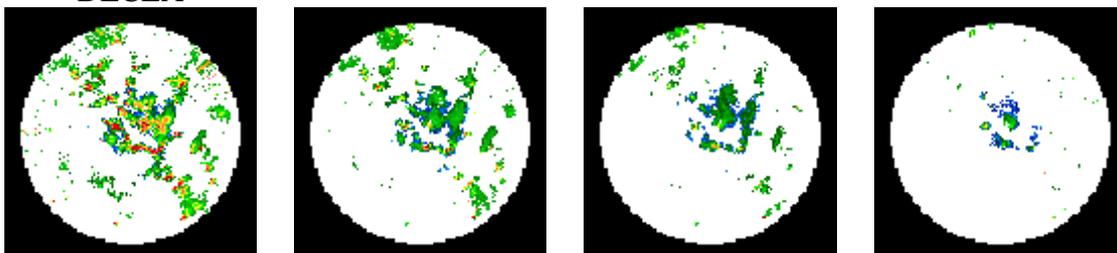
(continua)

g) Gama: 23/11/2005_18:00

Método 3D



DECEA

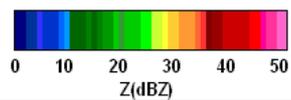


3 km

5 km

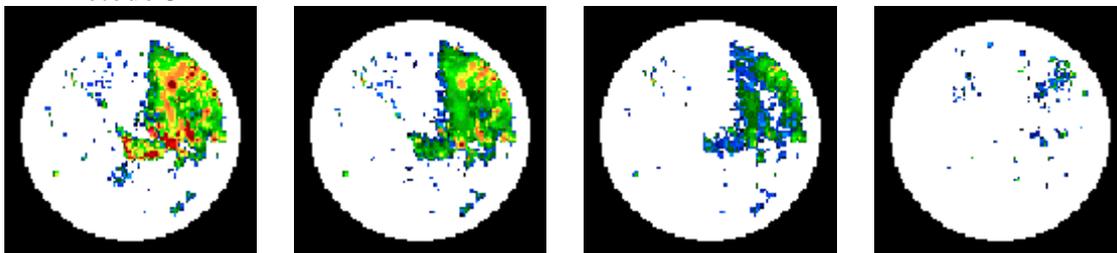
7 km

10 km

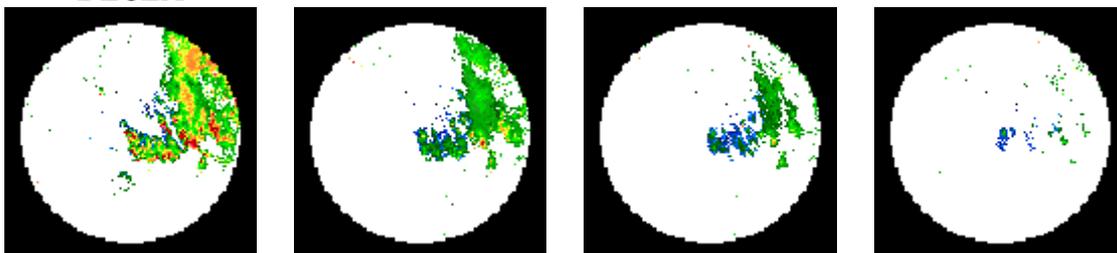


h) Gama: 24/11/2005_17:15

Método 3D



DECEA



3 km

5 km

7 km

10 km

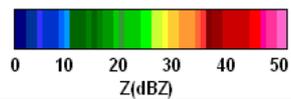
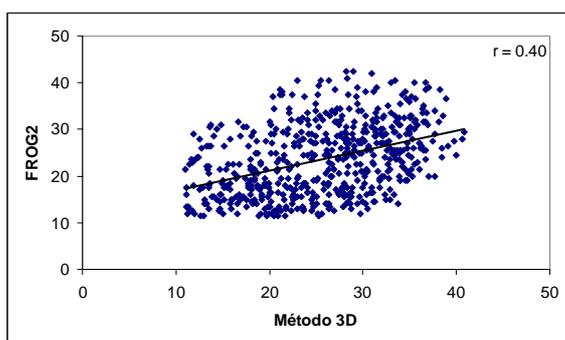


Figura 5.4 – Conclusão.

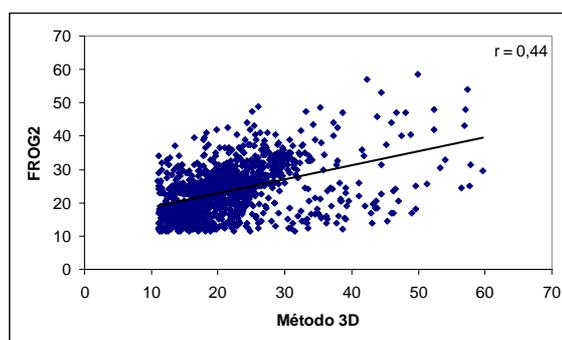
Nas Figuras 5.4c, 5.4d, 5.4g e 5.4h para os radares de Morro da Igreja e Gama, respectivamente, observa-se que nos CAPPI's obtidos pelo Método de Amostragem Tridimensional há uma redução no alcance do radar. Para esses casos em particular, as tabelas elaboradas, para gerar os CAPPI's pelo Método de Amostragem Tridimensional, limitou o alcance do radar em 200 km.

Para melhor comparar e avaliar os resultados, fez-se uma avaliação na correlação entre os dois produtos e plotou-se gráficos de dispersão para os dados obtidos (Figura 5.5). Os valores considerados neste teste foram somente aqueles maiores que 10 dBZ, extraídos para os quatro níveis de altura, dentro de um raio de 100 km do radar.

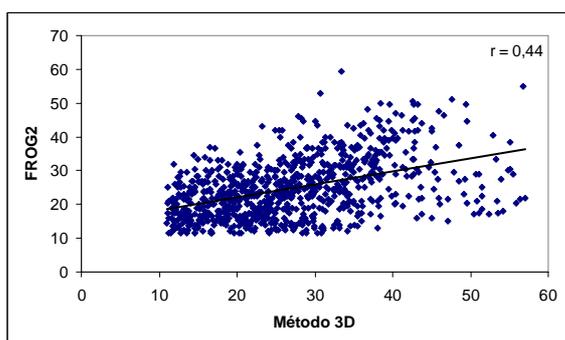
a) Canguçu: 19/01/2006_11:15



b) Canguçu: 21/01/2006_06:00



c) Morro da Igreja: 23/01/2006_09:00



d) Morro da Igreja: 16/06/2006_03:45

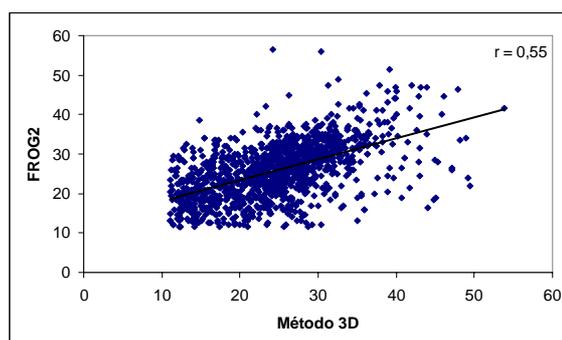
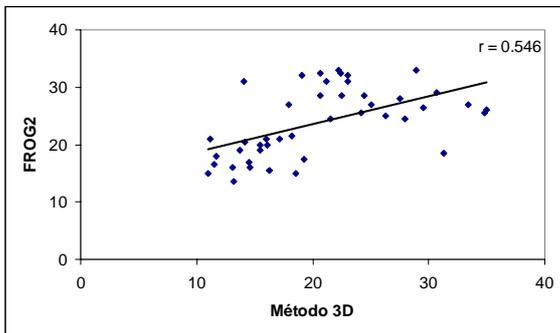
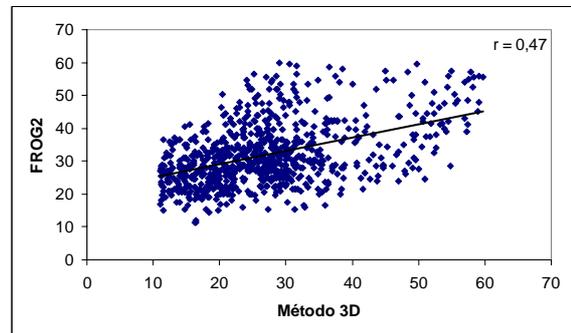


Figura 5.5 – Gráficos de dispersão entre os dados obtidos pelo FROG2 e o Método de Amostragem Tridimensional. (continua)

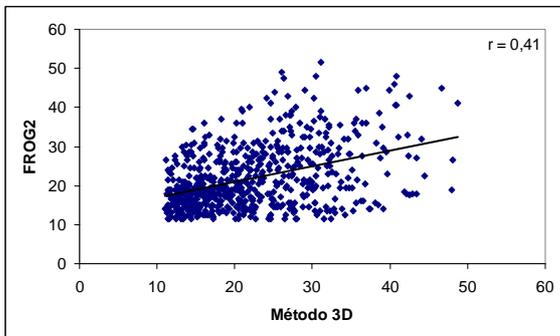
e) São Roque: 30/11/2005_06:45



f) São Roque: 29/03/2006_01:15



g) Gama: 23/11/2005_18:00



h) Gama: 24/11/2005_17:15

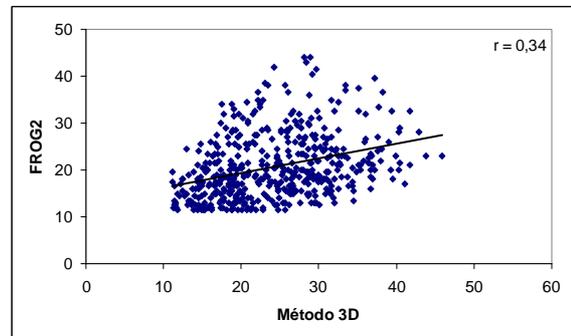


Figura 5.5 – Conclusão.

Analisando os gráficos de dispersão, da Figura 5.5, observa-se que há uma correlação significativa ao nível de 5%. As altas variâncias observadas nos gráficos de dispersão provavelmente estão relacionadas à forma de elaboração dos produtos. Como mostrado anteriormente, os CAPPI's feitos pelo software FROG 2 não preenchem adequadamente todos os *gates*² do produto. O software parece utilizar *bins* que não correspondem à altura desejada. Por outro lado, o Método de Amostragem Tridimensional utiliza todos, ou parte dos *bins*, que cruzam o plano da altura desejada e ocupam a célula de 1 km³ usada pelo método. Isso resulta num produto em que cada *gate* terá um valor de refletividade que corresponde a quantidade de hidrometeoros que ocupam aquele espaço.

² Gate - Área considerada pelo software do radar que será preenchida por um valor de refletividade.

5.3 Comparação PR x GR

Os produtos CAPPI de cada radar utilizados nessa pesquisa mostram os valores de refletividade sobre toda a área de cobertura dos sensores. Para os radares GR, os CAPPI's enfocam uma área circular com diâmetro de 500 km que, portanto, sempre se apresenta com uma grade regular, na qual cada ponto é associado a uma latitude e longitude fixas. Para o radar PR, a área de cobertura possui sempre uma largura constante de 245 km, porém, devido à órbita inclinada do satélite, a área imageada apresenta latitude e longitude diferentes para cada ponto de grade do CAPPI. Essas características diferentes de amostragem fazem com que somente parte da área de cobertura do radar GR seja coincidente com a área de cobertura do radar PR, com o agravante de que essa coincidência de áreas de amostragem também varia em função da órbita do satélite.

5.3.1 Radar de Canguçu

5.3.1.1 CAPPI e Secções Transversais

Para avaliar a distribuição horizontal dos campos de refletividade do PR e do GR foram utilizados nove casos, cuja diferença entre as horas de aquisição de ambos não excedeu a dez minutos. A partir dos dados volumétricos obtidos pelos dois radares, PR e GR, foram extraídos quinze CAPPI's, sendo que cada um mostra o campo de refletividade do radar a uma altura que variou de 2 a 16 km. Com a finalidade de avaliar o desempenho de cada tipo de radar na detecção da estrutura vertical de sistemas precipitantes, também foram elaboradas secções transversais, a partir dos CAPPI's obtidos anteriormente. A Figura 5.6 mostra os campos horizontais de refletividade do radar (CAPPI a 3 km de altura), as secções transversais cobrindo a faixa de altura entre 2 e 16 km obtidas para cada radar e o gráfico de dispersão entre os valores obtidos em ambas as secções transversais.

De acordo com os CAPPI's, verifica-se que há grandes semelhanças na distribuição espacial dos campos de refletividade obtidos pelo PR e GR, ou seja, a identificação dos sistemas precipitantes presentes em cada caso é bem representada pelos dois tipos de

radares. Entretanto, percebe-se que o GR tende a superestimar os valores em quase todos os casos. As possíveis causas para essa aparente superestimação, em relação ao PR, serão discutidas a seguir.

Para evitar que a distância dos pontos de amostragem em relação ao centro do radar interferisse muito nos resultados, foi estabelecido um raio de 100 km a partir do centro do radar como área aceitável para a coleta de dados e elaboração dos histogramas de frequência. Os resultados são mostrados em forma de gráficos exibidos na figura abaixo.

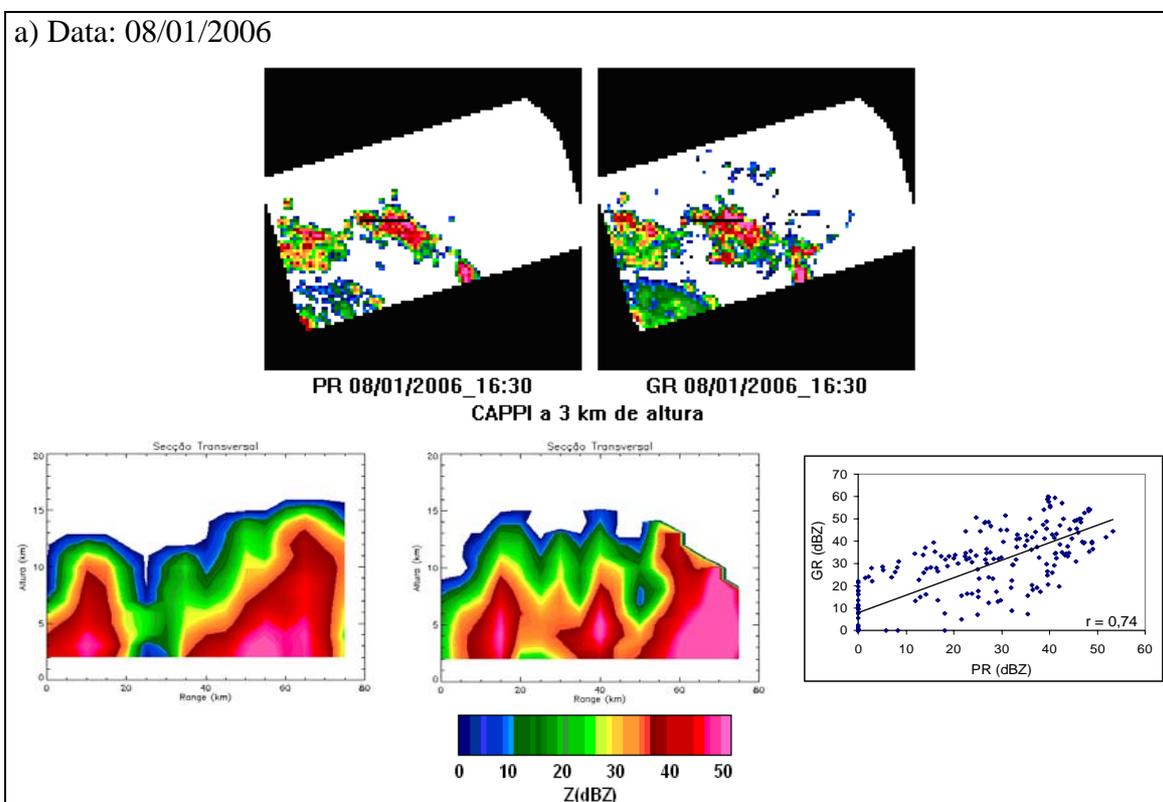
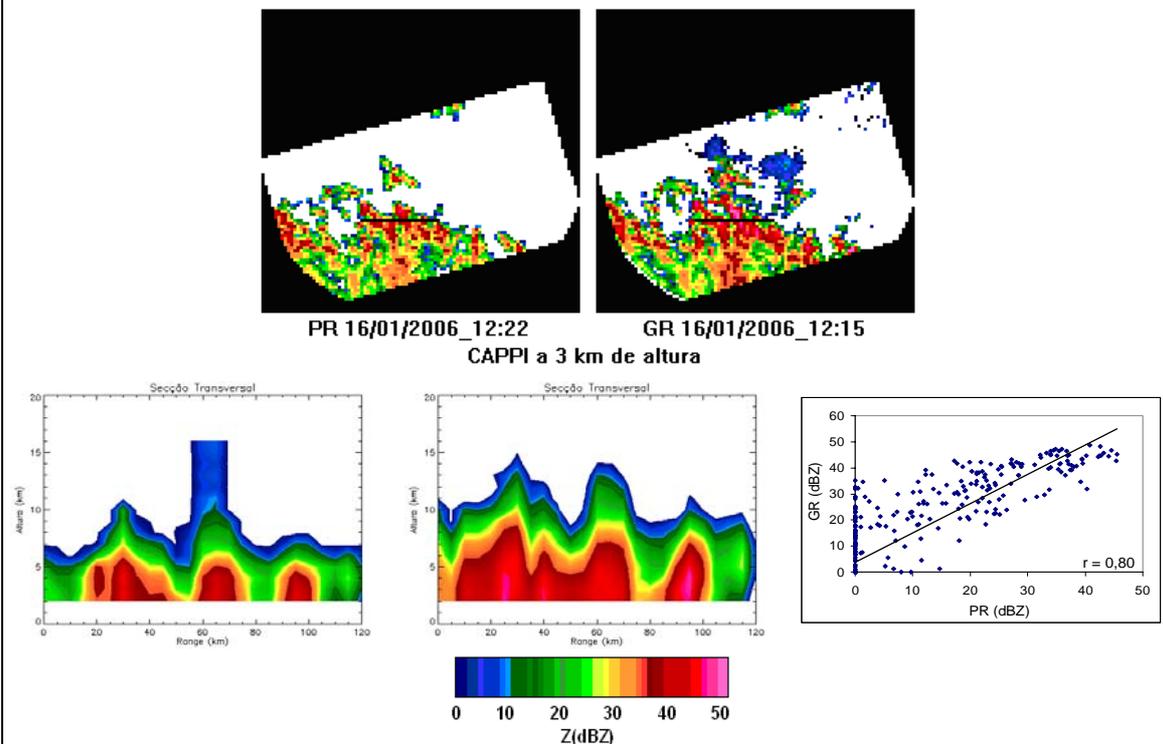


Figura 5.6 – Distribuição horizontal, seções transversais (esquerda PR e direita GR) e gráficos de dispersão para o PR e o GR. (continua)

b) Data: 16/01/2006



c) Data: 17/01/2006

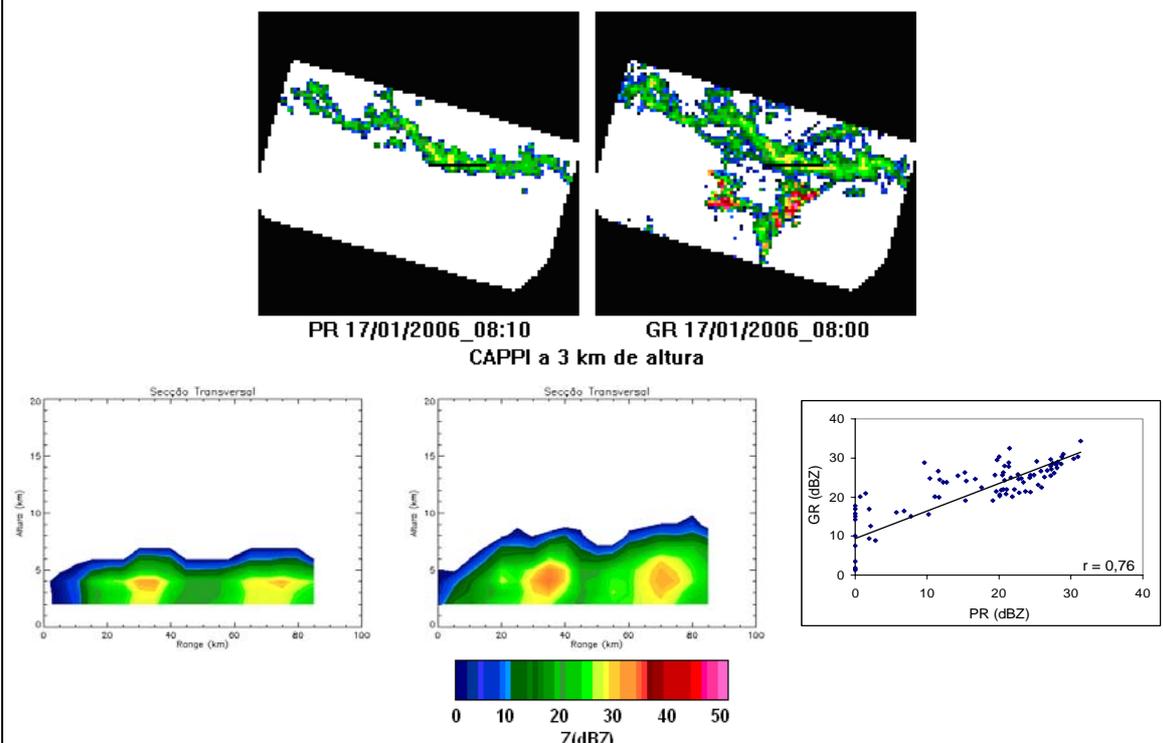
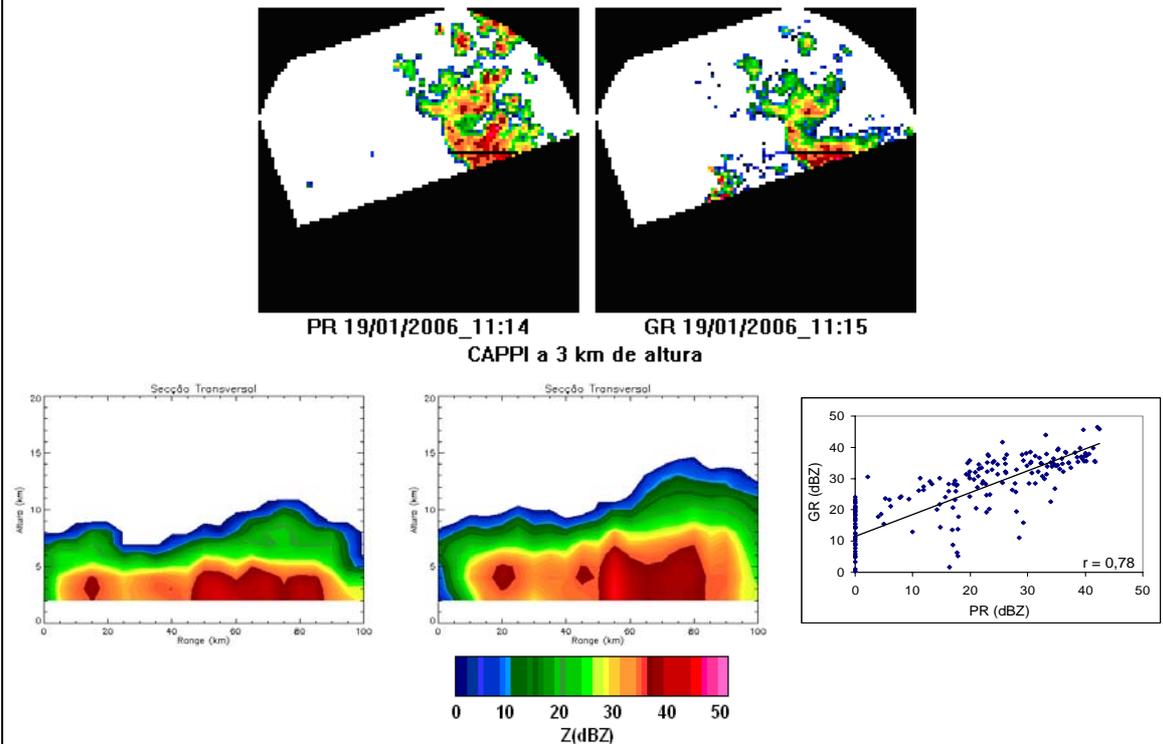


Figura 5.6 – Continuação.

(continua)

d) Data: 19/01/2006



e) Data: 21/01/2006

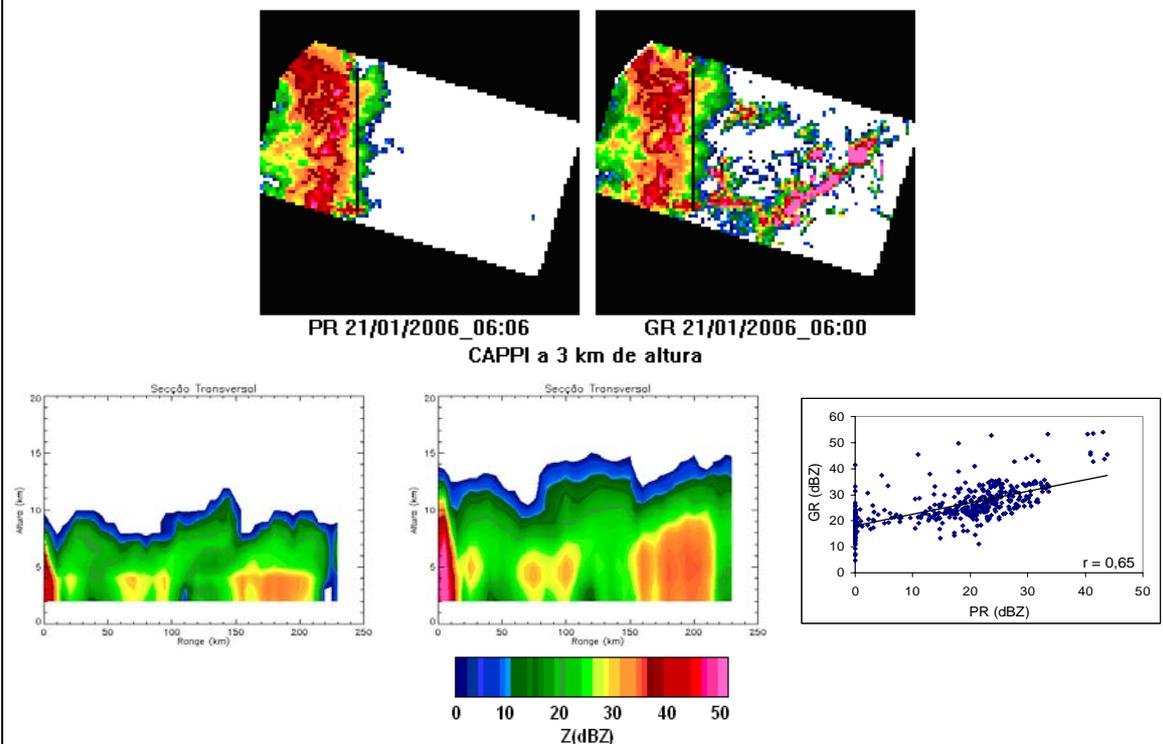
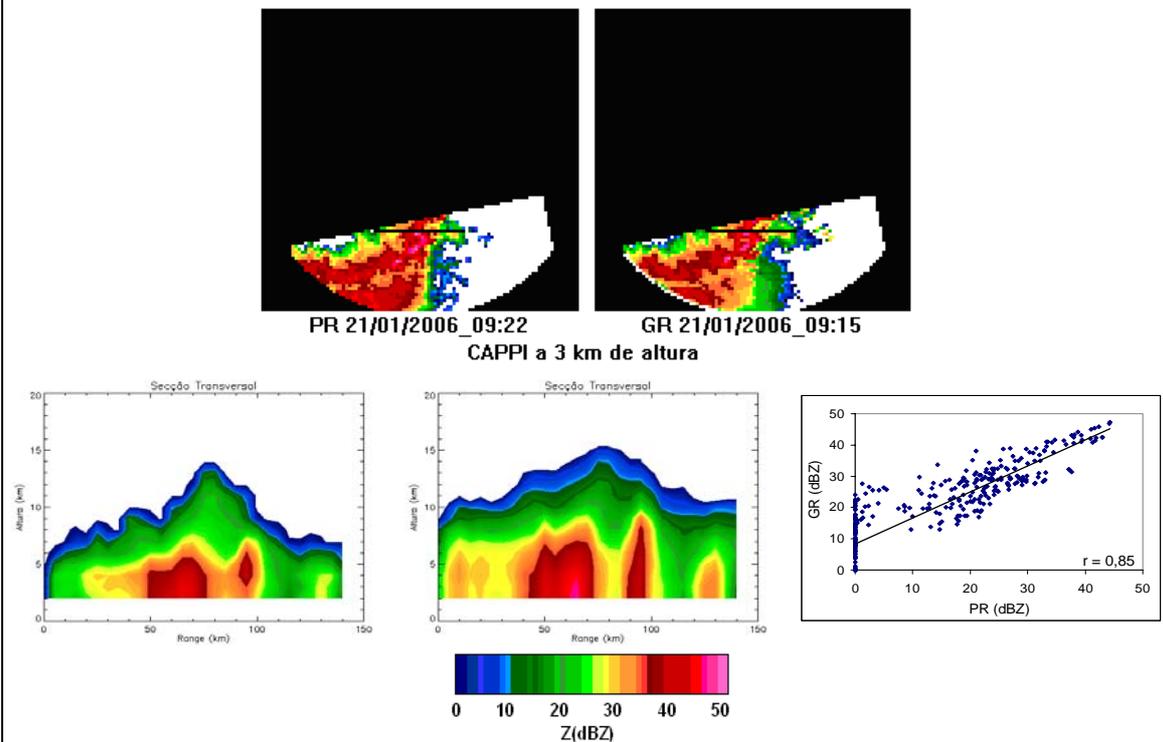


Figura 5.6 – Continuação.

(continua)

f) Data: 21/01/2006



g) Data: 23/03/2006

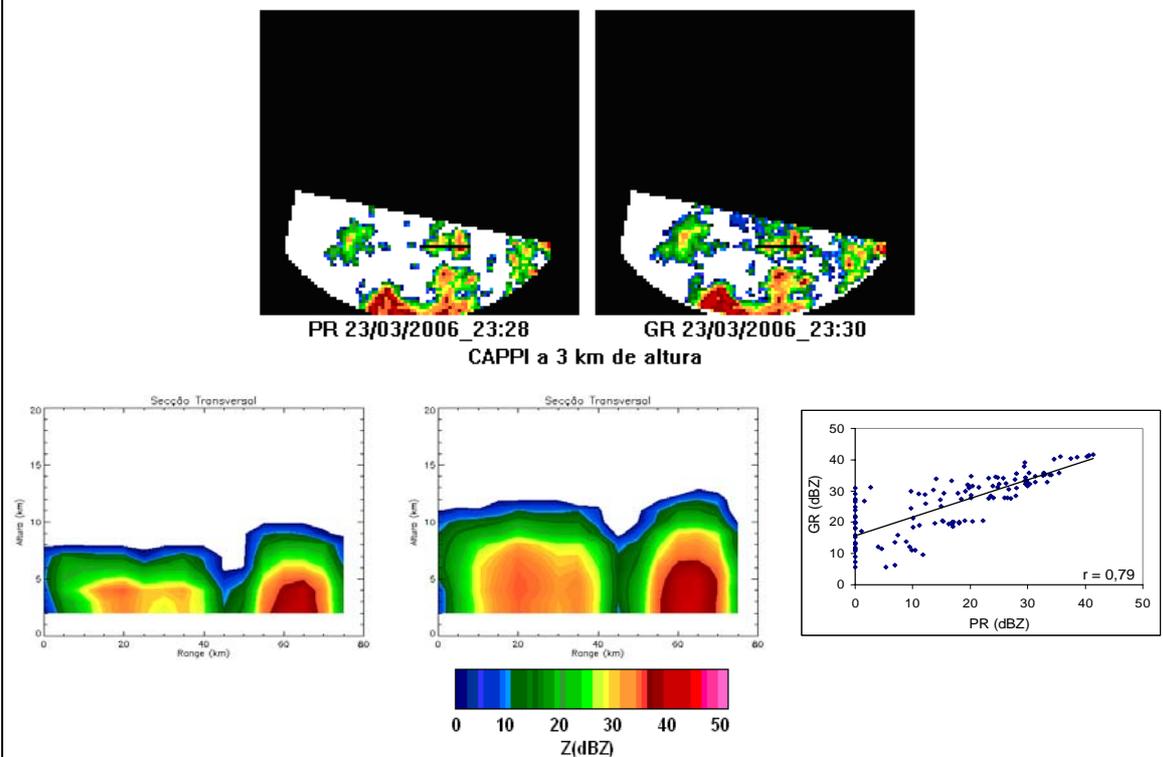
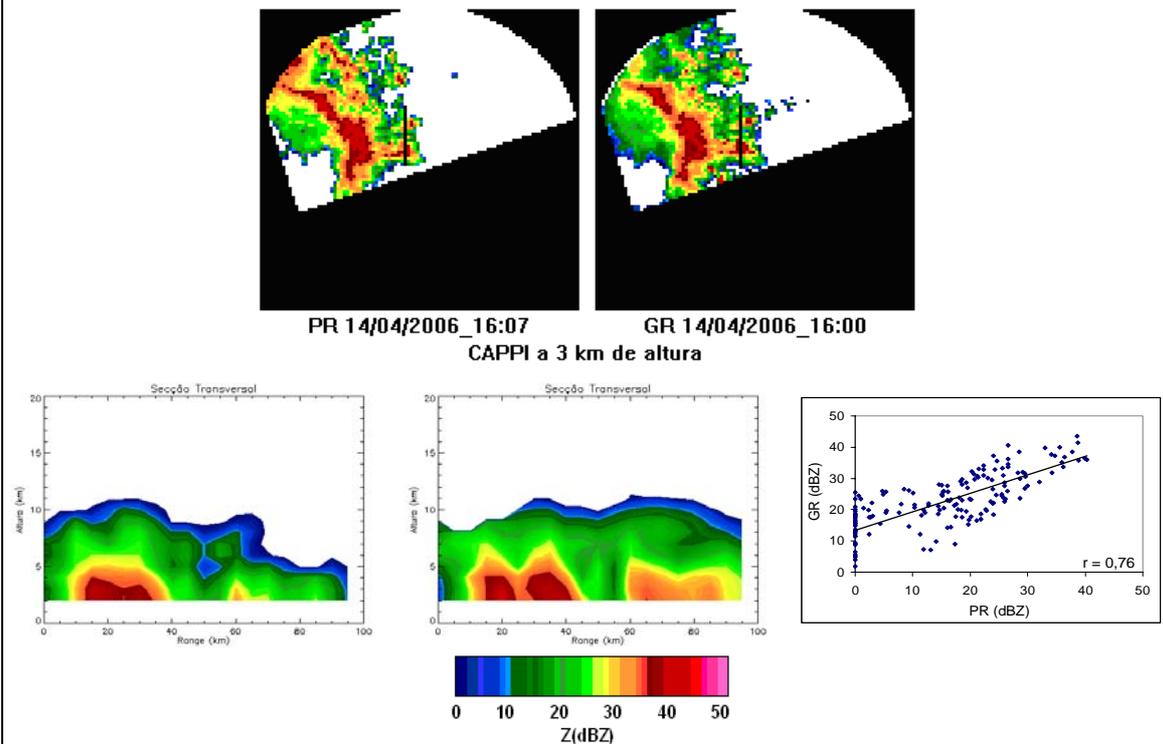


Figura 5.6 – Continuação.

(continua)

h) Data: 14/04/2006



i) Data: 21/06/2006

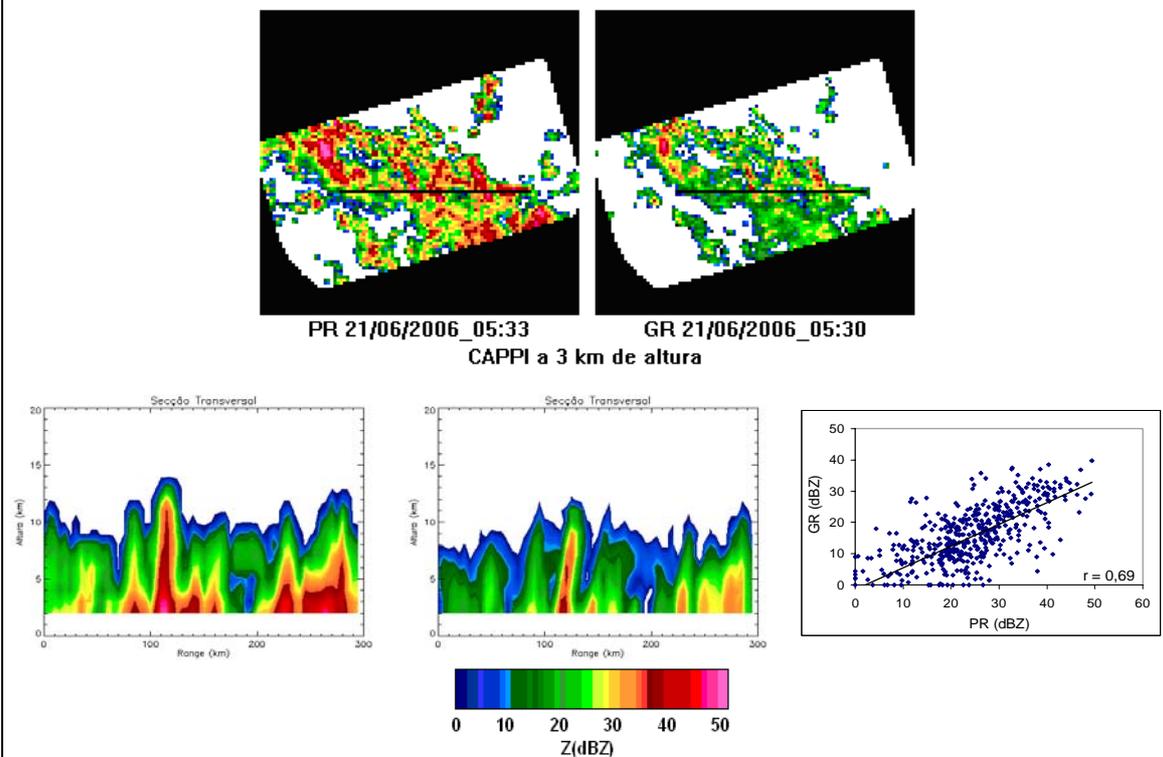


Figura 5.6 – Conclusão.

Comparando as secções transversais do PR com as do GR (Figura 5.6), observa-se que na maioria dos casos as secções transversais do GR apresentam alturas, dos sistemas precipitantes, diferentes daquelas vistas no PR. Estas diferenças, possivelmente, estão relacionadas à não coincidência da hora de aquisição dos dados de cada radar. Alguns minutos na diferença do tempo de observação dos dois radares é suficiente para que haja uma intensificação ou decaimento de um determinado sistema precipitante, localizado dentro da área de cobertura. Para evitar que esse tipo de problema introduzisse grandes incertezas nas comparações entre os dois radares, estabeleceu-se a diferença máxima de dez minutos entre o horário de aquisição do PR e do GR. O horário de aquisição dos dados dos dois tipos de radares está indicado na Figura 5.6, logo abaixo de cada CAPPI, porém cabe ressaltar que o procedimento de aquisição dos dados volumétricos dentro da área de cobertura de cada radar difere do PR para o GR. Para o PR, a aquisição de dados ocorre de forma quase instantânea, uma vez que a varredura de amostragem da atmosfera é feita ao longo da linha de vôo do satélite a uma velocidade de solo superior a 24.000 km/h. Para o GR, a varredura de aquisição de dados dura cerca de 7,5 minutos, e é feita através dos movimentos de azimute e elevação da antena. O horário da imagem GR é dado, portanto, no início de cada varredura. Desta forma, mesmo que se houvesse coincidência na hora da observação dos dois radares (como o caso da Figura 5.6, item a) haveria sempre uma diferença no tempo de obtenção dos dados.

A comparação das secções transversais mostra que para alguns casos, como por exemplo, o ilustrado na Figura 5.6c, a banda brilhante do sistema estratiforme é mais bem definida quando observada pelo radar PR. Isso ocorre pelo fato do PR apresentar uma melhor resolução vertical quando comparada com o GR, mesmo levando em consideração o fato da metodologia adotada nessa pesquisa degradar a resolução vertical original de 250 metros para 1 km, e, assim, obter um valor médio de 1 km de altura associado a cada CAPPI. Por outro lado, esse mesmo exemplo mostra a superioridade do radar GR em melhor definir horizontalmente um dado sistema. Percebe-se que os dois centros de máxima refletividade mostrados em ambas as secções transversais são melhores discriminados no perfil do GR, mesmo levando em consideração o fato da metodologia adotada nessa pesquisa degradar a resolução

horizontal original de 750 metros para 5 km e assim, obter um valor médio de 5 km de distância associado a cada CAPPI.

Os gráficos de dispersão foram elaborados para verificar a relação existente entre os dados obtidos pelos dois radares, considerando o intervalo entre os níveis de 3 a 9 km de altura mostrados nas seções transversais. Observou-se que há uma significativa correlação positiva ao nível de 5% entre os dados de todos os casos. Isso mostra a compatibilidade dos dois radares em reproduzir a estrutura vertical dos sistemas monitorados. Comparando somente a alta correlação obtida em cada gráfico, corre-se o risco de ignorar uma grande fonte de diferenças entre os valores obtidos por cada radar, que é a dependência da refletividade de cada sensor, em função do espectro de gotas de cada sistema monitorado. Assim, é esperado que, para sistemas com uma grande concentração de gotas de diâmetros elevados, como no caso dos sistemas convectivos, o erro associado ao radar PR seja mais evidente. Utilizando somente os gráficos de dispersão não é possível quantificar esse erro, porém, é possível obter um sinal dessas características avaliando a variância das dispersões. Pode-se perceber que para sistemas de dominância estratiforme, ou aqueles cuja altura não atinja altos níveis como os casos das Figuras 5.6c, 5.6g e a parte estratiforme de 5.6h, a variância das dispersões é menor quando comparada com as demais. A maior variância observada nos casos dominados por sistemas convectivos ocorre devido a grande diferença dos valores de refletividade monitorados pelo PR, em relação aos seus pares monitorados pelo GR. A principal causa dessa diferença pode ser atribuída ao efeito do espalhamento Mie nos dados do radar PR. Esse tipo de espalhamento produz uma refletividade que varia em função da interação do feixe de microondas, cujo comprimento de onda é aproximadamente 2,17 cm, com um espectro de gotas cujos diâmetros são maiores que aqueles observados em sistemas estratiformes.

Como visto na Figura 5.6, a degradação da resolução vertical do radar GR é uma consequência inevitável que ocorre devido a abertura do feixe de microondas durante sua propagação no espaço. Somente a título de ilustração, a Figura 5.7 mostra o impacto do efeito que a abertura do feixe causa na localização e visualização de sistemas que se encontram afastados do centro do radar. Pode-se perceber pela seção transversal que o

radar GR reproduz bem a estrutura horizontal do sistema monitorado, porém, o mesmo não acontece para a estrutura vertical, na qual a altura mostrada no GR chega a ser duas vezes superior àquela mostrada no PR. Esse exemplo justifica o porquê dessa pesquisa estabelecer um limite de 100 km de raio para a coleta dos dados do GR a serem comparados com o PR nos histogramas de frequência.

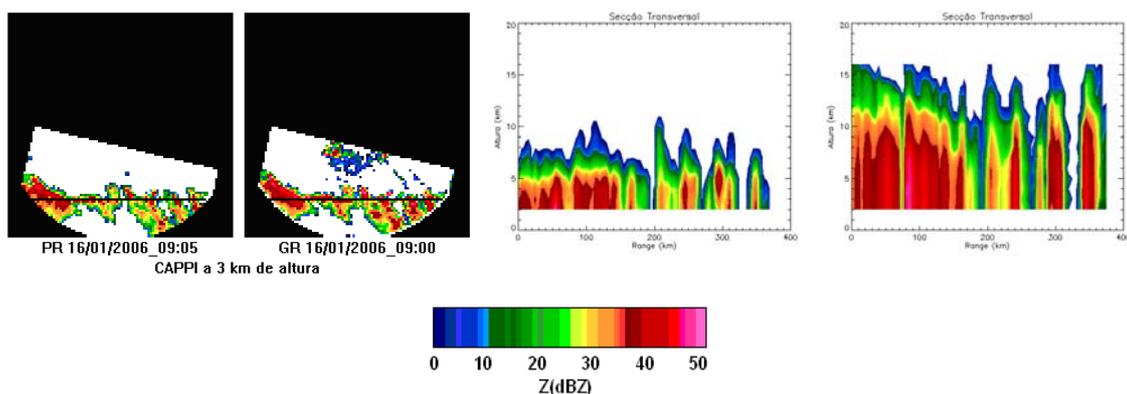


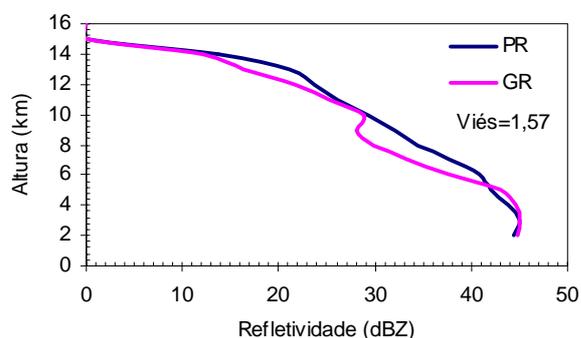
Figura 5.7 – Efeito da distância na reprodução do perfil vertical de refletividade obtido pelo radar GR para o dia 16 de janeiro de 2006.

5.3.1.2 Perfis Verticais

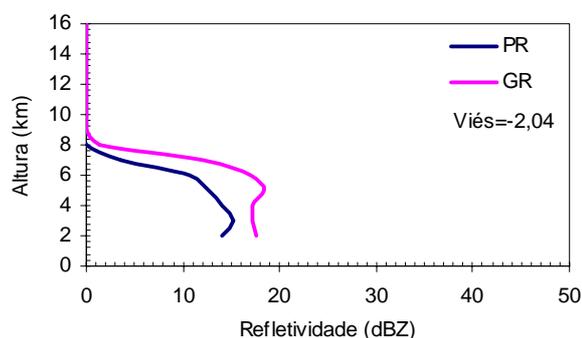
Perfis verticais de refletividade foram extraídos a partir dos quinze níveis de altura indicados pelos CAPPI's de cada radar. Dos nove casos selecionados anteriormente, foram utilizados apenas oito para a elaboração dos perfis verticais. Para cada um dos oito casos foi selecionado um ponto aleatório dentro da reta obtida para a seção transversal. Neste local, coletou-se os valores de refletividade em cada CAPPI e então levantou-se o perfil através do valor médio de nove pixels que circundam o ponto escolhido. A diferença média (viés) entre os valores observados pelo PR e os valores observados pelo GR ($PR - GR$) foi também calculada com a finalidade de se quantificar as diferenças observadas. Verificou-se que, na maioria dos casos, o GR tende a superestimar os valores de refletividade em valores da ordem de 2 dBZ. A grande diferença observada para o caso da Figura 5.8e foi atribuída ao fato do ponto amostrado estar localizado a uma distância superior a 100 km do centro do radar GR, o que sofre a influência da abertura do feixe e inviabiliza qualquer tentativa de comparação entre os dois radares. O caso da Figura 5.8a mostra que o PR apresentou uma ligeira diferença

positiva em relação ao GR e isso pode estar associado ao fato de que, para sistemas precipitantes de características convectivas, o PR tende a superestimar os valores de refletividade em decorrência dos efeitos do espalhamento Mie, causados pela distribuição das gotas desses sistemas e discutidos no item anterior. O caso da Figura 5.8h revela também, uma diferença positiva do PR em relação ao GR, porém para essa data não se evidencia efeitos de espalhamento Mie que possam ser associados às diferenças. De acordo com a Figura 5.6i, toda a área amostrada pelo PR apresenta valores de refletividade superiores aos mesmos do radar GR. Possíveis causas para isso podem estar associadas a uma inadequada calibração do radar GR, decorrente de fatores como, alterações na potência do sinal emitido pelo radar ou variações no ganho do receptor causadas por instabilidade de componentes dos circuitos eletrônicos do receptor. Outras causas que afetam a calibração dos radares serão discutidas posteriormente.

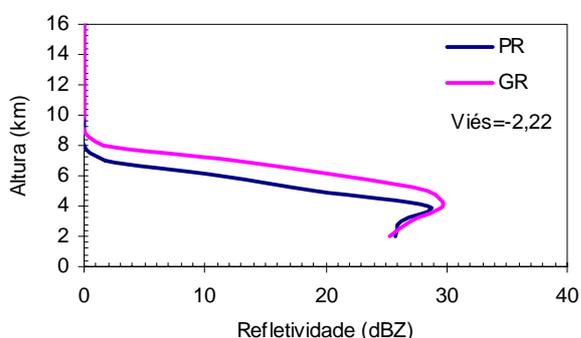
a) Data: 08/01/2006_16:30



b) Data: 16/01/2006_12:15



c) Data: 17/01/2006_08:00



d) Data: 19/01/2006_11:15

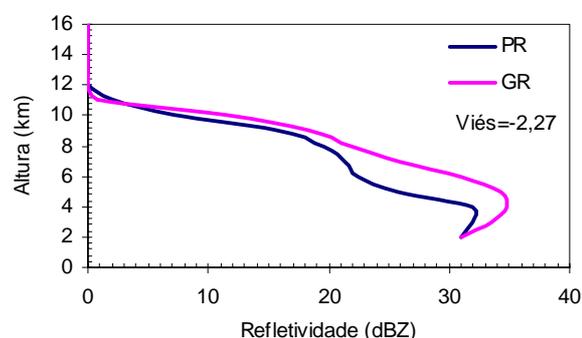
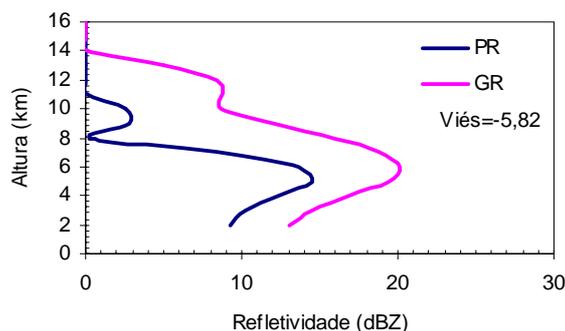
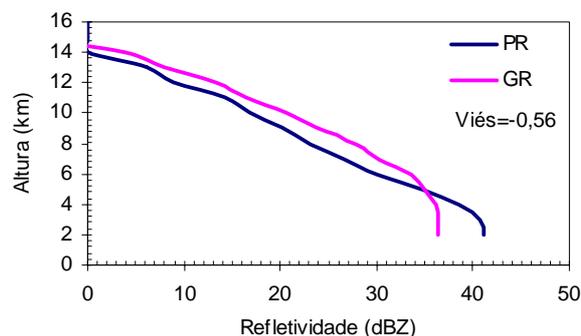


Figura 5.8 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados. (continua)

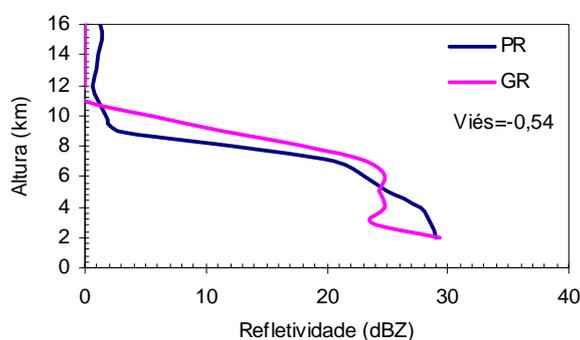
e) Data: 21/01/2006_06:00



f) Data: 21/01/2006_09:15



g) Data: 14/04/2006_16:00



h) Data: 21/06/2006_05:30

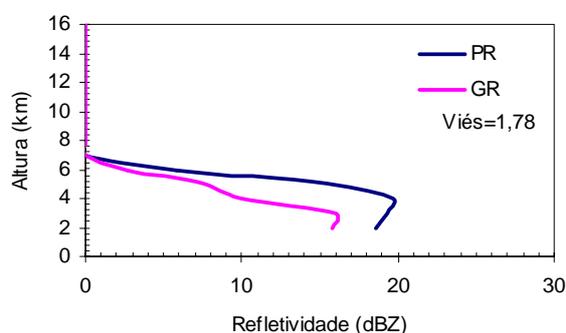


Figura 5.8 – Conclusão.

5.3.1.3 Histogramas de Frequência

Diferentemente das etapas anteriores nas quais buscou-se fazer uma comparação da estrutura vertical dos sistemas precipitantes, detectados por cada tipo de radar, a etapa descrita nessa seção, buscou comparar os valores obtidos por cada radar de uma forma que fosse considerado todo o volume tridimensional de dados. A partir dos valores de reflectividade verificados em cada tipo de radar, foram elaborados histogramas de frequência para avaliar o comportamento das distribuições do PR e do GR. Para a obtenção dos histogramas, foram considerados apenas os valores dentro de um raio de 100 km do radar GR para pontos em que foram identificados dados de ambos os radares. Foram selecionados 44 casos para os quais o radar PR concordou com o radar de Canguçu. Somente foram escolhidos os valores classificados como chuva estratiforme, através dos critérios descritos no capítulo da metodologia. Essas comparações foram feitas utilizando os valores de reflectividade obtidos entre os níveis de 5 e 9 km de altura.

A distribuição dos valores de refletividade do radar que atenderam aos critérios exigidos foi plotada na forma de histogramas mostrados na Figura 5.9.

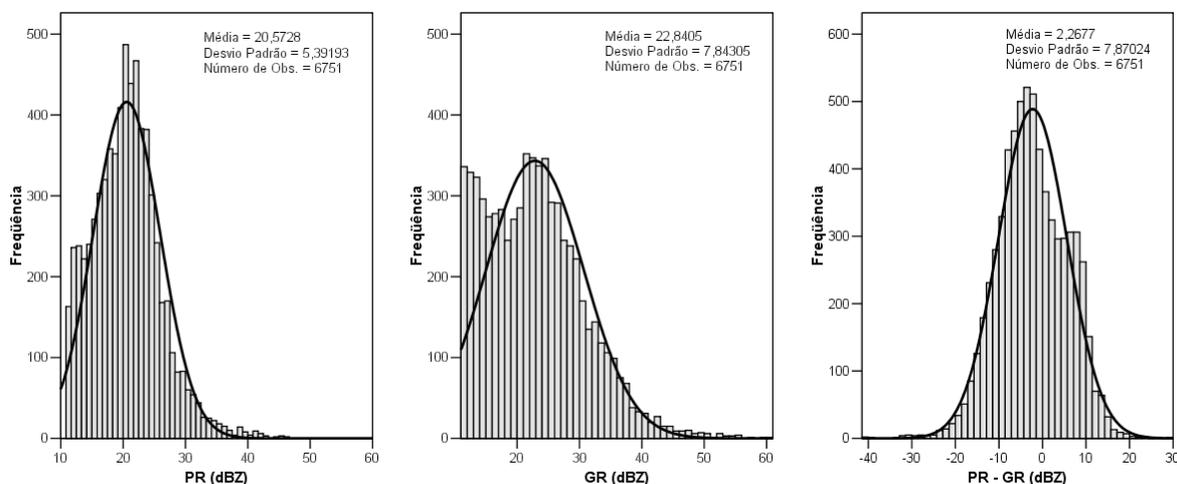


Figura 5.9 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR.

Na Figura 5.9, as barras verticais mostram a distribuição de frequência dos valores de refletividade encontrados nos casos analisados. Essa mesma figura mostra também, a curva gaussiana esperada (linha preta contínua), para os valores de média e desvio padrão obtidos a partir dos valores de refletividade de cada radar. Como esperado, as distribuições observadas são muito semelhantes a uma distribuição normal, porém, devido a um maior número de classes, percebe-se que a amplitude da curva gerada pelo radar GR tende a ser menor do que a mesma observada no radar PR. O pico máximo encontrado para os radares PR e GR foram, respectivamente, 21 e 24 dBZ. A quantidade de ocorrência desses valores corresponde a aproximadamente 7,5% e 5% da amostra total.

A média da diferença entre os valores de refletividade para os níveis de 5 a 9 km de altura de cada radar foi chamada nessa pesquisa de *offset*. Esse valor foi encontrado a partir da seguinte expressão:

$$offset = \frac{1}{n} \left(\sum Z_{PR} - Z_{GR} \right) \quad (5.2)$$

em que, n é o número de observações (6751 para o caso de Canguçu), Z_{GR} e Z_{PR} a refletividade medida pelos radares GR e PR, respectivamente.

Com o objetivo de verificar se o *offset* é estatisticamente significativo ao nível de 5%, o que significa que os valores médios de cada distribuição são diferentes, aplicou-se um teste estatístico de Amostras Pareadas. Esse teste compara os valores médios de duas variáveis e calcula se a diferença entre ambas difere de zero. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de Canguçu e do PR.

| | Média | Desvio Padrão | t | Graus de Liberdade |
|----------------|--------------|----------------------|----------|---------------------------|
| PR - GR | -2,26773 | 7,87024 | -23,675 | 6750 |

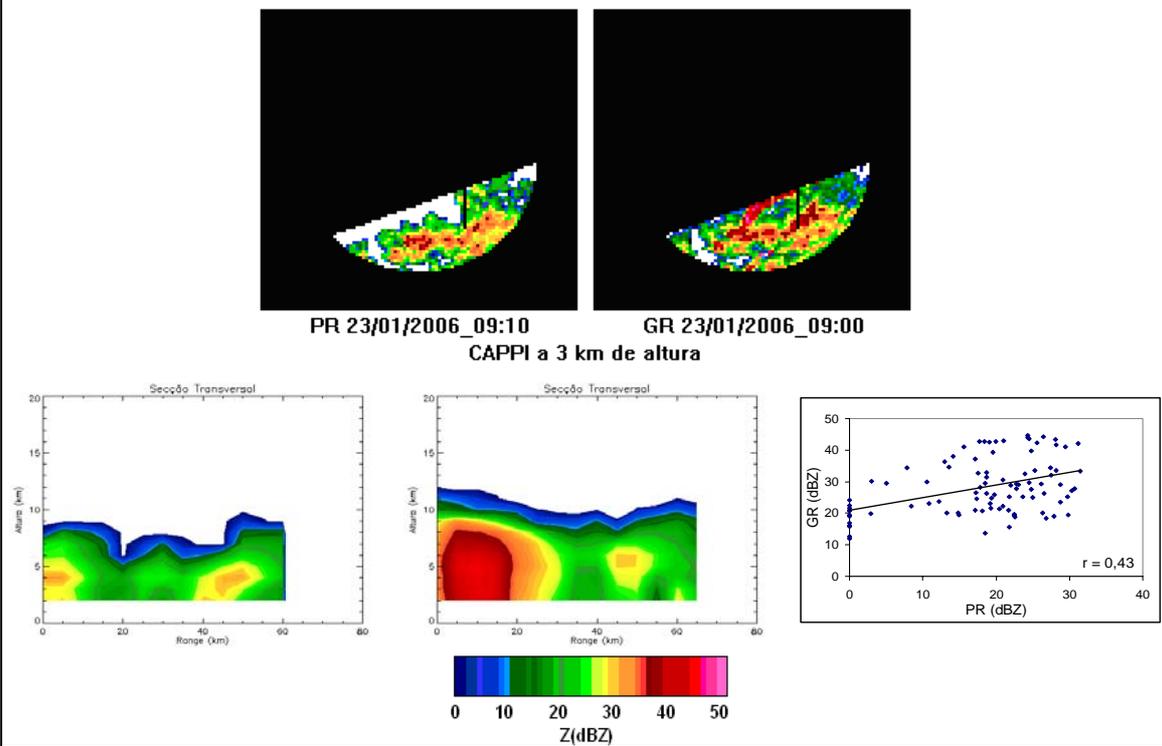
A Tabela 5.1 revela que para o caso do radar de Canguçu há uma tendência deste em superestimar os valores médio da refletividade em 2,27 dBZ quando comparada com a refletividade média do radar PR. O teste de amostra pareada mostra que, estatisticamente, (através do valor $t = -23,675$) a refletividade média do radar GR é superior a do radar PR.

5.3.2 Radar de Morro da Igreja

5.3.2.1 CAPPI e Secções Transversais

De acordo com a metodologia aplicada nesta pesquisa, foram selecionados cinco casos para o radar de Morro da Igreja. A Figura 5.10 mostra a distribuição horizontal da refletividade (CAPPI para o nível de 3km), as secções transversais do PR e do GR e o gráfico de dispersão entre os valores obtidos pelos dois radares para os casos selecionados. Os resultados são mostrados em forma de gráficos exibidos na figura abaixo.

a) Data: 23/01/2006



b) Data: 01/03/2006

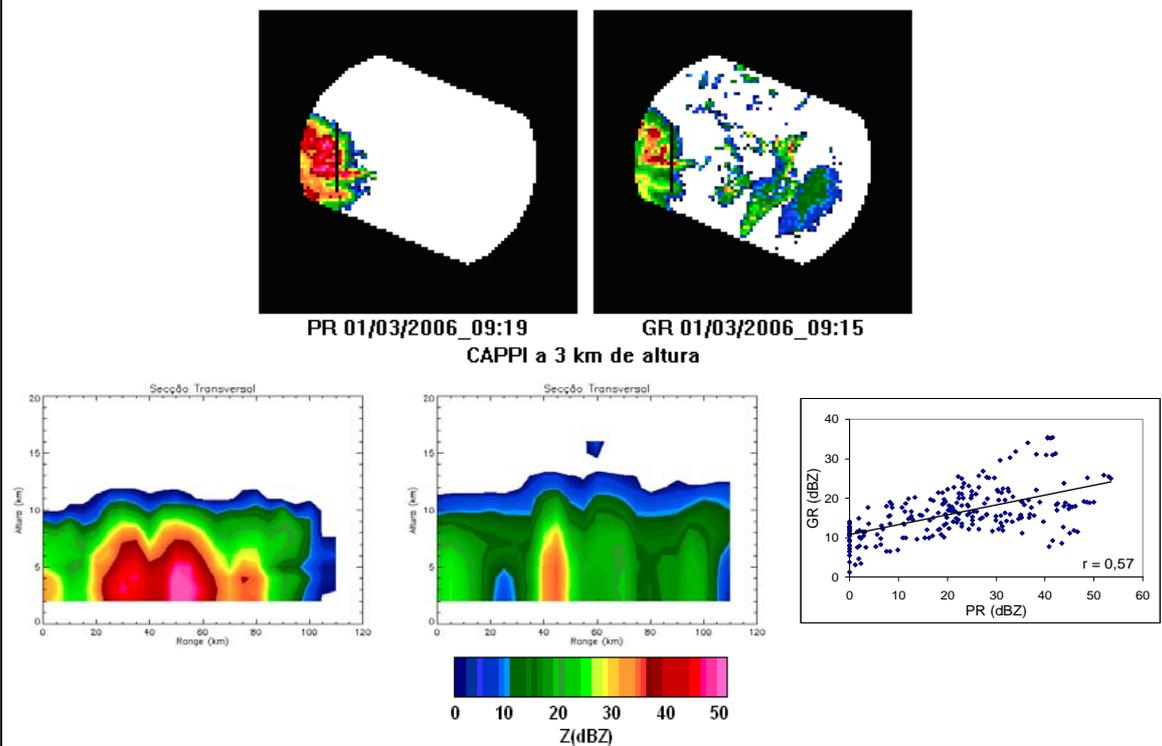
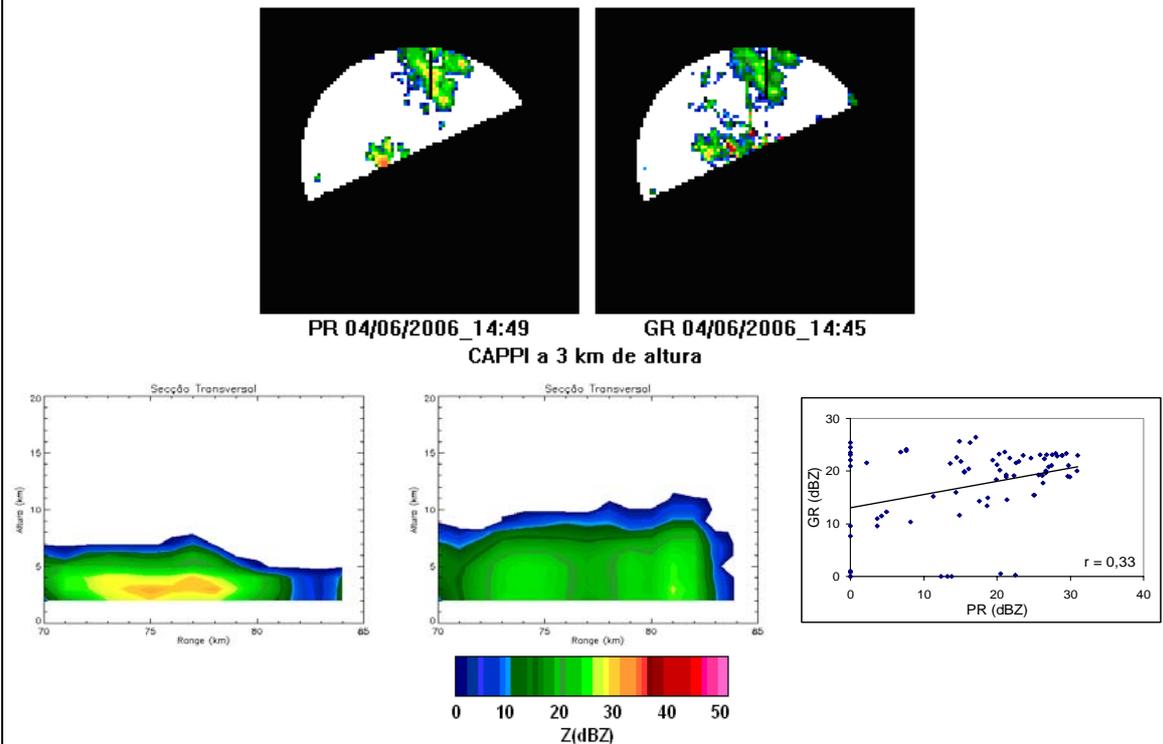


Figura 5.10 – Distribuição horizontal, secções transversais (esquerda PR e direita GR) e gráficos de dispersão para o PR e o GR. (continua)

c) Data: 04/06/2006



d) Data: 16/06/2006

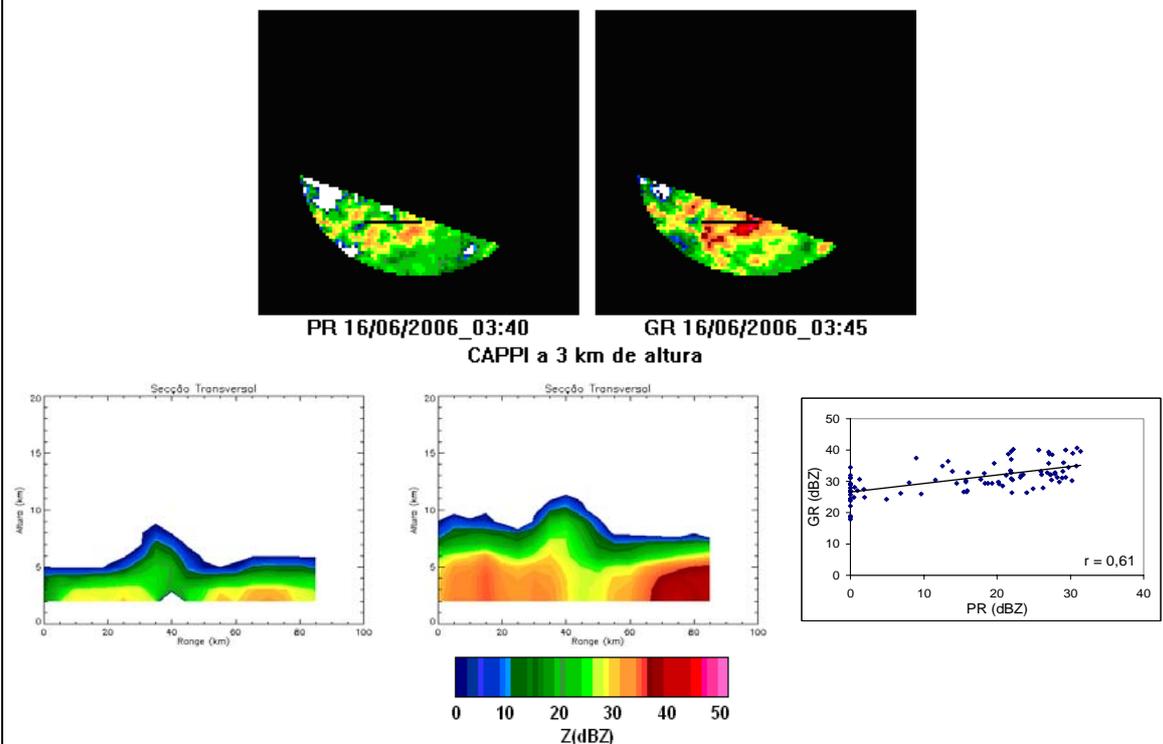


Figura 5.10 – Continuação.
(continua)

e) Data: 16/06/2006

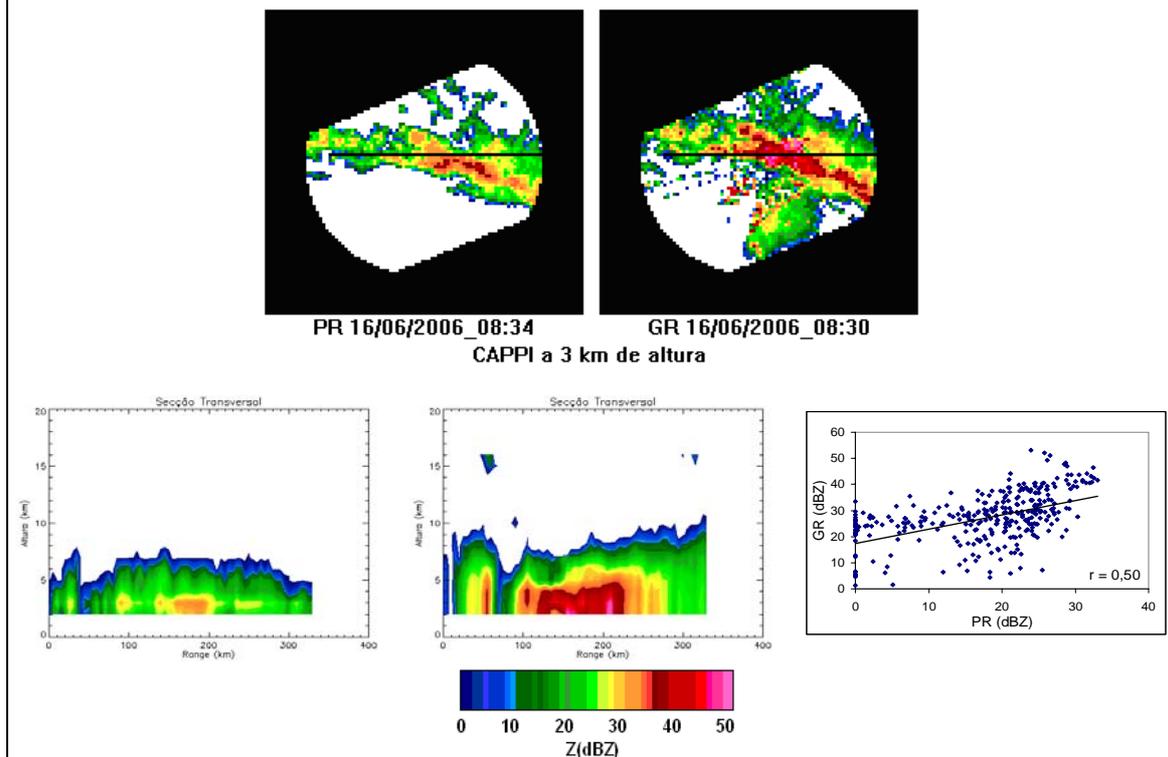


Figura 5.10 – Conclusão.

Na Figura 5.10 nota-se que há uma concordância no padrão e posicionamento dos sistemas precipitantes atuantes em todos os casos obtidos pelos radares PR e GR. Entretanto, percebe-se que o GR tende a superestimar a área dos campos de refletividade em quase todos os casos. Uma das possíveis causas pode ser atribuída à intensificação e/ou ao decaimento dos sistemas precipitantes decorridos em função do tempo. Na Figura 5.10b a grande área em tons de azul, cujos valores de refletividade oscilam em torno de 10 dBZ, localizada na região leste do CAPPI do radar GR, se refere, possivelmente, ao eco produzido pelas ondas do mar. Devido ao efeito Doppler esses ecos não podem ser filtrados pelo radar que os considera alvos meteorológicos. Na Figura 5.10e uma intensa área de alta refletividade é percebida ao sul do CAPPI do radar GR e não se apresenta no radar PR. Uma possível causa para esse efeito pode ser atribuída a alta atenuação do sinal do radar PR quando atravessa um denso sistema convectivo. O mesmo acontece para o caso da Figura 5.10b, na região imediatamente a oeste do local sob o efeito Doppler descrito anteriormente. Nestes locais, o sistema de

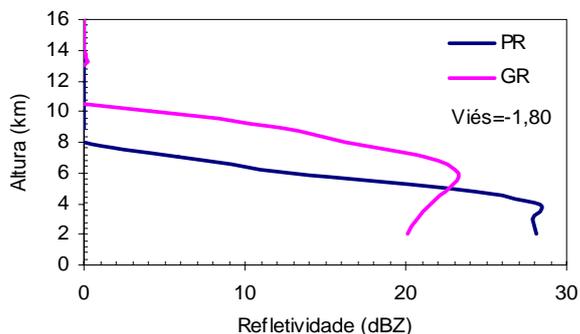
correção da atenuação do eco recebido pelo radar PR parece não detectar os sinais provenientes dos sistemas precipitantes localizados em baixas altitudes.

Comparando as secções transversais dos dois radares (Figura 5.10), observa-se que, em alguns casos, as secções transversais do GR apresentam diferenças na altura e intensidade da refletividade em relação as do radar PR. Aqui também, estas diferenças possivelmente estão relacionadas a não coincidência da hora de aquisição dos dados de cada radar, uma vez que alguns minutos na diferença do tempo de observação dos dois radares são suficientes para que haja uma mudança na estrutura vertical do sistema monitorado.

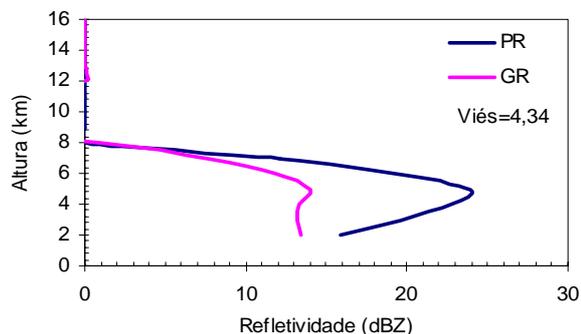
5.3.2.2 Perfis Verticais

Os perfis verticais de refletividades obtidos para alguns pontos escolhidos aleatoriamente estão mostrados na Figura 5.11. O caso da Figura 5.11c mostra que o PR apresentou uma diferença positiva em relação ao GR em todos os níveis de altura. Os casos das Figuras 5.11a, 5.11c e 5.11d mostram que, para baixos níveis, o radar PR apresenta valores maiores do que aqueles percebidos no radar GR. Entre 4 e 5 km de altura esse comportamento se inverte. Os perfis mostrados nesta secção são característicos de sistemas estratiformes, e, para o caso de Morro da Igreja, a diferença entre eles oscilou em torno de ± 2 dBZ. Acima do ponto de inversão, o que parece ocorrer acima da banda brilhante, a diferença entre os dois radares tende a se manter constante, o que não ocorre para altitudes abaixo da banda brilhante.

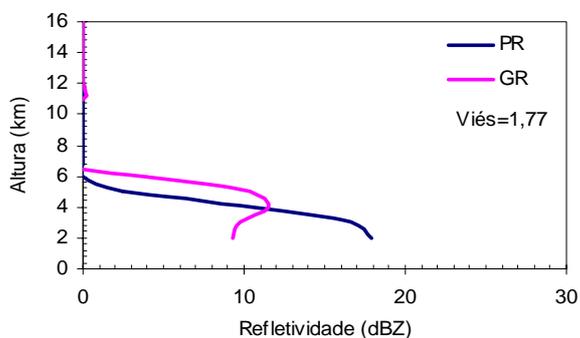
a) Data: 23/01/2006_09:00



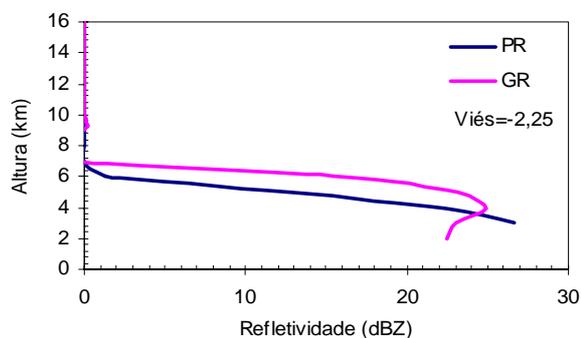
b) Data: 23/03/2006_21:50



c) Data: 06/04/2006_20:17



d) Data: 04/06/2006_14:49



e) Data: 16/06/2006_08:34

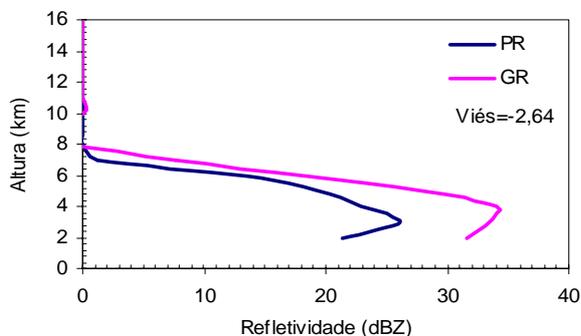


Figura 5.11 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados.

5.3.2.3 Histogramas de Frequência

Como descrito na metodologia, foram selecionados 25 casos para os quais o radar PR concordou com o radar de Morro da Igreja. Somente foram escolhidos os valores classificados como chuva estratiforme e que se encontravam dentro de um raio de 100 km de distância do radar, para a elaboração dos histogramas de frequência. Essas

comparações foram feitas utilizando os valores de refletividade obtidos entre os níveis de 5 e 9 km de altura.

A distribuição dos valores encontrados foi plotada na forma de histogramas mostrados na Figura 5.12.

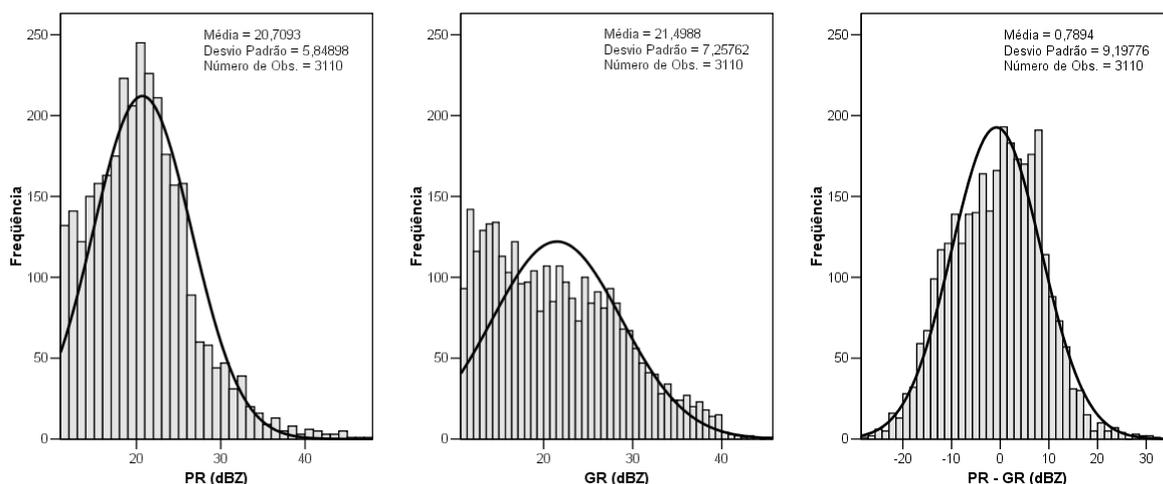


Figura 5.12 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR.

O pico máximo encontrado para os radares PR e GR foram, respectivamente, 21 e 23 dBZ, o que corresponde a aproximadamente 8% e 5% da amostra total.

O valor do *offset* foi calculado a partir do Teste de Amostras Pareadas (Tabela 5.2), e se mostrou bem próximo a zero, apesar de ser significativo ao nível de 5%.

Com o objetivo de verificar se o *offset* é estatisticamente significativo ao nível de 5%, o que significa que os valores médios de cada distribuição são diferentes, aplicou-se um teste de Amostra Pareada. Esse teste compara os valores médios de duas variáveis e calcula se a diferença entre ambas difere de zero. Os resultados estão mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de Morro da Igreja e do PR.

| | Média | Desvio Padrão | t | Graus de Liberdade |
|----------------|--------------|----------------------|----------|---------------------------|
| PR - GR | -0,78941 | 9,19776 | -4,786 | 3109 |

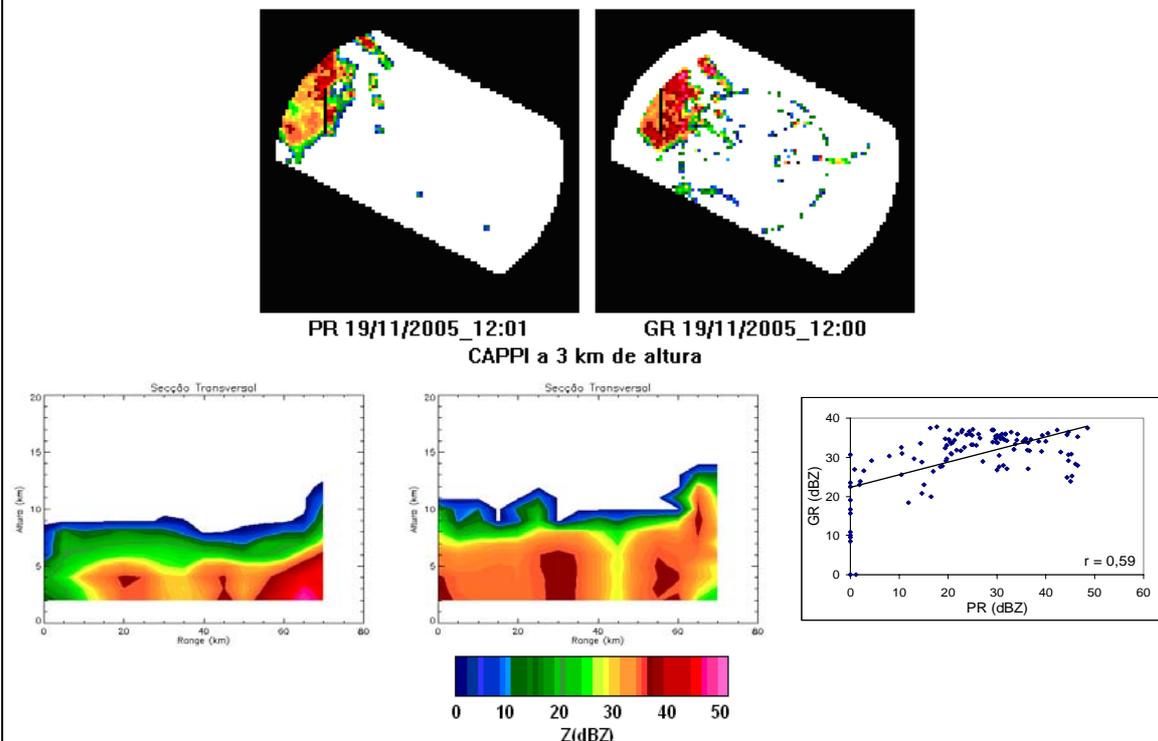
O baixo valor da diferença entre os dois radares mostra que, para os casos estudados, o radar de Morro da Igreja reproduziu bem os mesmos sistemas precipitantes observados pelo radar PR. Isso é um indicativo de que, possivelmente, erros introduzidos por alguns fatores intrínsecos aos radares de superfície, como desgastes de componentes eletrônicos, flutuações na potência do sinal transmitido entre outras, não parecem causar muitos impactos nos dados do radar de Morro da Igreja.

5.3.3 Radar de São Roque

5.3.3.1 CAPPI e Secção Transversal

De acordo com a metodologia proposta, foram selecionados cinco casos para o radar de São Roque. A Figura 5.13 mostra a distribuição horizontal da refletividade (CAPPI para o nível de 3km), as secções transversais do PR e do GR e o gráfico de dispersão entre valores obtidos pelos dois radares para os casos selecionados. Os resultados são mostrados em forma de gráficos exibidos na figura abaixo.

a) Data: 19/11/2005



b) Data: 30/11/2005

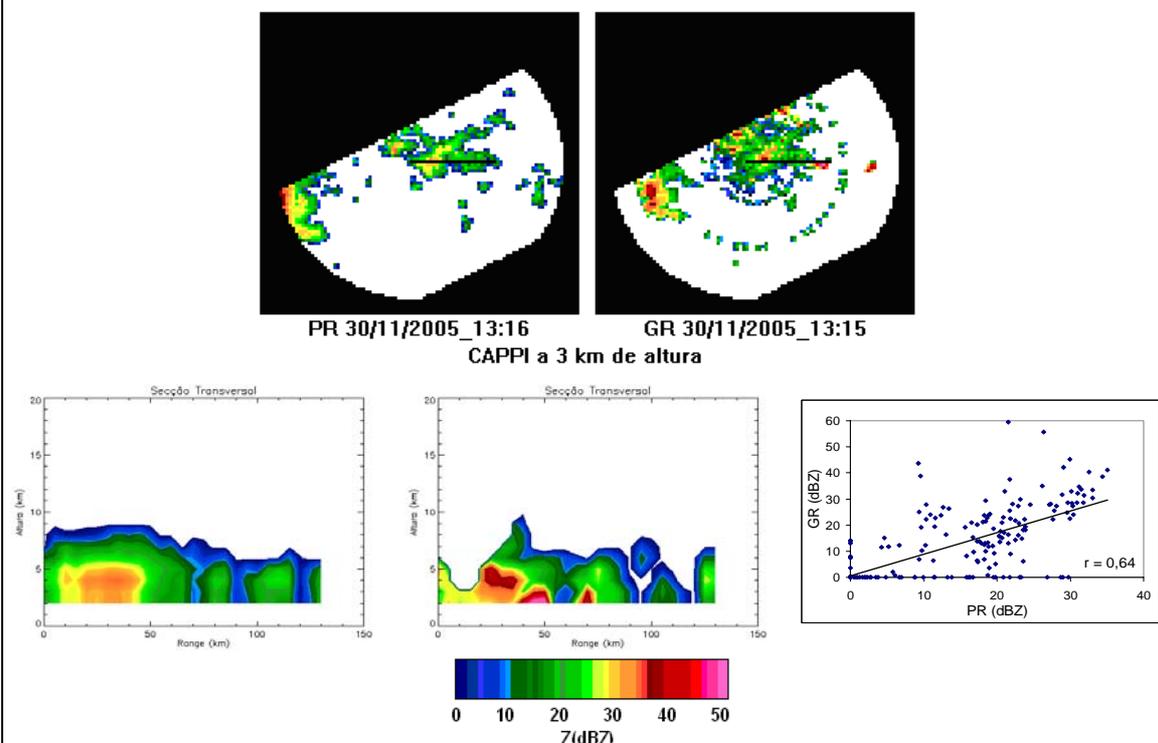
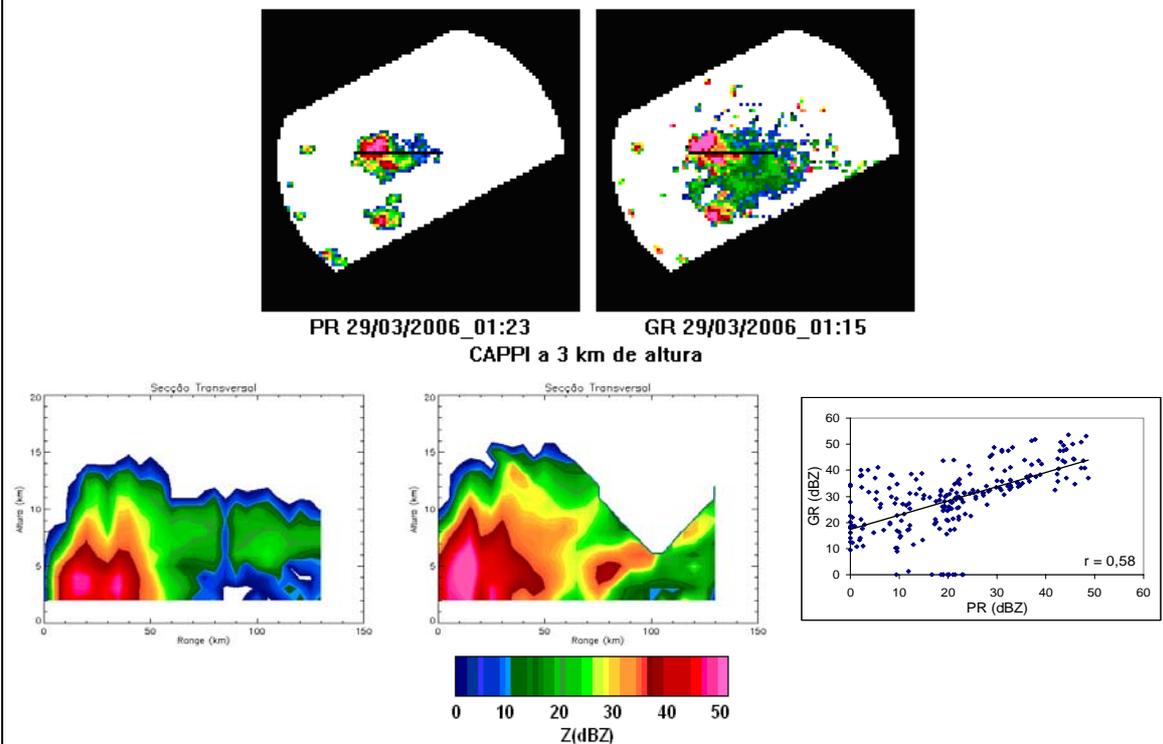


Figura 5.13 – Distribuições espaciais, secções transversais (esquerda PR e direita GR) e gráficos de dispersão para o PR e o GR. (continua)

c) Data: 29/03/2006



d) Data: 16/04/2006

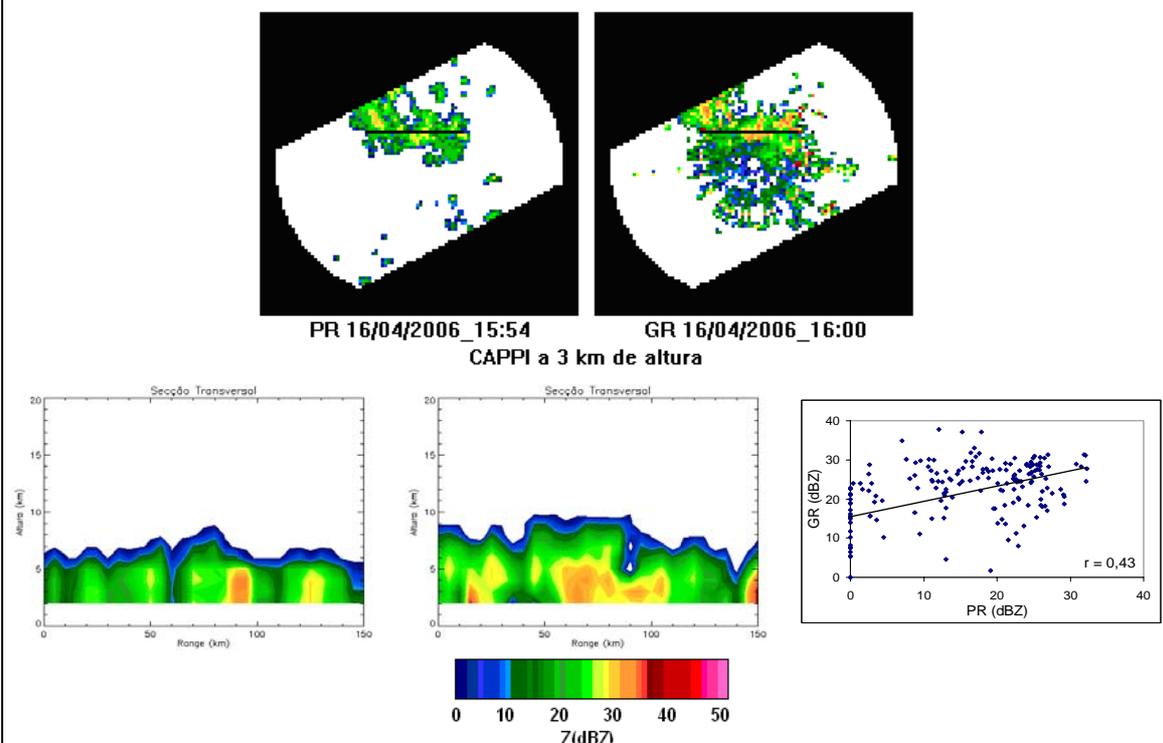


Figura 5.13 – Continuação.

(continua)

e) Data: 20/05/2006

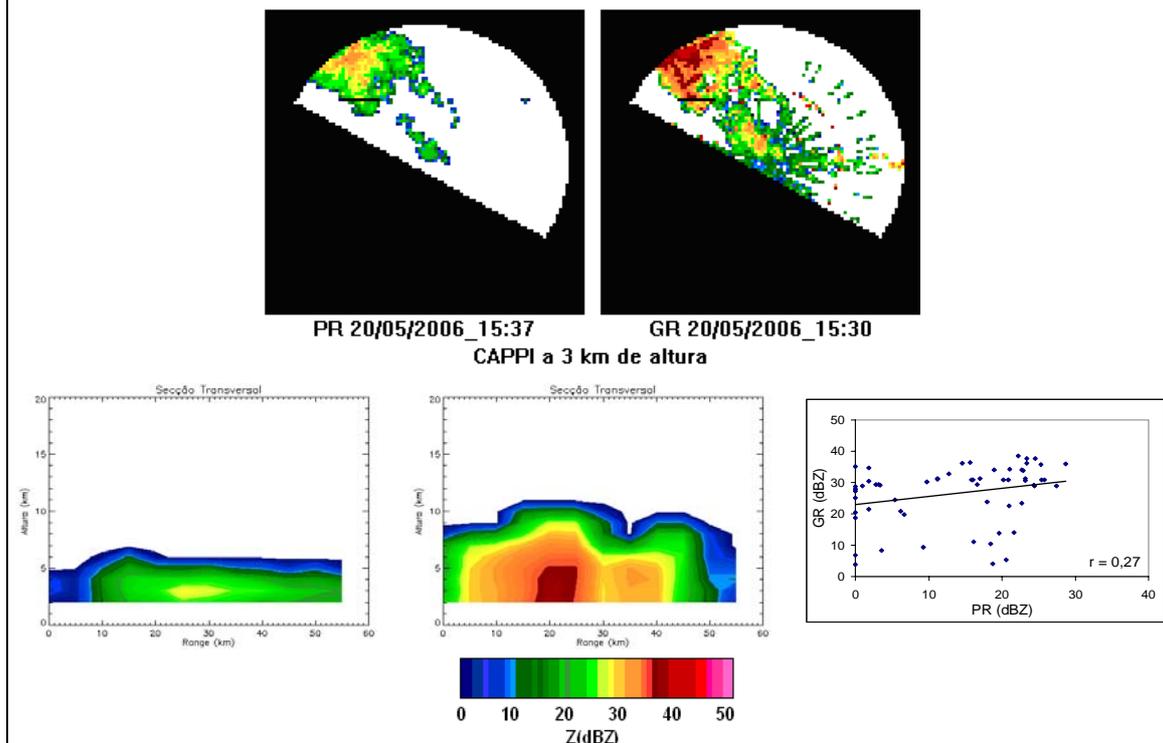


Figura 5.13 – Conclusão.

A distribuição horizontal dos valores de refletividade dos dois radares apresenta boa concordância, porém, é nítida a superestimação dos valores do GR em relação ao PR. Além disso, é visível também que no centro dos CAPPI's do GR existe sempre uma região de refletividade, que, à primeira vista, poderia estar associada a ecos de terreno. Esse efeito só não está presente no caso da Figura 5.13a. O radar de São Roque se encontra em uma área onde a topografia acidentada oferece muitos obstáculos ao feixe eletrônico. Testes realizados no local mostraram que, somente para elevações superiores a 3° , não ocorre retorno de ecos de terreno para o radar. Apesar dessas limitações, os filtros selecionados para eliminação de *clutter* durante a aquisição de dados do radar deveriam eliminar os ecos associados à topografia. Os resultados mostram que isso parece não ocorrer adequadamente, portanto, esse fenômeno pode estar associado a outra causa que ainda precisa ser identificada. Além desse problema, nota-se também a presença de ruídos seguindo um padrão circular que aparecem em todos os CAPPI's do GR. Esse é outro problema que precisa ser investigado.

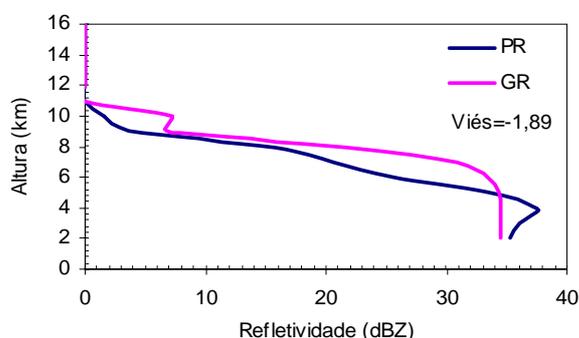
Os problemas citados no parágrafo anterior, apesar da dificuldade de serem explicados e solucionados, podem ser contornados, uma vez que seus efeitos são fáceis de serem identificados. Além disso, os sistemas precipitantes que ocorrem sobre a área de cobertura do radar podem ser detectados e avaliados.

Os gráficos de dispersão só não apresentam correlação significativa para o caso da Figura 5.13e. Isso ocorre porque a amostragem de valores de refletividade foi feita em locais mais distantes que 100 km do radar GR. O resultado é que a abertura do feixe nesses locais faz com que o radar atribua uma altura maior do que àquela em que o alvo realmente está.

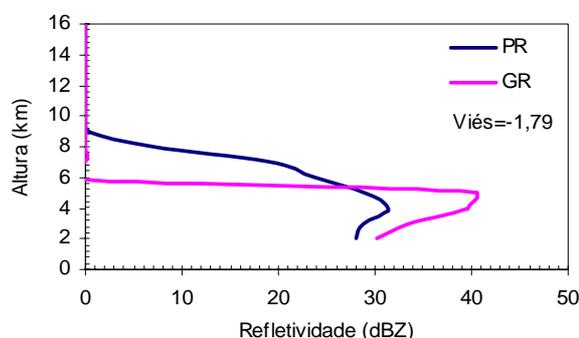
5.3.3.2 Perfis Verticais

Os perfis verticais de refletividade obtidos para pontos aleatórios dentro da reta da secção transversal do radar GR são mostrados na Figura 5.14.

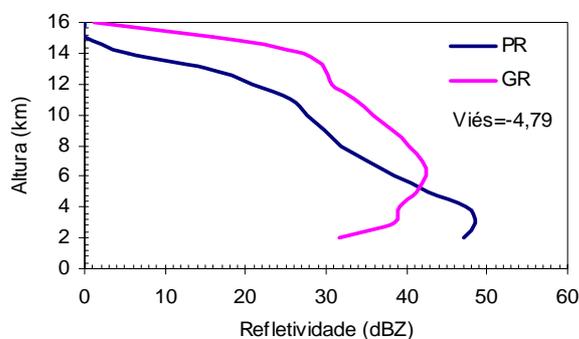
a) Data: 19/11/2005_12:00



b) Data: 30/11/2005_13:15



c) Data: 29/03/2006_01:15



d) Data: 16/04/2006_16:00

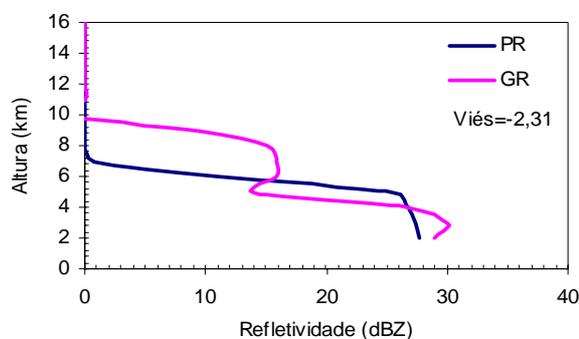


Figura 5.14 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados. (continua)

e) Data: 20/05/2006_15:30

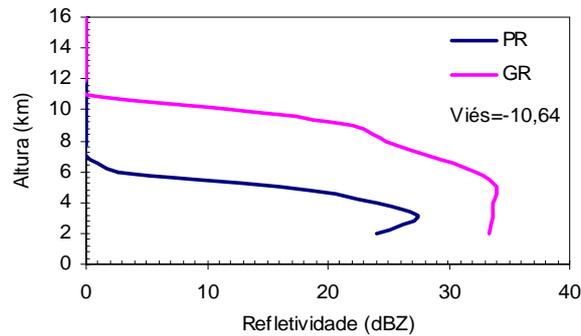


Figura 5.14 – Conclusão.

Ao contrário do que foi percebido em Morro da Igreja, os perfis obtidos para São Roque não apresentaram comportamento típico e cada caso apresentou uma característica distinta. Os casos escolhidos representam perfis tipicamente convectivos, e com o agravante de que podem sofrer influência dos ruídos discutidos na secção anterior. Para os casos das Figuras 5.14a, 5.14b e 5.14d a diferença entre os demais perfis ficou em torno de 2 dBZ. Apesar de aceitável, esse resultado não condiz com as grandes diferenças percebidas na secção anterior. O mesmo não pode ser dito dos casos das Figuras 5.14c e 5.14e que apresentaram diferenças muito grande.

5.3.3.3 Histogramas de Frequência

A distribuição dos valores encontrados foi plotada na forma de histogramas de frequência mostrados na Figura 5.15.

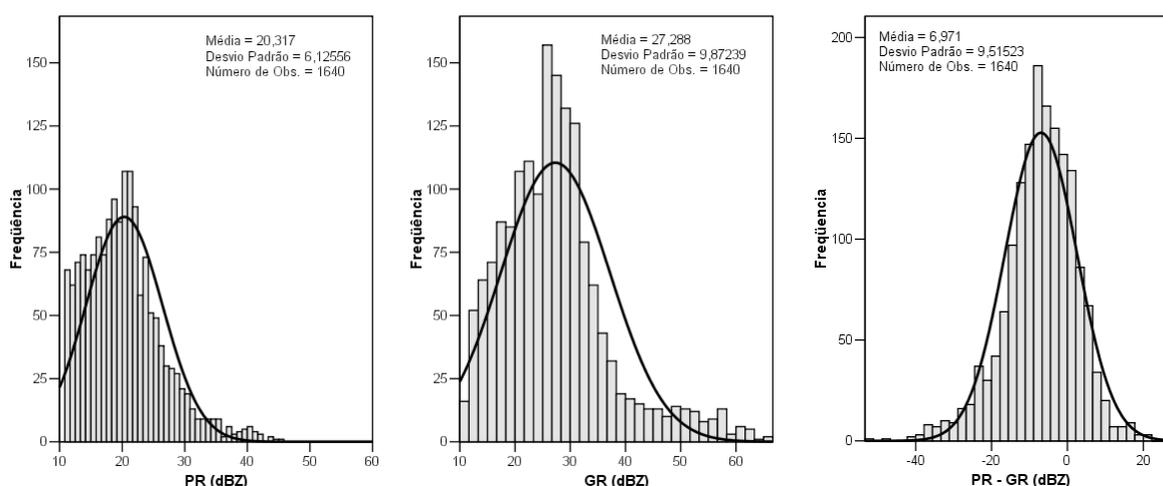


Figura 5.15 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR.

De acordo com a Figura 5.15, o pico máximo encontrado para os radares PR e GR foram, respectivamente, 21 e 26 dBZ, o que corresponde a aproximadamente 7% e 10% da amostra total. Ao contrário do que foi observado nos histogramas de frequência do GR, para os radares de Canguçu e Morro da Igreja, o histograma do radar de São Roque não apresentou uma curva bimodal.

Com o objetivo de verificar se o *offset* é estatisticamente significativo ao nível de 5%, o que significa que os valores médios de cada distribuição são diferentes, aplicou-se um teste de Amostra Pareada (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de São Roque e do PR.

| | Média | Desvio Padrão | t | Graus de Liberdade |
|----------------|--------------|----------------------|----------|---------------------------|
| PR - GR | -6,97099 | 9,51523 | -29,669 | 1639 |

O valor de *offset* encontrado para o radar de São Roque é muito alto e mostra que, dependendo da aplicação, os dados obtidos por esse radar precisam ser cuidadosamente utilizados. As causas para tamanha diferença não são fáceis de serem apontadas. O comportamento atípico dos resultados obtidos pelo radar de São Roque, quando comparados com os demais analisados nessa pesquisa, mostra que é necessário se fazer

um trabalho minucioso de investigação do funcionamento do equipamento. É preciso acompanhar e testar *in situ* equipamentos, componentes e partes mecânicas do radar que podem acarretar os ruídos e discrepâncias identificadas aqui.

5.3.4 Radar de Gama

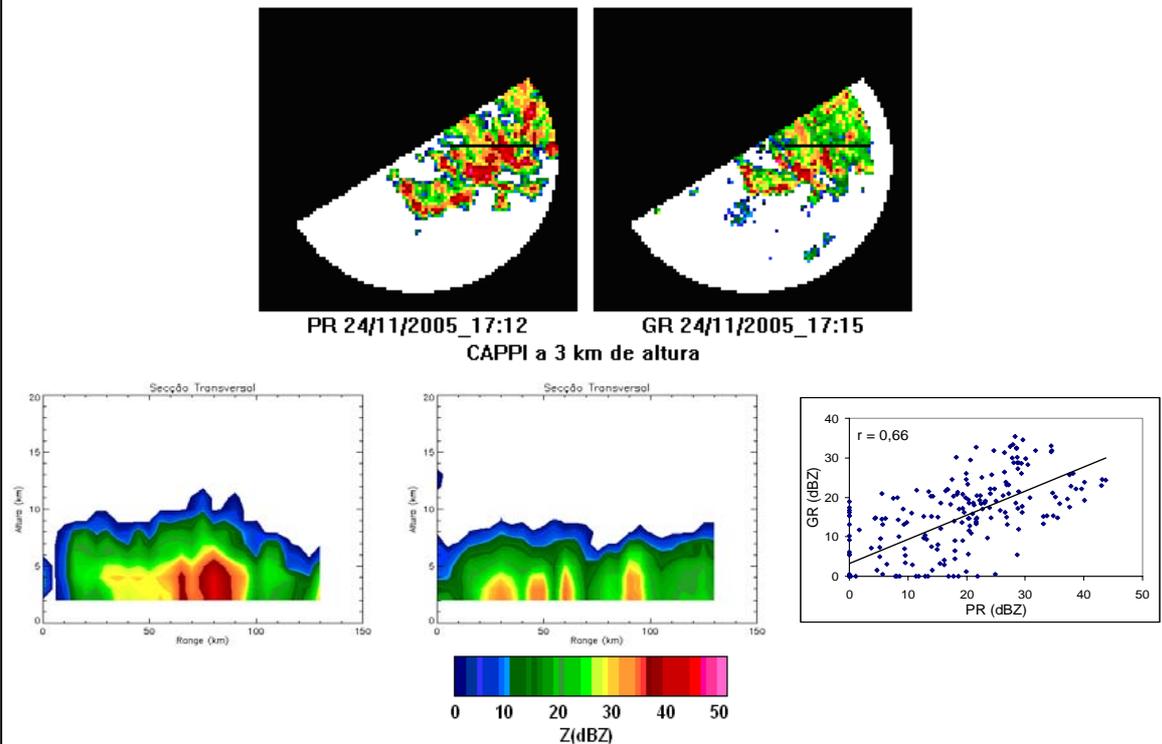
5.3.4.1 CAPPI e Secções Transversais

Para o radar localizado em Gama foram selecionados apenas dois casos, cuja diferença entre as horas de aquisição dos dados feita por cada radar não excedeu dez minutos. A escolha de um número tão pequeno de casos se justifica devido à pouca quantidade de dados disponíveis para esse radar. A Figura 5.16 mostra os campos horizontais de refletividade do radar (CAPPI para o nível de 3km), secções transversais cobrindo a faixa de altura entre 2 e 16 km e o gráfico de dispersão entre os valores obtidos nas secções transversais.

Observa-se que, nos casos mostrados na Figura 5.16, há uma boa concordância entre o PR e GR em relação à distribuição horizontal dos valores de refletividade do radar. Isso se confirma pela correlação obtida no gráfico de dispersão, que, para os dois casos, apresenta valores significativamente altos.

Analisando as secções transversais dos sistemas selecionados para o radar PR e GR, observa-se que há semelhanças entre elas, e que no PR, os sistemas atingem níveis mais altos. Conforme descrito anteriormente, as diferenças observadas na altura e intensidade dos sistemas podem está relacionadas à intensificação, decaimento ou deslocamento horizontal do sistema ao longo do tempo.

a) Data: 24/11/2005



b) Data: 25/11/2005

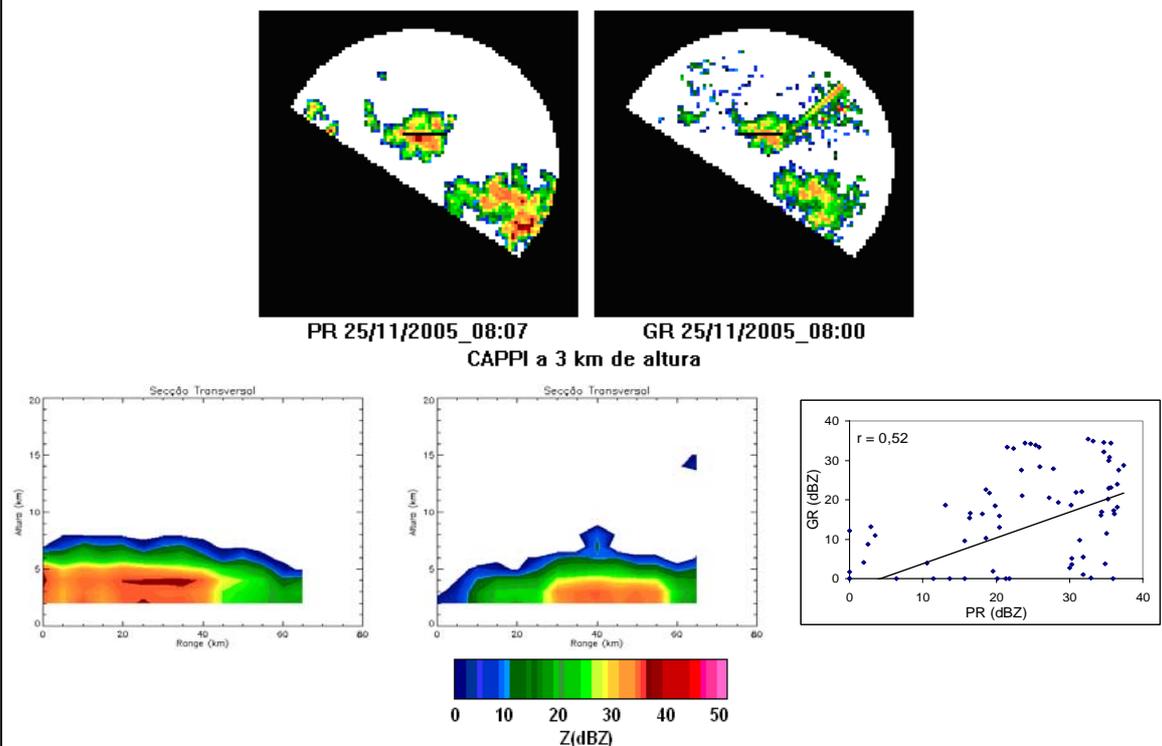


Figura 5.16 – Distribuições espaciais, secções transversais (esquerda PR e direita GR) e gráficos de dispersão para o PR e o GR.

Os gráficos de dispersão mostram que, para o caso da Figura 5.16a, a alta variância encontrada está de acordo com os resultados obtidos nos radares de Canguçu e Morro da Igreja, em que sistemas convectivos eram analisados. Para o caso da Figura 5.16b, esperava-se uma variância menor, uma vez que o sistema associado trata-se nitidamente de um sistema estratiforme, onde percebe-se uma forte banda brilhante na secção transversal do radar PR. Contudo, esta análise em questão está sendo feita com CAPPI's a 3km de altura, e, de acordo com os resultados obtidos nos perfis do radar de Morro da Igreja, percebe-se que, abaixo da banda brilhante, não é possível assegurar uma boa qualidade na comparação entre os dois radares.

5.3.4.2 – Perfis Verticais

Os perfis verticais extraídos dos casos analisados estão mostrados na Figura 5.17.

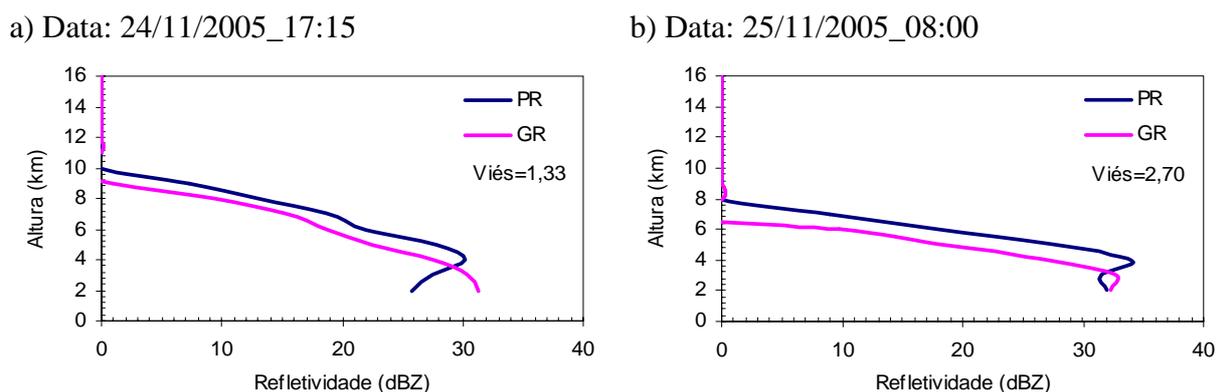


Figura 5.17 – Perfis verticais para os dados obtidos pelo PR e o GR, entre os níveis de 2 a 16 km de altura, dos casos selecionados.

As diferenças obtidas em cada perfil são muito pequenas e sugerem que o radar de Gama parece operar sem problemas como aqueles associados ao radar de São Roque. Todos os resultados obtidos para esse radar até aqui, apontam para uma boa estabilidade do equipamento.

5.3.4.3 Histogramas de Frequência

A partir dos valores de refletividade verificados em cada tipo de radar, foram elaborados histogramas de frequência para avaliar o comportamento das distribuições do PR e do

GR. Como descrito no capítulo da metodologia, foram selecionados 11 casos para os quais o radar PR concordou com o radar de Gama, e, somente foram escolhidos, os valores classificados como chuva estratiforme e dentro de um raio de 100 km do radar.

A distribuição dos valores encontrados foi plotada na forma de histogramas mostrados na Figura 5.18.

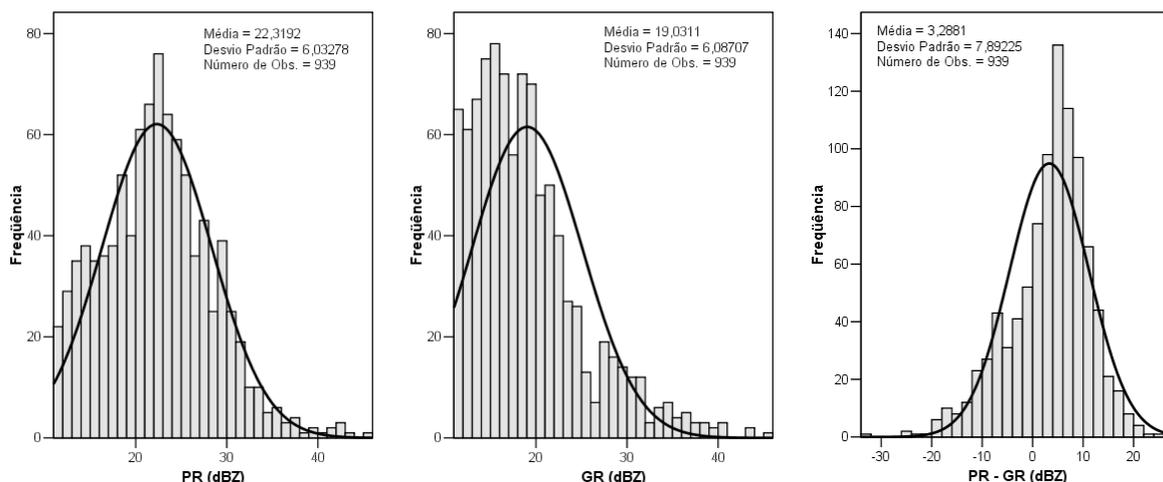


Figura 5.18 – Histograma dos valores de refletividade dos radares PR e GR.

Analisando os histogramas de frequência, do radar de Gama, observou-se que a diferença entre as refletividades obtidas pelo PR e o GR eram maiores que aquelas verificadas na seção anterior. O pico máximo encontrado para os radares PR e GR foram, respectivamente, 23 e 19 dBZ, o que corresponde a aproximadamente 8,5% da amostra total em cada tipo de radar. O histograma de Gama apresenta um grande número de valores de refletividade inferiores a 15 dBZ, e isso, pode estar associado a ecos de terreno que podem ser captados pelo radar, devido a baixa altura da antena em relação ao solo. Este local é o único, dos quatro radares analisado, em que o sensor não está instalado em uma torre com altura superior a 10 metros.

Os resultados do teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade obtidos em Gama estão mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Teste de Amostras Pareadas para os valores de refletividade do radar de Gama e do PR.

| | Média | Desvio Padrão | t | Graus de Liberdade |
|----------------|--------------|----------------------|----------|---------------------------|
| PR - GR | 3,28810 | 7,89225 | 12,767 | 938 |

A Tabela 5.4 revela que, para o caso do radar de Gama, há uma tendência deste em subestimar os valores médio da refletividade em 3,29 dBZ, quando comparado com a refletividade média do radar PR. O teste de amostra pareada mostra que, estatisticamente (através do valor $t = 12,767$), a refletividade média do radar GR é inferior a do radar PR.

6 DISCUSSÕES

A qualidade dos produtos CAPPI's gerados pelo software FROG 2 foi considerada inferior àquela dos CAPPI's gerados pelo Método de Amostragem Tridimensional adotado nessa pesquisa. Porém, isso não significa que o FROG 2 não seja a solução correta para a geração desse produto. Trata-se somente de uma característica do software que precisa gerar tal produto de uma forma mais rápida, para assim atender a todas as demandas de operação do sensor.

O Método de Amostragem Tridimensional foi elaborado exatamente para ser executado em atividades em que os dados possam ser processados em condições que não exijam a aquisição de informações em tempo real, ou seja, para pós-processamento de dados.

Os resultados obtidos nessa pesquisa revelaram que, com exceção de Gama, os demais radares de superfície, pertencentes ao DECEA, apresentam valores de refletividade acima dos valores obtidos pelo radar a bordo do satélite TRMM. De acordo com estudos teóricos (Chandrasekar et al., 2006) uma diferença da ordem de 2 dBZ é aceitável quando se compara um radar de banda S com outro de banda Ku, como foi o caso dessa pesquisa.

Conforme mostrado anteriormente, os radares de Canguçu, Morro da Igreja, São Roque e Gama apresentaram uma diferença média em relação ao radar a bordo do satélite TRMM de 2,27 dBZ, 0,79 dBZ, 6,97 dBZ e -3,29 dBZ, respectivamente. Com isso, percebe-se que os radares de Morro da Igreja e Canguçu apresentam erros que podem ser considerados dentro do esperado. O mesmo não ocorre para Gama e São Roque, sendo que, para esse último, o erro está muito acima do esperado.

Os quatro radares analisados nessa pesquisa, embora pertencentes ao DECEA, são operados pelo Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo CINDACTA I (Gama e São Roque) e CINDACTA II (Morro da Igreja e Canguçu). Cada CINDACTA, por sua vez, é responsável pela manutenção e operação de seus radares. Em visita a cada estação radar, pesquisadores do CPTEC/INPE e USP perceberam que o CINDACTA II executa um procedimento regular de calibração

eletrônica em seus sensores (Dr. Carlos Frederico de Angelis em comunicação pessoal), o que pode explicar a baixa diferença da comparação com o radar PR. A calibração dos sensores do CINDATA I é feita somente de acordo com o programa de manutenção especificado pelo DECEA. Já no CINDACTA II, a calibração é feita com mais frequência, devido a intervenção constante de um oficial especialista em eletrônica e radar.

Outro fator a ser considerado quando se analisa o grande erro percebido nos radares operados pelo CINDACTA I, é o tempo de uso dos sensores. Gama e São Roque foram os primeiros radares a serem instalados pelo DECEA, e portanto, são os mais antigos de toda a rede. É possível que o desgaste natural dos componentes dos radares seja uma das causas da diferença entre os radares GR e PR.

O radar de São Roque é aquele que merece maior atenção devido a grande diferença que apresentou. Além disso, os dados desse sensor apresentam ruídos aleatórios que podem comprometer todo o dado volumétrico obtido a partir de uma determinada varredura. Exemplos desses ruídos foram mostrados no capítulo anterior. É necessário um acompanhamento técnico para identificar a causa de tais ruídos, e, uma possibilidade que não pode ser descartada, é a verificação dos componentes ligados ao acoplamento mecânico rotativo localizado no módulo responsável pelo movimento de rotação da antena (junta rotativa).

A comparação dos resultados obtidos nessa pesquisa com outros trabalhos citados na literatura científica não é uma tarefa fácil de realizar, uma vez que cada localidade apresenta sistemas precipitantes com características distintas, e também, cada operador de radar possui condições de trabalhos diferentes. Além disso, as metodologias adotadas podem interferir nos resultados obtidos e, com isso, aumentar ou diminuir suas incertezas.

Furukawa (1998) comparou os dados obtidos pelo radar PR com dados de radares de superfície, banda C, sobre o Japão. Em sua metodologia foi usado somente CAPPI's obtidos para o nível de 2,5 km de altura. Os valores de refletividade entre PR e GR foram reamostrados para uma resolução de 10 km x 10 km. Similarmente aos resultados

obtidos aqui, Furukawa (1998) encontrou uma boa concordância nos campos de refletividade de ambos os tipos de radares. O maior questionamento sobre o seu trabalho foi relacionado à altura do CAPPI utilizado. Conforme mostrado em vários perfis verticais de refletividade extraídos em todos os radares usados aqui nesta pesquisa, foi percebido que, em diversas situações, ocorreu uma inversão nos valores de refletividade após a altura de 4 km. Nessas situações, os valores do PR eram maiores do que os do GR para alturas abaixo de 4 km, quando então ocorreu a inversão. Uma explicação para isso seria uma ineficiente correção do algoritmo do radar PR, quando este faz a correção da atenuação do sinal recebido.

Para evitar problemas desse tipo na obtenção de valores de *offset* entre PR e GR, encontrados nessa pesquisa, optou-se por usar somente os valores de refletividade localizados acima do nível de 5 km de altura. Isso garante que valores de PR localizados em baixas altitudes, que, eventualmente, possam estar sendo erroneamente recuperados pelo radar PR, não sejam considerados nos cálculos finais.

Schumacher e Houze Jr (2000) fizeram uma comparação empírica utilizando dados do PR e do radar de Kwajalein (KR) de Banda S, para dois períodos diferentes. Em seu trabalho, os autores usaram a razão entre o somatório de todos os valores de refletividade observado por cada tipo de radar para o levantamento do *offset* e observaram que o KR estava subestimando os valores do PR. Em seguida, testaram cinco valores de *offset* que variavam de 0 a 4 dBZ, para o período de agosto de 1998 a maio de 1999, e seis valores de *offset* variando de +4 a +8 dBZ, para o período de junho a agosto de 1999. Foi verificado qual valor de *offset* produzia uma razão entre o PR e o KR próximo a 1. As comparações estatísticas indicaram um *offset* de +2 dBZ para o primeiro período (de agosto de 1998 a maio de 1999), e de +6 dBZ para o segundo período (de junho a agosto de 1999). Durante o primeiro período, o *offset* obtido foi considerado dentro do aceitável, porém, no segundo período, esse valor foi considerado alto. As causas prováveis para o alto valor desse *offset* foram os reparos e atualizações realizadas durante os meses de maio e junho de 1999.

Fazendo comparações entre as refletividades, Schumacher e Houze Jr (2000) observaram, nas secções transversais do KR e do PR, que a banda brilhante é melhor definida no PR por ter uma melhor resolução vertical. Verificaram também que células convectivas intensas requerem mais correções, enquanto que áreas estratiformes necessitam de poucas correções. Similarmente aos resultados obtidos aqui, Schumacher e Houze Jr (2000) constataram que os dados do PR são mais confiáveis entre os níveis de 5 e 7 km de altura. Por haver atenuação do PR abaixo do nível de 0°C, valores de refletividades abaixo do nível de 5 km de altura foram descartados em suas análises. Nos casos estudados por eles, haviam poucos dados com valores maiores que 17 dBZ acima de 7 km, o que fez desse valor, o limite superior para a amostragem de dados.

A metodologia adotada nessa pesquisa foi adaptada de Anagnostou et al. (2001), que propuseram a elaboração de produtos CAPPI's a partir do Método de Amostragem Tridimensional descrito no capítulo da metodologia deste trabalho. Os autores fizeram uma comparação entre os valores de refletividade da rede de radares NEXRAD dos Estados Unidos com os valores correspondentes do radar PR. Foram utilizados 14 radares da rede NEXRAD e três radares experimentais das campanhas do Kwajalein e do LBA (Large Biosphere Atmospheric). Após as comparações entre os radares de superfície e o PR, observou-se uma boa concordância entre o padrão de refletividade e foram encontradas correlações entre 0,8 e 0,95 para níveis acima da banda brilhante. Segundo o Dr. Carlos Augusto Morales (comunicação pessoal), esta metodologia foi adotada como padrão de comparação de todos os radares da rede NEXRAD.

A metodologia adotada neste trabalho difere daquele de Anagnostou et al. (2001) apenas na resolução utilizada que, inicialmente, foi de 1 km³ e, depois, reamostrada para 5 km x 5 km x 1km. No trabalho do Anagnostou et al. (2001) foi utilizada uma resolução de 5 km x 5 km x 2 km.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal dessa pesquisa foi avaliar a qualidade dos dados produzidos pelos radares pertencentes ao DECEA e que estão sendo usados, sistematicamente, por vários usuários pela primeira vez. Os resultados obtidos aqui mostram que a principal fonte de preocupação é o radar de São Roque, devido ao alto valor de *offset* encontrado. Para aumentar essa preocupação, adiciona-se o fato de que esse radar está localizado em uma região densamente populosa, onde se concentram as principais cidades do estado de São Paulo e, também, os principais pólos industriais do país. Além disso, os dados desse radar estão sendo usados para diversas finalidades, e, dependendo da aplicação, precisam ser corrigidos.

Para se chegar aos resultados apresentados e discutidos nos capítulos anteriores, esta pesquisa adotou algumas aproximações que, por possuírem fontes de incertezas e não poderem ser eliminadas, merecem ser mencionadas:

- Para a comparação entre os dados TRMM-PR e radar de superfície seria necessário a posse de dados simultâneos o que, provavelmente, não é possível, uma vez que o horário de passagem do satélite TRMM nem sempre coincide exatamente com o horário da amostragem feita pelos radares de superfície. Logo, foram utilizados aqueles horários mais próximos e que não excederam dez minutos de diferença.
- Ainda que um horário PR coincida exatamente com um horário GR, deve-se lembrar que o PR adquire os dados em uma única amostragem devido à sua geometria de imageamento e velocidade de deslocamento da antena, que é transportada a bordo do satélite. O mesmo não ocorre para o radar GR uma vez que ele leva alguns minutos para completar todas as elevações da varredura. Assim, como no parágrafo anterior, essa diferença de tempo também não foi considerada nesse trabalho.
- A resolução espacial horizontal do GR é melhor que a do PR, enquanto a resolução vertical do PR é melhor que a do GR. Desta forma, foi necessário

reamostrar os dados do GR para que estes pudessem ser colocados sobre os dados do PR. O mesmo ocorreu para os dados verticais do PR para que os mesmos pudessem ser comparados com o GR. Desta forma, a transformação dos dados obtidos por duas diferentes geometrias de aquisição, faz com que ambos os tipos sejam padronizados em um mesmo formato, podendo assim serem comparados de forma mais real.

Os capítulos de resultados e discussões mostram todas as conclusões obtidas nessa pesquisa. Abaixo encontra-se um resumo das principais conclusões:

- 1) Para todos os radares estudados há uma boa concordância na localização entre os sistemas precipitantes identificados pelos dois tipos de sensores, principalmente analisando os gráficos de dispersão, o que indica, aparentemente, um adequado apontamento da antena dos radares GR;
- 2) As altas variâncias encontradas nos gráficos de dispersão entre os dados, obtidos a partir dos CAPPI's do DECEA e os obtidos pelo Método de Amostragem Tridimensional, provavelmente estão relacionadas à forma de elaboração dos produtos, ou seja, do algoritmo usado por cada método;
- 3) As principais diferenças observadas entre o PR e o GR são devidas ao tipo de espalhamento, as diferentes distribuições de gotas e ao tempo na obtenção dos dados de cada tipo de radar;
- 4) Quanto mais próximo do radar estiver o sistema precipitante, melhor será a correlação e menor será a dispersão entre os dados, por não haver grandes distorções na altura do sistema precipitante observado pelo GR;
- 5) Os dados do PR são mais confiáveis acima de 5 km de altura, conforme verificado nos perfis verticais, nos quais observa-se que abaixo desta altura, na maioria dos casos analisados, há uma atenuação no sinal;

- 6) O radar de São Roque apresentou resultados muito discrepantes daqueles esperados. Para esse sensor, é necessário um acompanhamento técnico com a finalidade de se identificar as causas para tamanhas discrepâncias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEN, A. L. Electromagnetic scattering from spheres with sizes comparable to the wavelength. **Journal of Applied Physics**, v.22, p. 601-605, 1951.

ANAGNOSTOU, E.N.; MORALES, C.A.; CALHEIROS, R.V. Calibration of ground weather radar systems from TRMM precipitation radar observations: Application to the S-Band radar in Bauru, Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2000, Rio de Janeiro – RJ. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2000. p. 1893-1898.

ANAGNOSTOU, E. N.; MORALES, C. A.; DINKU, T. The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases, **Journal Atmospheric Oceanic Technology**, v. 18, p. 616-628, 2001.

ANGELIS, C.F. **Rainfall characteristics over tropical and subtropical South America**. Tese de Doutorado – The University of Birmingham, Reino Unido, 2003.

ATLAS, D; LUDLUM, F. Multi-wavelength radar reflectivity of storms. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 87, p. 523-534.

ATLAS, D.; SRIVASTAVA, R.C.; SEKHON, R.S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. **Reviews of Geophysics and Space Physics**. v. 11, p. 1-35. Feb. 1973.

BATTAN, L. J. **Radar observation of the atmosphere**. Chicago: The University of Chicago Press, 1981. p. 324, 1973.

BLANCHARD, D.C. Raindrop size-distribution in hawaiian rains. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 10, n. 6, p. 457-473, 1953.

BOLEN, S.M.; CHANDRASEKAR, V. Quantitative cross validation of space-based and ground-based radar observations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 2071–2079, 2000.

CHANDRASEKAR, V.; LIM, S.; GORGUCCI, E. Simulation of X-Band Rainfall Observations from S-Band Radar Data. **Journal Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, p. 1195-1205, 2006.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). **CAPPI a 3km de altura para o Radar de Canguçu (RS)**. Disponível em: < <http://www.redemet.aer.mil.br/> > Acesso em: 11 jun. 2007.

DOVIAK, R.J.; ZRNIC', D.S. **Doppler radar and weather observations**. 2. ed. Washington: Academic Press, 1993. p. 30-61.

FURUKAWA, K. **Report of the Ishigaki/Miyako Campaign Experiment for TRMM (IMCET)**, 1998. Disponível em: < http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/document/imcet98/index_e.htm >. Acesso em: 11 abr.2006.

HERMAN, B. M.; BATTAN, L. J. Calculations of Mie backscattering from melting ice spheres. **Journal Meteorology**, v.18, p. 468-478, 1961.

IGUCHI, T.; KOZU, T.; MENEGHINI, R.; AWAKA, J.; OKAMOTO, K. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. **Journal of Applied Meteorology**, v.39, p.2038-2052, 2000.

JOSS, J.; WALDVOGEL, A. Ein spektrograph für niederschlagstropfen mit automatischer auswertung. **Pure Applied Geophysics**, v.68, p.240-246, 1967.

JOSS, J.; SCHRAM, K.; THAMS, J.C.; WALDVOGEL, A. **On the quantitative determination of precipitation by radar**. Zurich: Research Dept. of the Federal Commission on the Study of Hail Formation and Hail Suppression, Ticinese Observatory of the Swiss Central Meteorological Institute, Federal Institute of Technology, 1970. 38p (Scientific Communication No. 63).

KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. **Journal Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, p. 809–817, 1998.

LAWRENCE, R.J. **TRMM satellite validation office**, 2006. Disponível em: < http://trmm-fc.gsfc.nasa.gov/trmm_gv/ >. Acesso em: 15 mar. 2006.

MARSHALL, J.S.; PALMER, W. McK. The Distribution of Raindrops with Size. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 5, n. 4, p. 165–166, 1948.

MCFARQUHAR, G. M.; LIST, R. The effect of curve fits for the disdrometer calibration on raindrop spectra, rainfall rate, and radar reflectivity. **Journal of Applied Meteorology**, v. 32, p. 774-782, 1993.

MEISCHNER, P.E. **Weather radar**. Principles and advanced applications. Springer-Berlin, 2003.

MORAES, M. C. S. **Distribuição de gotas de chuva e a relação Z-R para radar na Costa Leste do Nordeste do Brasil**. 112p. Dissertação (Mestrado) – Maceió, AL, 2003.

MORALES, C.A.; MACHADO, L.A.T.; SILVA DIAS, M.A.; AMORIM, W.; FREDIANI, M.E.B. Characteristics of the precipitating systems during the 2002 dry-to-wet field campaign in the Amazon region. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLOUDS AND PRECIPITATION – ICCP, 14., 2004, Bologna, Italy. **Proceedings...** Bologna, [s.n], 2004.

NASA. **Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)**. Senior Review Proposal, 2005. [S.l.]: Disponível em: < http://trmm.gsfc.nasa.gov/trmm_rain/Events/TRMMSeniorProp_1.pdf >. Acesso em: 20 mar. de 2006.

NASDA. **NASDA TRMM Data Users Handbook**. National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Centre, 2001. [S.l.]: Disponível em: < http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/document/text/handbook_e.pdf > Acesso em: 15 abr. de 2006.

NEGRI, A.J.; BELL, T.L.; XU, L. Sampling of the diurnal cycle of precipitation using TRMM. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 9, p. 1333-1344, 2002.

RAY, P. S. Broadband complex refractive indices of ice and water. **Applied Optics**, v.11, p.1836, 1972.

SCHUMACHER, C.; HOUZE Jr., R. A. Comparison of Radar Data from the TRMM Satellite and Kwajalein Oceanic Validation Site. **Journal of Applied Meteorology**. v. 39, p. 2151-2164, 2000.

SEKHON, R. S.; SRIVASTAVA, R. C. Snow size spectra and radar reflectivity. **Journal Atmospheric Science**, v. 27, p. 299–307, 1970.

SHEPPARD, B. E. Effect of irregularities in the diameter classification of raindrops by the Joss-Waldvogel disdrometer. **Journal Atmospheric Oceanic Technology**, v.7, p.180-183, 1990.

SHORT, D. A.; KOZU T.; NAKAMURA K. Rainfall and raindrop size distribution observations in Darwin, Australia. In:URSI COMMISSION F OPEN SYMP. ON REGIONAL FACTORS IN PREDICTING RADIOWAVE ATTENUATION DUE TO RAIN, 1990, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro: International Union of Radio Science Commission, 1990. p. 35-40.

SIMPSON, J.; ADLER, R.F.; NORTH, G.R. A proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 63, n.3, p. 278-295, 1988.

SIMPSON, J.; KUMMEROW, C.; TAO, W.K.; ADLER, R.F. On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 60, p. 19-36, 1996.

STEINER, M.; HOUZE Jr., R.A. Sensitivity of monthly three-dimensional radar-echo characteristics to sampling frequency. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 76, p.73-95, 1998.

TENÓRIO, R. S. et al. Estimation of Z-R Relation through the disdrometer for the coastal region in the Northeast of Brazil. **Journal of the Korean Earth Science Society**, v. 24, p.30-35, 2003.

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). **Radar meteorològic: fundamentos**. Disponível em: < http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/trasp1.html >. Acesso em: 10 mar. 2006.

WOODLEY, W. L.; OLSEN, A. R.; HERNDON, A.; WIGGERT, V. Comparison of gauge and radar methods of convective rain measurement, **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, n. 5, p. 909-928, 1975.

APÊNDICE A

ELEMENTOS TEÓRICOS

A.1 Teoria Básica do Radar

A.1.1 Introdução

O termo Radar (Radio Detection and Ranging) tem sido utilizado de forma genérica para classificar os sistemas de transferência de ondas eletromagnéticas que operam na faixa de frequência de microondas.

Na década de 1930, com as ameaças de guerra, houve um acentuado impulso nas pesquisas em torno do radar. A Inglaterra, em 1936, produziu um radar com alcance de aproximadamente 65 km e, em 1938, instalou uma cadeia de estações-radar destinadas a detectar aviões inimigos e orientar as aeronaves de defesa aérea em sua costa leste. Foi nesse período que se observou o potencial do radar em detectar alvos meteorológicos.

Em 1939, foi desenvolvida por John Randall e Henry Boot, da Universidade de Birmingham, uma válvula chamada Magnetron, capaz de produzir pulsos de elevada potência com comprimento de onda de 10 cm. Assim, tornou-se possível o uso de altas frequências, na faixa de microondas, e uma diminuição considerável do tamanho da antena, permitindo que o radar pudesse determinar a posição de um alvo com maior precisão.

Após a 2ª Guerra Mundial, o radar, até então de uso exclusivamente militar, passou a ser empregado em outras atividades e a ser fabricado comercialmente. No início de 1960, teve-se um dos mais importantes avanços na tecnologia do radar que foi o desenvolvimento das técnicas Doppler. Radares Doppler quantificam a potência espalhada pelo alvo, e também a sua velocidade radial. Para aplicações meteorológicas, portanto, é possível avaliar o tamanho e o crescimento dos hidrometeoros a partir de ecos produzidos por esses elementos.

Os radares meteorológicos, hoje, são de suma importância para o monitoramento da atmosfera, pois não somente detectam a presença de hidrometeoros, como também movimentos das massas de ar. Desta forma, o uso de radares meteorológicos são de suma importância no apoio a áreas como gerenciamento e planejamento de recursos hídricos, agricultura, proteção ao voo, previsão imediata de tempo, etc. As informações coletadas pelos radares auxiliam os meteorologistas no rastreamento e detecção de tempestades severas, vendavais e chuvas de granizo, entre outros fenômenos.

A.1.2 Princípio de Funcionamento do Radar Doppler

O radar Doppler consiste, em princípio, de cinco subsistemas importantes, como mostrado na Figura A.1, sendo eles: o transmissor, que produz ondas eletromagnéticas de alta potência e alta frequência; a antena que envia e recebe os sinais; o receptor, que detecta os sinais retro-espalhados pelos hidrometeoros e amplifica-os; o processador de sinal, que digitaliza e processa o sinal que sai do receptor; e o gerador de produtos do radar, que gera as séries de dados tridimensionais.

Controlado pelo processador do radar, o transmissor produz pulsos de ondas eletromagnéticas que são direcionados para o dupplexador, um circuito de microondas não-linear, que envia o sinal transmitido para a antena. Os pulsos de energia possuem uma determinada largura e são transmitidos em uma dada Frequência de Repetição de Pulso – PRF (Pulse Repetition Frequency). As ondas eletromagnéticas deixam a antena e interagem com os hidrometeoros das nuvens, de modo que cada gota espalhe a energia incidente em todas as direções. Parte desta energia espalhada pelo volume total de gotas iluminado pelo feixe de onda do radar, retorna à antena, e desta vez, o dupplexador envia os sinais retro-espalhados para o receptor. Sabendo-se o momento em que o feixe de onda foi emitido, e quanto tempo depois o sinal retornou, determina-se a distância do alvo ao radar. A intensidade do sinal de retorno está ligada à distribuição do tamanho dos hidrometeoros; e a diferença de fase entre o sinal transmitido e o sinal recebido, está associada à velocidade de deslocamento radial dos hidrometeoros contidos dentro do volume iluminado pelo pulso.

Conhecendo-se a elevação e o azimute da antena, pode-se determinar a região do espaço onde está chovendo. Para uma mesma elevação e azimute a quantidade de pulsos transmitidos varia em função da PRF e da velocidade de rotação da antena. Assim, a amostragem final dos alvos localizados dentro de um feixe de microondas será em função dessas duas variáveis. A duração do pulso transmitido determina a resolução do radar.

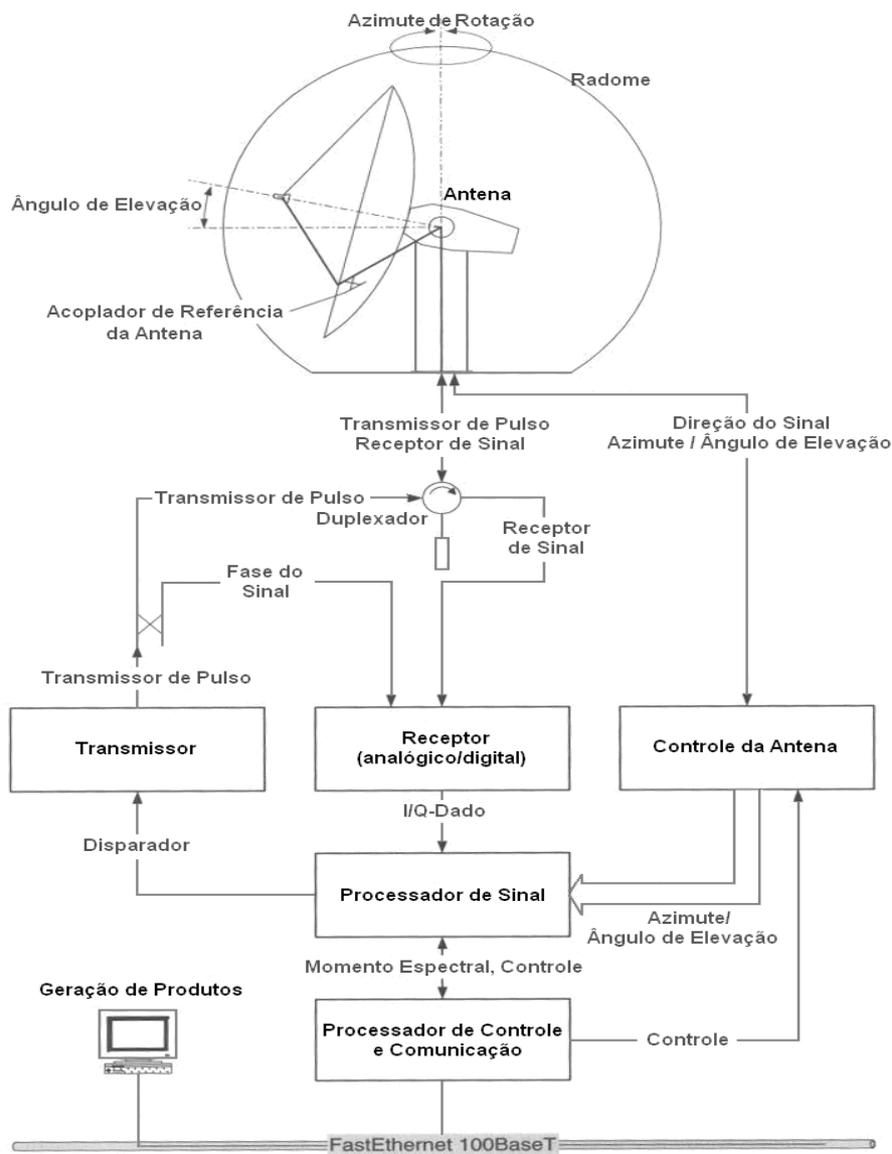


Figura A.1 – Componentes básicas de um sistema de radar Doppler.

Fonte: Adaptado de Meischner (2003).

A.1.3 Resolução e Alcance do Radar

A Figura A.2 mostra um esquema ilustrando os conceitos básicos de transmissão e recepção de sinais de radar.

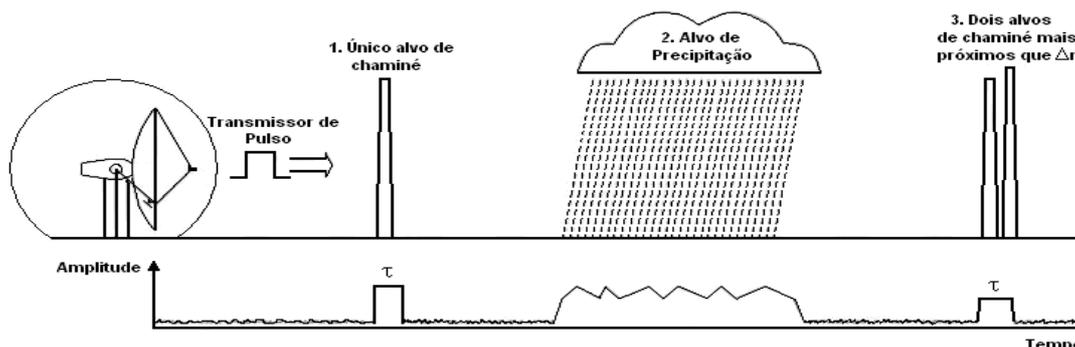


Figura A.2 – Conceitos básicos envolvidos na transmissão e recepção de sinais de radar.

Fonte: Adaptado de Meischner (2003).

A parte superior da Figura A.2 mostra a transmissão de um pulso de radar e a presença de alvos de diferentes naturezas ao longo do caminho de propagação do pulso. A parte inferior mostra a interpretação do receptor para o sinal retroespalhado após a interação com os alvos.

A distância d entre a antena do radar e um alvo é determinada pelo tempo t que o sinal gasta para deixar a antena interagir com o alvo e retornar a ela novamente. Considerando que a REM (Radiação Eletromagnética) se propaga na velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), então d pode ser calculado como:

$$d = \frac{t \cdot c}{2} \quad (\text{A.1})$$

Assim, pode-se inferir que a máxima resolução espacial (*range resolution*) de um radar, cuja largura do pulso é dada por τ , é:

$$resolução = \frac{\tau \cdot c}{2} \quad (A.2)$$

Caso um alvo, interceptado por um pulso de microonda, seja menor que $\tau \cdot c/2$, ele será indicado com tamanho igual à resolução do radar. Este resultado pode ser visualizado na Figura A.2, que mostra que o primeiro alvo a interceptar o pulso transmitido é uma torre, cuja largura é menor que a largura produzida pelo pulso. Como resultado, o receptor do radar interpreta que a torre possui uma largura dada pela equação (A.2) Ainda na mesma figura, nota-se que no final da faixa de alcance do radar existem duas torres posicionadas a uma distância inferior à máxima resolução do radar. Devido à limitação imposta pelo valor τ , os dois alvos serão mostrados como um só.

A.1.3.1 O Feixe Eletromagnético

O pulso de microondas deixa a antena em um feixe colimado de energia de diâmetro D_a igual ao diâmetro da antena. Devido aos efeitos da difração, o feixe começa a se abrir em forma cônica a uma distância aproximada $r = D_a^2 / \lambda$ (Doviak and Zrníc, 1993). Estes mesmos autores mostram que, o ângulo de abertura do feixe é dado em função do comprimento de onda transmitido pelo diâmetro da antena, através da expressão:

$$\theta' = 104 \lambda / D_a \quad (\text{ângulo dado em } ^\circ) \quad (A.3)$$

A região interna do cone onde a metade da potência total transmitida está concentrada, ou seja, a potência é maior ou igual a 3 dBZ (Figura A.3), possui uma abertura dada por:

$$\theta = 72.76 \lambda / D_a \quad (\text{ângulo dado em } ^\circ) \quad (A.4)$$

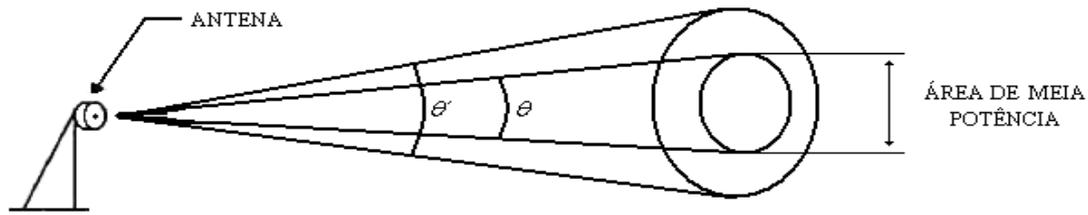


Figura A.3 – Esquema conceitual do feixe de microondas e região de meia potência.

A.1.3.2 Ganho da Antena

Se a potência P_t transmitida pelo transmissor fosse irradiada isotropicamente³, a densidade de potência em uma posição r seria:

$$S_i = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (\text{A.5})$$

Contudo, a antena concentra a potência gerada pelo transmissor no feixe de microonda, fazendo com que haja um ganho G na densidade de potência, que será expressa por:

$$S_i = \frac{P_t}{4\pi r^2} G \quad (\text{A.6})$$

Da teoria de antenas tem-se que o ganho de uma antena é dado em função de sua área efetiva A_e e o comprimento de onda λ transmitido. Portanto:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{ou} \quad (\text{A.7a})$$

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (\text{A.7b})$$

O ganho da antena tem a finalidade de colimar o feixe de microondas, de modo que a máxima potência fique concentrada no lóbulo principal de energia. Porém, de acordo com o padrão de irradiação de uma antena de radar, lóbulos secundários também são

³ Isotropicamente – irradiada igualmente em todas as direções.

irradiados pela antena e podem causar interferências na leitura dos dados. O padrão de irradiação de uma antena de radar é explicado em Doviak e Zrnic (1993) e está mostrado de forma conceitual na Figura A.4.

Esta figura ilustra a ocorrência de lóbulos secundários durante o processo de aquisição de dados do radar. Devido ao ganho da antena, a maior parte da energia está concentrada no lóbulo principal, porém, os lóbulos secundários, que também transmitem uma potência de menor intensidade, podem interferir no processo de aquisição de dados de um radar.

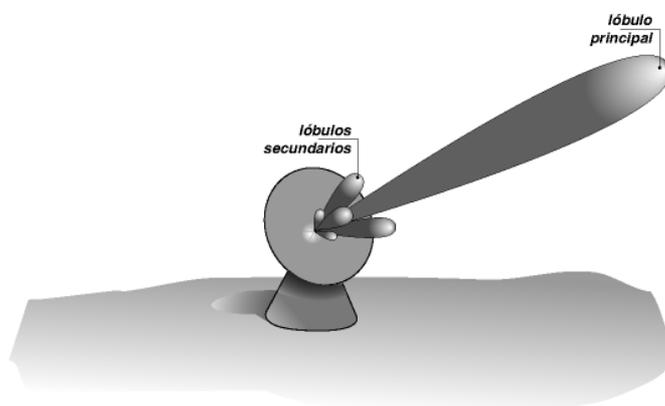


Figure A.4 – Esquema conceitual do padrão de irradiação de uma antena de radar.

Fonte: Adaptado do sítio eletrônico da Universidade Politécnica da Catalunya (http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/trasp1.html).

A.1.3.3 Secção Transversal de Espalhamento

A secção transversal σ de um elemento espalhador (por exemplo, um hidrometeoro) é uma área aparente que, ao interceptar uma densidade de potência S_i transmitida por uma antena, espalha isotropicamente essa energia incidente, produzindo na antena transmissora, uma densidade de potência refletida S_r dada por:

$$S_r = \frac{S_i \sigma}{4\pi r^2} \quad (\text{A.8})$$

A quantidade de energia espalhada pelos hidrometeoros, depende do número de partículas dentro de um volume do pulso no feixe de microondas e do tamanho, composição, forma e orientação das partículas em relação à antena. O total de energia retroespalhada é a soma da energia retroespalhada por cada hidrometeoro.

Para comprimento de ondas de radares meteorológicos de longo alcance, como aqueles operando nas bandas C (comprimento de onda da ordem de 5 cm) e S (comprimento de onda da ordem de 10 cm), o diâmetro da gota normalmente é muito menor comparado com o comprimento de onda ($D_i \ll \lambda$). Desta forma, σ está associado ao espalhamento Rayleigh e é expresso por:

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6 \quad (\text{A.9})$$

em que K está relacionado ao índice de refração n e ao coeficiente de absorção k dos hidrometeoros e é dado por:

$$K^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \text{ e } m = n - ik \quad (\text{A.10})$$

Segundo Battan (1973), os valores de $|K|^2$ para a água sob diversas temperaturas são dados pelos valores indicados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Valores de $|K|^2$ para água a diversas temperaturas.

| Temperatura (°C) | $\lambda = 10 \text{ cm}$ | $\lambda = 3,21 \text{ cm}$ | $\lambda = 1,24 \text{ cm}$ | $\lambda = 0,62 \text{ cm}$ |
|------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 20 | 0,9280 | 0,9275 | 0,9193 | 0,8926 |
| 10 | 0,9313 | 0,9282 | 0,9152 | 0,8726 |
| 0 | 0,9340 | 0,9300 | 0,9055 | 0,8312 |
| -8 | ---- | ---- | 0,8902 | 0,7929 |

Para partículas de gelo $|K|^2 = 0.176$. Quando tamanhos de flocos de neve são expressos como diâmetros de gotas obtidas após o derretimento do floco, $|K|^2 = 0.208$.

A.1.3.4 Preenchimento do Feixe de Microondas (Beam Filling)

Para analisar o retorno de um pulso de radar, o ideal seria produzir um feixe com a menor abertura possível, para assim amostrar a atmosfera, de forma que, todo o feixe fosse preenchido pelos hidrometeoros presentes dentro do volume iluminado. Desta forma, seria possível inferir conclusões sobre a quantidade e tipo dos hidrometeoros iluminados pelo feixe. Porém, a produção de feixe com abertura muito estreita é uma tarefa difícil de ser realizada devido a algumas limitações mecânicas impostas para se construir uma antena com diâmetro muito grande. Normalmente os radares operacionais apresentam antenas cujo diâmetro chega a 8 metros (por exemplo, os radares da rede americana NEXRAD (Next-Generation Radar) que operam na Banda S e C). Nessas características, a região de meia potência apresenta uma abertura da ordem de 1° . Assim, após sua transmissão pela antena, o pulso de radar se abre à medida que se propaga pela atmosfera. Isso faz com que locais distantes do radar possuam uma abertura tão grande, de tal modo que, uma nuvem inteira pode estar contida dentro do feixe. Também é muito comum ocorrer que somente parte da nuvem seja iluminada pelo feixe de microonda, deixando assim uma grande parte sem preenchimento.

A Figura A.5 ilustra dois casos distintos onde em A, o feixe é totalmente preenchido pela nuvem, e conseqüentemente, a real intensidade da chuva é medida pelo radar. Já em B, o feixe é parcialmente preenchido, e a potência refletida que retorna à antena representa somente uma pequena porção da área iluminada, comprometendo assim, a qualidade da medição da chuva.

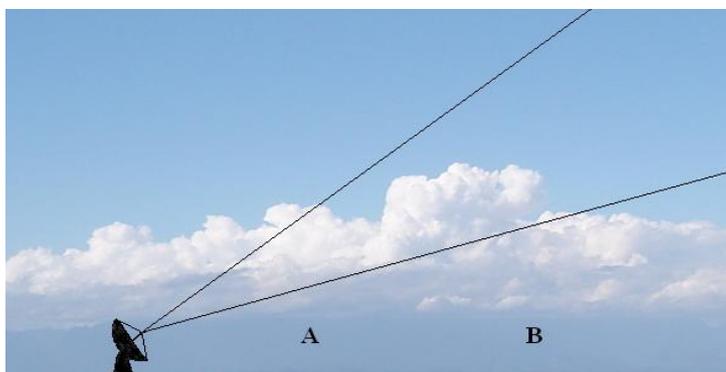


Figura A.5 – Efeitos no preenchimento do feixe de microondas.

A.1.3.5 Ecos de terreno

A interação da energia eletromagnética presente tanto no lóbulo principal, quanto nos lóbulos secundários, devido ao relevo, ao solo ou edifícios ao longo de sua trajetória, produz medidas de refletividade que não estão relacionadas com a precipitação. Essas medidas são decorrentes dos chamados ecos de terreno (*Clutter*) e ocorrem, normalmente, quando a antena apresenta baixas elevações. A Figura A.6 ilustra algumas situações em que é comum a ocorrência de ecos de terreno ocasionados pela incidência da radiação presente no lóbulo principal. Nestes casos, as imagens de radar irão sempre mostrar ecos fixos de alta intensidade.

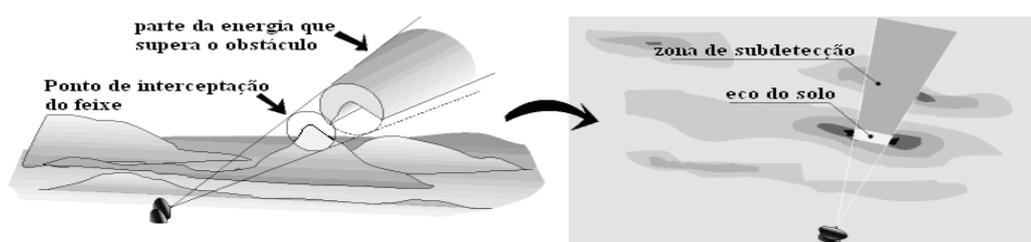


Figura A.6 – Ilustração da interceptação do pulso do radar por alvos do relevo que acarretam uma zona de forte refletividade fixa e, posterior obstrução do feixe. Na esquerda, tem-se uma visão em perspectiva e, na direita, a planta do local onde os ecos de terreno ocorrem.

Fonte: Adaptado do sítio eletrônico da Universidade Politécnica da Catalunya (http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/trasp1.html)

A interceptação da energia concentrada nos lóbulos secundários também produz, em muitos casos, o registro de ecos de terrenos, que são medidos como resultados da interceptação do lóbulo principal. Como a energia nos lóbulos secundários é pequena, os ecos de terreno decorrentes desse fenômeno aparecem somente nas imediações do radar.

De acordo com a Figura A.7, a energia associada ao pulso transmitido no lóbulo principal não será interceptada por nenhum alvo, porém, a energia presente nos lóbulos

secundários será refletida de volta ao radar devido à presença dos alvos de terreno. Desta forma, o radar irá processar esses ecos e interpretá-los como decorrentes do lóbulo principal.

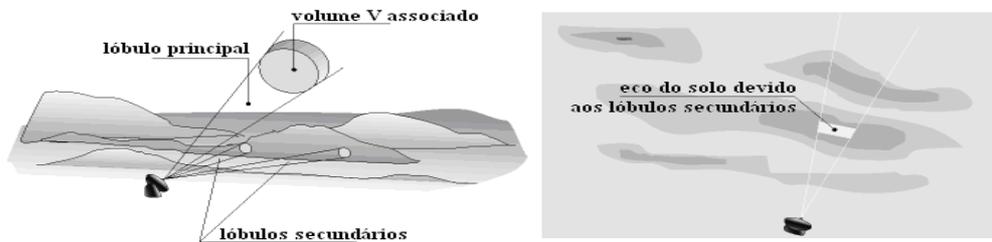


Figura A.7 – Ilustração dos ecos de terreno devido à interceptação dos lóbulos secundários pelos alvos de terreno.

Fonte: Adaptado do sítio eletrônico da Universidade Politécnica da Catalunya (http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/trasp1.html).

A.1.4 Equação Radar

A densidade de potência S_r (em watt) (equação A.8), refletida por um alvo meteorológico e interceptada por uma antena de área efetiva A_e (equação A.7b), resulta em uma potência dada por $P_r = S_r A_e$. Desta forma, a potência recebida pela antena pode ser expressa por:

$$P_r = \frac{S_i G \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^2 r^2} \quad (\text{A.11})$$

Substituindo (A.6) em (A.11) obtem-se:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (\text{A.12})$$

De acordo com Doviak e Zrnic (1993) as perdas causadas pela atenuação da energia incidente nos hidrometeoros (k), e as perdas causadas pela atenuação da energia incidente nos gases constituintes da atmosfera (k_g) ao longo do caminho r , percorrido

pelo pulso do radar, são dadas por $l = \exp\left(\int_0^r (k + k_g) dr\right)$. Introduzindo as perdas na equação (A.12) chega-se a:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4 l^2} \quad (\text{A.13})$$

O valor l^2 em (A.13) considera o caminho de ida e volta do pulso de microonda.

A secção transversal de espalhamento é produzida pelo efeito integrado de todos os hidrometeoros dentro do volume iluminado pelo pulso de microondas. Então, pode-se deduzir σ a partir da contribuição individual de cada hidrometeoro. Assim:

$$\sigma = \sum_{i=0}^n \sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} \sum_{i=0}^n D_i^6 \quad (\text{A.14})$$

em que D_i , é o diâmetro da gota e i é a i -ésima gota presente no volume iluminado.

Ao considerar o volume iluminado pelo pulso tem-se que:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=0}^n \sigma_i}{V} = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} \frac{\sum_{i=0}^n D_i^6}{V} \quad (\text{A.15})$$

em que, $\sum_{i=0}^n D_i^6$, dentro do volume iluminado, é a principal quantidade a ser medida pelo radar. Esse valor é conhecido como **Refletividade radar** (Z) e é expresso em $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$. A equação (A.15) pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_r = \frac{C |K|^2 Z}{r^2} \quad (\text{A.16})$$

em que C , é chamado constante radar. A equação (A.16) explica a potência recebida pela antena do radar e para tal, são feitas as seguintes considerações:

- a) O espalhamento das partículas de precipitação no volume amostrado são esferas dielétricas homogêneas com diâmetros menores, quando comparado com o comprimento de onda. Contudo, diâmetros superiores a 6 mm não introduzem erros;
- b) O volume do pulso está completamente preenchido com partículas de precipitação espalhadas aleatoriamente;
- c) O fator de refletividade Z é uniforme em todo o volume do pulso amostrado e constante durante o intervalo de amostragem;
- d) As partículas são todas gotas de água ou todas de gelo, desta forma, $|k|^2$ é o mesmo para todas as partículas;
- e) Espalhamento múltiplo é desprezível;
- f) As ondas incidentes e retroespalhadas são polarizadas linearmente;
- g) O lóbulo principal da radiação padrão da antena é da forma Gaussiana ou aproximadamente, como mostrado na Figura A.4;
- h) A contribuição dos lóbulos laterais do feixe (Figura A.4) para a potência recebida é desprezível;
- i) A antena é um tipo de refletor parabólico de secção transversal circular e o seu ganho é conhecido;
- j) A absorção do sinal transmitido pela interferência da superfície da antena no feixe é desprezível;
- k) Todas as perdas da potência do sistema são conhecidas;
- l) A potência medida P_r é calculada sobre um número suficiente de pulsos ou amostras independentes que sejam representativos do alvo.

O radar por sua vez, não mede diretamente a chuva, ele recebe uma determinada densidade de potência refletida pelos alvos de chuva denominado refletividade. Esta refletividade possui uma relação física com o espectro de gotas observado. A partir deste espectro, pode-se determinar uma relação entre a refletividade do radar e a taxa de precipitação correspondente.

A refletividade efetiva Z de alvos meteorológicos pode ser encontrada a partir de:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D_i) D_i^6 dD_i \quad (\text{A.17})$$

em que, D_i é o diâmetro da gota e N é o número de gotas com um determinado diâmetro. Segundo Atlas et al. (1973), a taxa de precipitação é dada por:

$$R = \int_0^{\infty} \frac{\pi D_i^3}{6} N(D_i) w_t(D_i) dD_i \quad (\text{A.18})$$

em que, w_t é a velocidade terminal da gota de diâmetro D_i , dada por:

$$w_t(D_i) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D_i) \quad (\text{A.19})$$

Se existe uma distribuição do tamanho de gotas e conhece-se a velocidade com que uma gota de um dado diâmetro cai, pode-se usar o fator de refletividade do radar para calcular a taxa de precipitação, usando a relação:

$$Z = aR^b \quad (\text{A.20})$$

que é conhecida como Relação $Z-R$. Nessa relação, R é medido em mm h^{-1} , a e b são coeficientes que dependem, fundamentalmente, do tamanho e distribuição do espectro de gotas na atmosfera e são determinados por meio de métodos estatísticos que consistem basicamente em:

- a) Medir Z e R independentemente, usando um radar e um pluviômetro, por exemplo, ou;

- b) Usar apenas um espectrogranulômetro ou disdrômetro (Joss e Waldvogel, 1967 e, recentemente, Tenório et al, 2003 e Moraes, 2003) para calcular os coeficientes a e b em função de Z e R , fornecidos pelo instrumento.

Há várias relações Z-R determinadas experimentalmente e a Tabela A.2 mostra algumas obtidas para diferentes condições de precipitação.

Tabela A.2 – Relações típicas empíricas entre o fator de refletividade Z (mm^6m^{-3}) e a intensidade da precipitação, R (mm h^{-1}).

| Relação Empírica entre Z e R | Tipo de Precipitação | Referência |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| $Z = 140 R^{1.5}$ | Chuveiro, garoa | Joss et al. (1970) |
| $Z = 200 R^{1.6}$ | Chuva Estratiforme | Marshall and Palmer (1948) |
| $Z = 31 R^{1.71}$ | Chuva Orográfica | Blanchard (1953) |
| $Z = 500 R^{1.5}$ | Temporal | Joss et al. (1970) |
| $Z = 300 R^{1.4}$ | Chuva Convectiva | Woodley et al.(1975) |
| $Z = 1780 R^{2.21}$ | Flocos de Neve | Sekhon and Srivastava (1970) |
| $Z = 176.5 R^{1.29}$ | Região de Maceió | Moraes (2003) |

Uma das maneiras mais eficientes de se levantar a distribuição dos tamanhos de gotas é a partir de medidas feitas por disdrômetros. Esses instrumentos possuem um sensor de impacto para estimar o diâmetro das gotas através de uma tensão induzida pelo deslocamento de uma membrana vibratória. A tensão induzida depende do tamanho das gotas e da velocidade terminal das mesmas. A calibração dos disdrômetros determina os limites exatos de cada canal de amostragem (Sheppard, 1990; McFarquhar e List, 1993); ou seja, as categorias de diâmetros que será fornecida pelo disdrômetro. Desta forma, pode-se optar em determinar as contagens das gotas em 127 canais ou empregar uma saída padrão de 20 canais. Em geral, somente 20 canais são empregados para contagem, determinando-se assim um tamanho médio de gotas para cada intervalo.

Desta forma, o disdrômetro fornece o número de gotas de uma classe de diâmetro por intervalo de tempo (Δt) em uma área de amostragem A . Então, o número de gotas $N(D_i)$ por metro cúbico de cada intervalo do i -ésimo canal de diâmetro médio D_i é:

$$N(D_i) = \frac{C_i}{w_t(D_i) A \Delta t} \quad (\text{A.21})$$

em que, C_i é o número de gotas do i -ésimo canal do disdrômetro e $w_t(D_i)$ é a velocidade terminal da gota de diâmetro D_i dada em ms^{-1} .

A.2 Calibração Radar x Pluviômetro

A conversão de refletividade em taxa de precipitação é o principal objetivo quando se deseja estimar a precipitação. Essa conversão pode ser obtida usando diferentes métodos, porém, o mais tradicional é o uso da função exponencial de dois coeficientes a e b (relação Z-R). Relações desse tipo são consideradas empíricas embora uma forte justificativa teórica provê o embasamento para seu uso. Ambos, refletividade do radar e taxa de precipitação, podem ser expressos como momentos da distribuição do tamanho de gotas dentro do volume amostrado. Enquanto a taxa de precipitação é obtida pelo terceiro momento da distribuição dos tamanhos de gotas, a refletividade é obtida pelo sexto momento. A Figura A.8 mostra a relação entre valores de taxa de precipitação, obtidas diretamente pela distribuição dos tamanhos de gotas (utilizando disdrômetros) para 5000 minutos observados, e os respectivos valores de refletividade (Short et al., 1990).

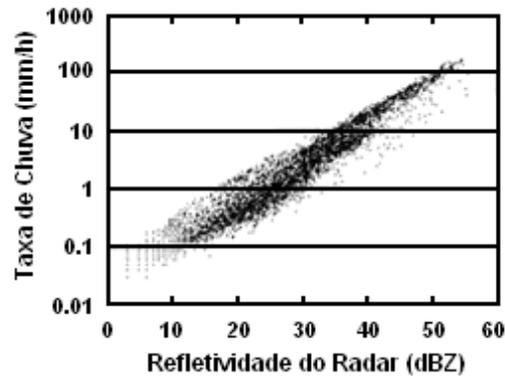


Figura A.8 – Refletividade e taxa de chuva calculada a partir da distribuição de tamanho de gotas coletadas em Darwin, Austrália.

Fonte: Adaptado de Short et al. (1990).

A Figura A.8 mostra a alta correlação existente entre a taxa de precipitação medida por disdrômetros e a refletividade avaliada por radares. Como a taxa de precipitação é obtida diretamente da distribuição do tamanho das gotas, os valores mostrados na figura apresentam baixas incertezas associadas a variações temporais da precipitação.

O levantamento de relações Z-R pode também ser feito através de medidas da precipitação feitas por pluviômetros. Porém, isso deve ser feito com muito critério uma vez que pluviômetros normalmente quantificam o valor acumulado de chuva em um determinado tempo, e não a taxa de precipitação instantânea, enquanto que o radar, por sua vez, avalia a refletividade em um volume a uma certa altura e somente após o término da varredura volumétrica é que o mesmo volume será amostrado novamente. Além disso, o volume amostrado pelo radar é muito maior quando comparado com o valor pontual do pluviômetro. As características de varredura do radar, junto com a medida de precipitação acumulada nos pluviômetros, quando combinados com as grandes variações temporais e espaciais da precipitação, indicam que não se pode esperar altas correlações entre valores de refletividade e taxas de chuvas para escalas de tempo de curta duração. Devido a essas razões é que se consideram relações Z-R obtidas por pluviômetros como relações estatísticas. A Figura A.9 mostra dados de refletividade e de precipitação acumulada observada a cada 5 minutos na mesma localidade da Figura A.8.

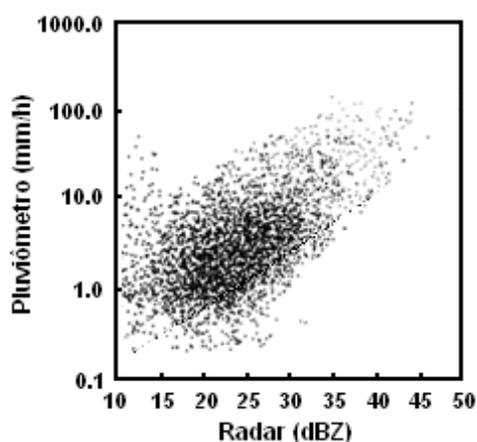


Figura A.9 – Refletividade do radar e precipitação acumulada em 5 minutos para locais situados em Darwin, Austrália.

Fonte: Adaptado de Short et al. (1990).

Analisando a Figura 2.9, nota-se que a variação dos valores de taxa de chuva obtidos por pluviômetros em relação aos valores de refletividade do radar é muito maior do que àquela obtida por disdrômetros.

A.3 Produtos de radar de superfície

Uma característica importante dos radares meteorológicos modernos é o software para tratamento do grande volume de dados amostrados. Esse software permite obter em tempo quase real, vários produtos extraídos da varredura volumétrica feita pelo radar. O mapa de chuva a um nível de altura constante, denominado CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) é um desses produtos. São obtidos a partir da extração de valores de refletividade do radar coletados em cada azimute e em cada elevação. No final do processo de varredura eletrônica, ilustrado na Figura A.10, um volume tridimensional de dados é obtido pelo radar e, com isso, é possível levantar todo o perfil vertical de refletividade do radar dentro da área de cobertura do sensor (Figura A.11).

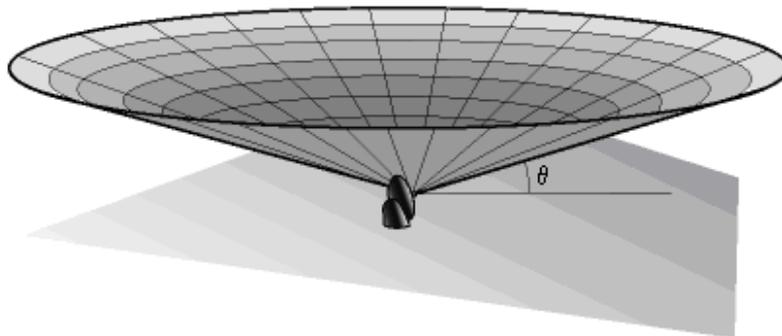


Figura A.10 – Processo de varredura de aquisição de dados do radar para uma dada elevação θ . O sistema de radar amostra os valores de refletividade em 360° para cada elevação formando um volume tridimensional de dados.

Fonte: Adaptado do sítio eletrônico da Universidade Politécnica da Catalunya (http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/trasp1.html).

A Figura A.11 ilustra o esquema de varredura para a obtenção do volume tridimensional de dados que é usado para a elaboração de vários produtos de radar, incluindo o CAPPI.

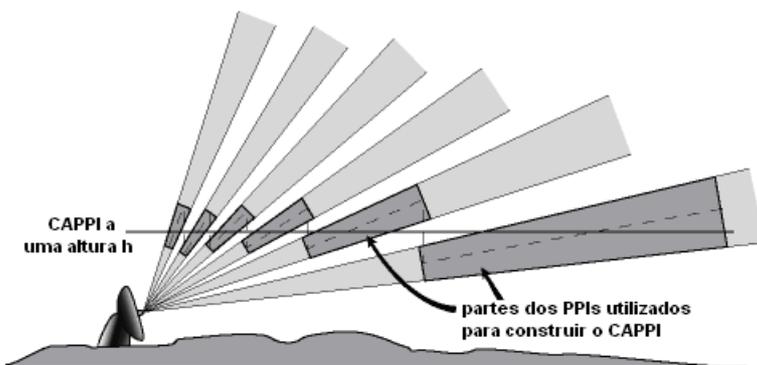


Figura A.11 – Passos da varredura para a obtenção do volume tridimensional de dados.

Fonte: Adaptado do sítio eletrônico da Universidade Politécnica da Catalunya (http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/trasp1.html).

Os dados de chuva sobre a área de cobertura do radar são extraídos de um nível de altura constante, cuja resolução temporal é definida pelo usuário. A Figura A.12 ilustra um CAPPI a 3 km de altura obtido pelo radar de Canguçu, RS.



Figura A.12 – CAPPI a 3 km de altura obtido pelo radar de Canguçu em 11/06/2007.

Fonte: Sítio eletrônico do DECEA (2007).

A qualidade dos dados do radar meteorológico deve ser investigada constantemente, pois os componentes eletrônicos do sistema podem ser descalibrados por diversos fatores. Nesse sentido, é importante manter um programa regular de calibração eletrônica do radar e, se possível, manter uma rede de pluviômetros e disdrômetros para eventuais correções dos valores de refletividades que podem ser alterados por outras fontes de variações, como por exemplo, o ganho da antena e variações causadas por acúmulo de poeira e resíduos nos “radomes”.

A Tabela A.3 sumariza os principais parâmetros dos radares de superfície pertencentes ao DECEA.

Tabela A.3 – Parâmetros dos radares do DECEA.

| | |
|------------------------|--|
| Frequência de operação | 2,7 a 2,9 GHz |
| Potência de pico | 850 KW |
| Largura de pulso | Pulso curto (SP): 1 μ s; Pulso longo (LP): 2 μ s |
| PRF | 400 a 1200 Hz (SP) e 250 a 400 Hz (LP) |
| Largura de Feixe | 1,98° |
| Polarização | linear simples (não tem dupla polarização) |
| Diâmetro da antena | 3,75 m |
| Ganho da antena | mínimo de 37,5 dB |
| Banda de operação | S (10 cm) |
| Sensibilidade – MDS | -114 dBM |
| Capacidade de detecção | melhor que 12 dBZ a 200 Km |
| Processamentos | refletividade (Z), velocidade (V), largura espectral (W) |

A.4 Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM)

O satélite TRMM desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e pela JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), lançado em 27 de Novembro de 1997, foi designado com um tempo de vida de três anos e equipado com diversos sensores capazes de adquirir informações relacionadas às características da precipitação tropical. Esse satélite foi o primeiro a fazer uso simultâneo de instrumentos de microondas ativo e passivo.

A principal função do TRMM é observar a estrutura, a taxa e a distribuição da precipitação nas áreas tropical e subtropical com o objetivo de entender o mecanismo do clima global e também do ciclo hidrológico (Simpson et al., 1996; Simpson et al., 1988).

O satélite foi originalmente lançado em uma órbita de aproximadamente 350 km de altura, uma inclinação de 35° (cobrindo as áreas tropical e subtropical entre as latitudes de 35° N e 35° S do Equador), e gasta cerca de 91 minutos para completar uma volta em

torno do planeta. Essas características revelam que para passar no mesmo ponto sobre a superfície da terra em uma mesma hora local, o satélite leva no mínimo 23 dias, dependendo da latitude.

A bordo do TRMM encontram-se os seguintes instrumentos: um Radar de Precipitação (TRMM-PR), o primeiro radar meteorológico no espaço; um radiômetro de multi-frequência em microonda passiva (TRMM Microwave Imager – TMI), que complementa o PR pelo fato de fornecer o conteúdo total dos hidrometeoros (água e gelo) dos sistemas precipitantes e, um radiômetro visível/infravermelho (VIRS). Estes três instrumentos formam o pacote de monitoramento da chuva do TRMM e são usados separadamente ou em conjunto para compreender os processos de precipitação, sua estrutura vertical e horizontal e sua climatologia. Em adição, existem dois instrumentos relacionados ao Sistema de Observação da Terra: CERES (Cloud and Earth Radiant Energy System), que parou de funcionar 8 meses depois do lançamento do satélite, e o LIS (Lightning Imaging Sensor), usado para a detecção de descargas elétricas.

A.4.1 Radar de Precipitação (PR)

O radar de precipitação do TRMM (PR) é o primeiro radar de chuva a bordo no espaço, capaz de observar diretamente a distribuição vertical da chuva e, tem por objetivo, fornecer a estrutura tridimensional da chuva obtendo medidas quantitativas dela sobre a terra ou sobre o oceano. O PR foi desenvolvido pelo NICT (National Institute of Information and Communication Technology) e pela JAXA. A Tabela A.3 sumariza os principais parâmetros do PR.

Tabela A.3 – Principais parâmetros do TRMM-PR.

| Parâmetros | Especificação |
|----------------------|-------------------------------|
| Frequência | 13,796 – 13,802 GHz |
| Sensibilidade | ~ 0,7 mm/h (S/N pulso ~ 0dBZ) |
| Resolução Horizontal | 4,3 km (Nadir) |
| Resolução Vertical | 250 m (Nadir) |
| PRF | 2776 Hz |
| Tipo | 128 elementos |
| Largura do Feixe | 0,71° x 0,71° |
| Abertura | 2,0 m x 2,0m |
| Ângulo de Varredura | ± 17° |
| Pico da Potência | ~500 W (Saída da Antena) |
| Largura do Pulso | 1,6 µs |
| Escala Dinâmica | ~70 dBZ |
| <i>Swath width</i> | ~215 km |
| Níveis na Vertical | 80 |
| Níveis na Horizontal | 49 |

As características de imageamento e dos sensores a bordo do TRMM estão ilustradas na Figura A.13.

De acordo com a Figura A.13 e a Tabela A.3, percebe-se que a resolução vertical do radar é de 250 metros, o que produz 80 diferentes níveis de altura capaz de amostrar a atmosfera desde a superfície até uma altitude de 20 km. Como a largura do feixe é de 0.71°, e a altura da antena é de 350 km, tem-se como resultado o imageamento de uma faixa de aproximadamente 215 km. Essa faixa é dividida em 49 células de 4.3 km cada correspondentes a cada IFOV (Instantaneous Field of View) do satélite.

A partir de agosto de 2001, a órbita do TRMM foi elevada para aproximadamente 402.5 km de altura, o que resultou em uma diminuição de sua resolução espacial para 5 km. Conseqüentemente, houve um aumento da faixa imageada de 215 km para aproximadamente 245 km.

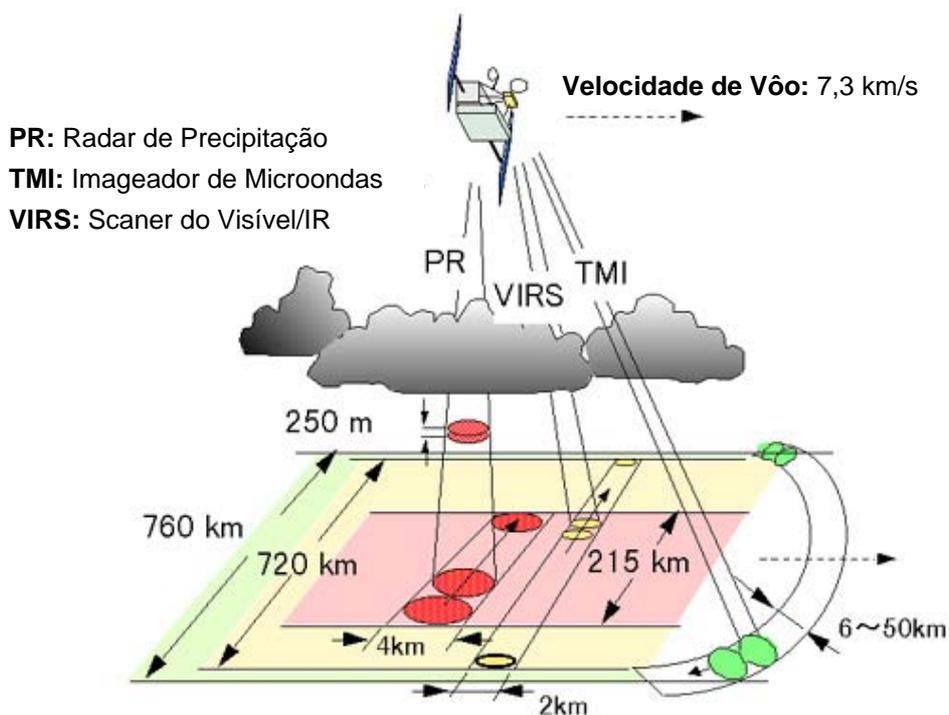


Figura A.13 – Geometria da varredura para instrumentos relacionados à precipitação.

Fonte: Adaptado de NASDA (2001) e Kummerow et al. (1998).

A.4.2 Padrão de Amostragem do TRMM-PR

O período de cada órbita (aproximadamente 91 minutos) e a inclinação do satélite (35°) fazem com que a amostragem da atmosfera sobre um mesmo local apresente um padrão irregular, e dependendo da latitude, o satélite pode demorar até 48 dias para passar sobre um mesmo local na mesma hora. Negri et al. (2002) levantou o padrão de amostragem do TRMM para a região tropical da América do Sul e revelou os locais que receberam mais visitas durante um período de três anos (1998 – 2000). Angelis (2003) também obteve o padrão de amostragem do TRMM para toda a América do Sul e revelou que áreas localizadas em médias e altas latitudes, próximas a latitude 35° S, são as mais visitadas. Durante o período de estudo, o número mínimo de amostragem obtida pelo satélite foi 313 na Amazônia Central. Por outro lado, o máximo foi de 2124 sobre a parte sul da área de estudo. A Figura A.14 mostra o padrão de amostragem levantado por Angelis para um período de três anos de dados (1998-2000).

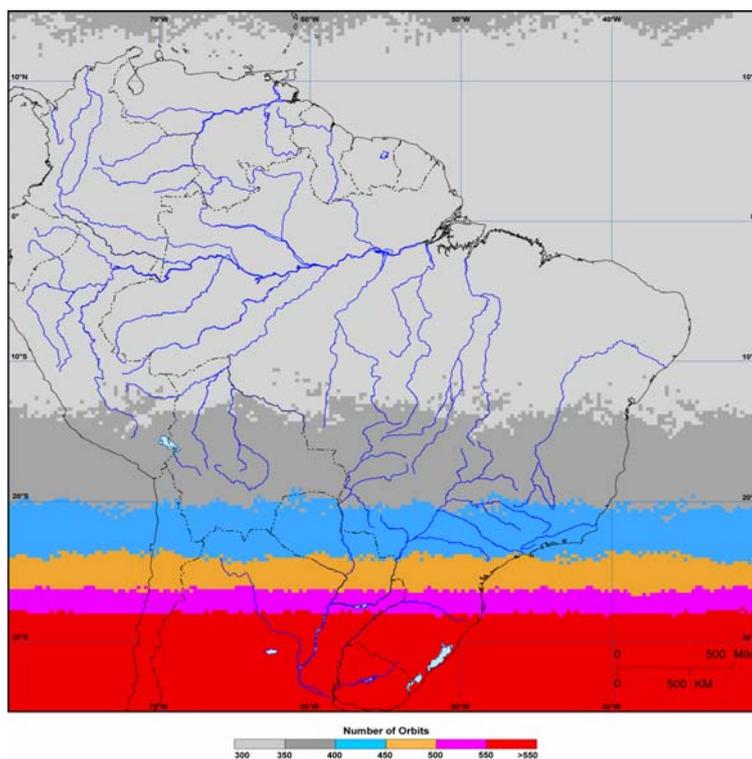


Figura A.14 – Padrão de amostragem do TRMM-PR sobre a América do Sul.

Fonte: Angelis (2003).

A.4.3 Aquisição dos dados

Os valores de refletividade são armazenados em um arquivo no qual o usuário poderá recuperar todo o perfil tridimensional amostrado pelo satélite. De acordo com o padrão de imageamento do PR, um único perfil vertical apresenta 49 valores que representam a distribuição horizontal da refletividade (5 km de resolução) e 80 valores que representam a distribuição vertical (250 m de resolução). Cada órbita do satélite (scan) levanta aproximadamente 9249 perfis de dados produzindo, portanto, uma matriz em três dimensões definida pelos valores citados acima.

A partir dos dados tridimensionais é possível obter CAPPI's até altitudes de 20 km. Um exemplo de um CAPPI a 3 km de altura mostrando os valores de refletividade obtidos durante uma passagem do PR sobre o Brasil é mostrado na Figura A.15.

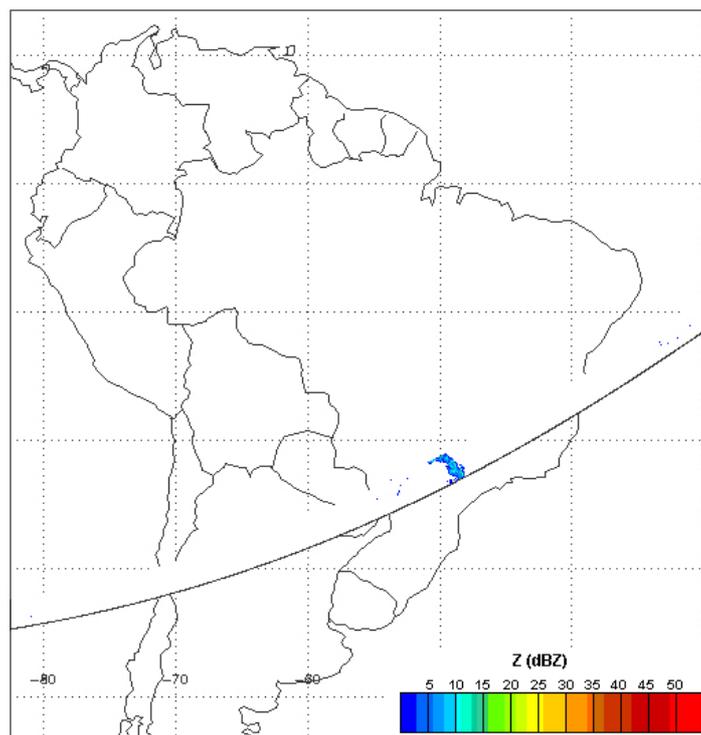


Figura A.15 – CAPPI a 3 km de altura obtido durante a órbita 46108 do dia 18/12/2005 sobre o Brasil.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.